

多波束数据传输技术研究

潘未庄,段术生,牟传坤,常桂林

(广州海格通信集团股份有限公司,广州 510663)

摘要:高速实时数字多波束成形系统主要采用光纤传输技术传输数据,而光纤可能受到体积、光衰、价格、安装等限制,引入高清数字视频传输技术可以有效解决此问题。提出了一种同轴电缆多波束数据传输方案,该方案由高速串行收发器、驱动器、均衡器等组成,其原理是基于串行数字接口技术实现多波束数据高速传输。设计了仿真实验并进行了实物测试,仿真和测试结果表明该方案可以达到与光纤传输方案相同的性能。

关键词:多波束;数据传输;北斗导航;光纤通信

中图分类号:TN914 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)02-0085-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.02.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on multi-beam data transmission technology

PAN Weizhuang, DUAN Shusheng, MOU Chuankun, CHANG Guilin

(Guangzhou Haige Communications Group Incorporated Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: High speed real-time digital multi beam forming system mainly uses optical fiber transmission technology to transmit data, however, optical fiber may be limited by size, luminous decay, price, installation, etc. The introduction of high-definition digital video transmission technology can effectively solve this problem. This paper proposes a coaxial cable multi-beam data transmission scheme, which consists of high-speed serial transceiver, driver, equalizer, etc. Its principle is to achieve high-speed transmission of multi-beam data based on serial digital interface technology. Simulation experiments and physical tests have been carried out, and the simulation and test results show that this scheme can achieve the same performance as the optical fiber transmission scheme.

Key words: multi-beam, data transmission, beidou navigation, optical fiber communication

0 引言

随着数字信号处理和数字芯片的飞速发展,以数字多波束形成技术为核心的智能阵列天线广泛应用在新一代雷达、无线移动通信、卫星通信和卫星导航等领域^[1-2]。这些应用均涉及到天线和主机之间实时高速地传输多波束数据和控制信号,需要的带宽可能高达 Gb/s。在一些大尺寸的载体(如舰船、空间飞行器和陆上大型移动载体)上,天线和主机之间距离可能长达几米甚至上百米。目前,实现天线和主机之间数据传输的主流方案是采用光纤传输,但是光模块体积

大,对工程布设环境有要求;若主机与天线之间要求双向通信时,则需要采用成本更高的多模光纤。因此,本文提出一种新型的多波束数据传输方案。

1 传统的多波束数据传输技术

目前,高速大容量数据传输技术按照传输介质划分主要有光纤、无线、电缆等传输技术,主要数据传输技术特点对比如表 1 所示。

1.1 光纤传输技术在多波束中的应用

中长距离高速传输大容量数据应用几乎都采用光纤传输^[3]。一个典型的光纤传输系统主要模块有同步模块、组帧/拆帧模块、变速模块、高速串行收发器、光模块和光纤等,其传输方案如图 1 所示。天线端的多路波束数据经过同步模块与本地时钟同步,然后在组帧模块中进行重组、校验和帧计数等处理,形成 1 路并行数据,再经过变速模块调整数据位宽和时钟等

收稿日期:2022-04-15。

作者简介:潘未庄(1980—),男,广西柳州人,硕士,广州海格通信集团股份有限公司主任算法设计师。主要研究方向为自适应信号处理、阵列信号估计和检测、数字波束成型相控天线技术、高速数字信号处理、SOC 集成设计等。



表 1 主要数据传输技术特点对比

技术名称	技术特征	优点	缺点
光纤传输	光通信	大带宽,长距离,大容量	复杂度和成本高,体积大
无线传输	正交频分复用, MIMO 天线	灵活,扩展性强	延迟大,复杂度高
电缆传输	信号差分,信道编码	可靠性高,成本低	距离短

参数,完成与高速串行发送器的界面适配,然后经过光纤传输到接收机端,驱动接收机端的光模块;接收机端的高速串行接收器将光模块的电信号经过变速、帧拆解和同步等处理后,恢复出多波束信号。

假设 5 个地球静止轨道(GEO)波束^[2]、12 个中圆地球轨道(MEO)波束、3 个倾斜地球同步轨道(IGSO)波束的数据率分别是 $5 \times 5 \text{ bit} \times 62.5 \text{ MHz}$ 、 $12 \times 5 \text{ bit} \times 62.5 \text{ MHz}$ 、 $3 \times 5 \text{ bit} \times 62.5 \text{ MHz}$,共同组成了 $100 \text{ bit} \times 62.5 \text{ MHz}$ 的数据流。考虑到高速收发器的内部编码方式多为 64B/66B 或 128B/132B,数字帧长度是 64 bit,则取整到 $128 \text{ bit} \times 62.5 \text{ MHz}$,经过变速模块处理后,形成 $64 \text{ bit} \times 125 \text{ MHz}$ 的数据流。为满足 95% 的带宽利用率,高速发送器读时钟高于 131 MHz 即可。采用光纤传输多波束数据的优点是数据率高,传输距离远,缺点是光电设备对使用 and 安装要求高,长期使用会出现光衰竭问题,成本和延迟不占优等。

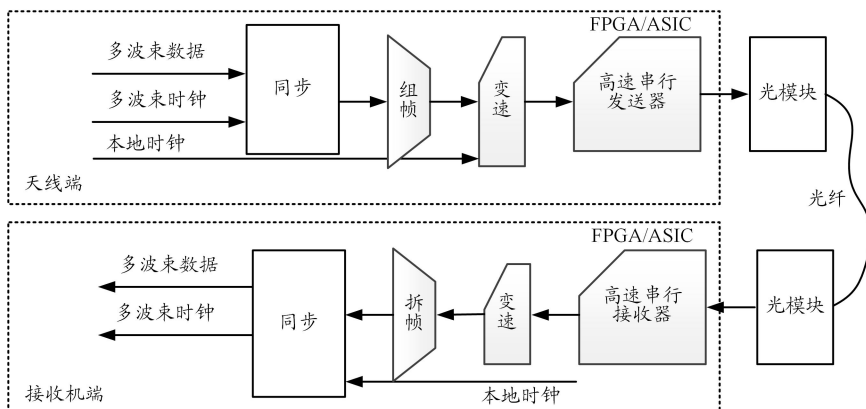
1.2 无线宽带高速收发调制技术在多波束传输中的应用

无线传输可以降低对布线的要求^[4-5],但容易受到外界干扰,如果把无线信道改成有线信道可以避免此类问题。无线信道改成射频电缆后,宽带高速无线收发器的方案也可以应用到多波束数据传输中,其传输方案如图 2 所示。可以看出,无线收发方案和光纤传输方案类似,主要区别在于光模块换成了无线收发器和多工器,光纤换成了射频电缆。高速串行收发器和无线收发器之间的接口采用 JESD204B/C 标准,最高速率超过 12 Gb/s,可以满足当前的多波束数据传输需求。无线收发芯片(例如 AFE7799、ADRV902x 等型号^[2])内部综

合了 IQ 调制、直接上下变频、通道校正、信道均衡、预加重、去加重等多种技术^[3],配合多工器在 1 根射频电缆上即可实现大规模阵列天线的有线多输入多输出(MIMO)和多路波束数据传输,具有灵活的可编程特性,可以根据系统的电磁频谱规划来调整频点,提升系统的电磁兼容性(EMC)和电磁干扰(EMI)性能。虽然无线收发方案的功能和光纤传输方案相同,但其软硬件系统复杂及占印制板面积大等不利因素,限制了其应用范围。

1.3 高速串行技术在多波束传输中的应用

吉比特多媒体串行链路(GMSL)是另外一种高速大容量数据实时传输技术^[4],采用高速串行器和解串器套片,将多路并行波束数据作为原始的视频数据,串行化成 1 路高速差分串行数据,驱动同轴或屏蔽双绞线(STP)电缆进行传输。高速串行传输方案如图 3 所示。可以看出,该方案和前述 2 个方案的主要差异在于把 FPGA/ASIC 内部的高速串行收发器模块用外部的芯片套装代替,同时省去光模块或无线收发器芯片,软硬件系统设计更为简洁。驱动芯片采用的差分信



FPGA/ASIC: 可编程门阵列/专用集成电路

图 1 光纤传输方案

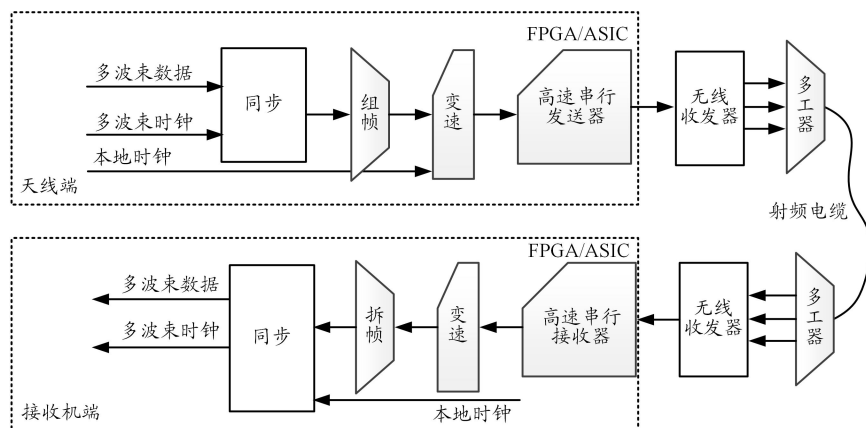


图 2 无线传输方案

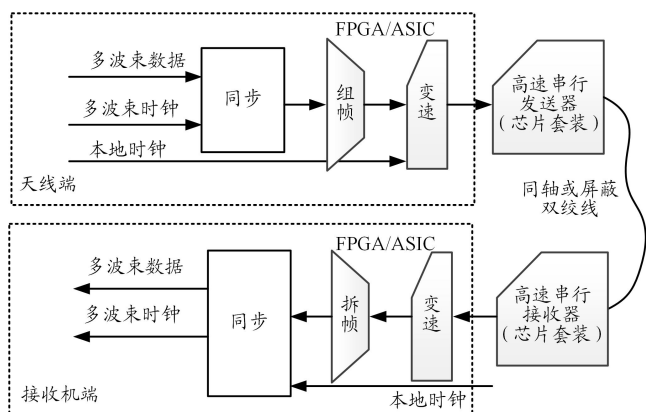


图3 高速串行传输方案

号技术电平一般为电流模逻辑(CML)电平,传输数据率达10 Gb/s,但是传输距离较短。在使用预加重和去加重的情况下最远传输距离只有15 m,最高传输数据率只有3.125 Gb/s。如果考虑编码效率,则实际可利用的带宽更低,进一步限制了其应用范围,因此,该方案只适合波束个数较少或者短距离的场合。

2 同轴电缆多波束数据传输方案

中长距离大容量高清视频传输技术标准主要有数字分量串行接口(SDI)标准和 CoaXPress(CXP)标准2种。其中,SDI标准支持高清数字数据在1根同轴电缆上无损传输非压缩的视频和图像数据,分辨率最高为8K级别,数据率高达12 Gb/s,电缆长度可到75 m;而CXP标准是1种非对称高速点对点串行通信标准,在1根同轴电缆上传输速率高达12.5 Gb/s,同时支持数据率达41.6 Mb/s的反向低速链路,方便设计双向非对称通信的应用,通信距离最长为65 m,并能通过中继器扩大到数百米,广泛应用于工业相机、机器视觉、医学影像和监控安防等领域^[9]。

这2种标准除了具体协议内容有差异和SDI是单向通信等区别外,相似之处很多,比如接口速率相近,高速数据端的信号电气规格相互兼容,通信介质都是RG59类同轴电缆。一些CXP接口芯片同时支持SDI协议,这为应用到多波束数据传输提供了更多的选择。因此,针对几种主流的多波束数据传输方案的不足,同时考虑到实际应用需求,本文提出基于SDI接口芯片同时兼容CXP协议的同轴电缆多波束数据传输方案,如

图4所示。可以看出,该方案和光纤传输方案类似,同时具备很强的扩展性,12 Gb/s的数据率为后续扩展提供了近3倍的升级空间。将SDI驱动器/均衡器更换为CXP收发器,接收机端能通过低速通信链路实现与天线双向通信,在接收多波束数据的同时,能向天线传输波束控制矢量、1 PPS信号等数据;由于使用物理层协议进行透传,相比标准的SDI方案省略了各种信号处理模块,如图中点虚线框部分的校验模块、加/解扰模块和各种同步模块等,设计更加简洁。

2.1 硬件功能模块设计

同轴电缆多波束数据传输方案硬件功能模块如图5所示。天线端FPGA/ASIC子系统采用波束时钟驱动并行波束数据;设计参考时钟提供给SDI高速收发器作为基准,时钟误差控制在200 ppm以内;子系统输出高速SDI信号到SDI/CXP驱动器,经过重定时消除抖动后通过驱动模块输出到同轴电缆上。在接收机端,SDI/CXP驱动器接收同轴电缆传输过来的高速串行信号,经过重定时消除抖动后,通过线缆驱动模块还原成高速SDI信号进入FPGA/ASIC子系统,完成信号解调、同步、校验和拆帧等常规功能。内建自测(BIST)是用线性反馈移位寄存器(LFSR)产生伪随机码(PRBS)测试误码率的模块。

许多驱动芯片(比如LMH1297、EQC0125X40等^[9])

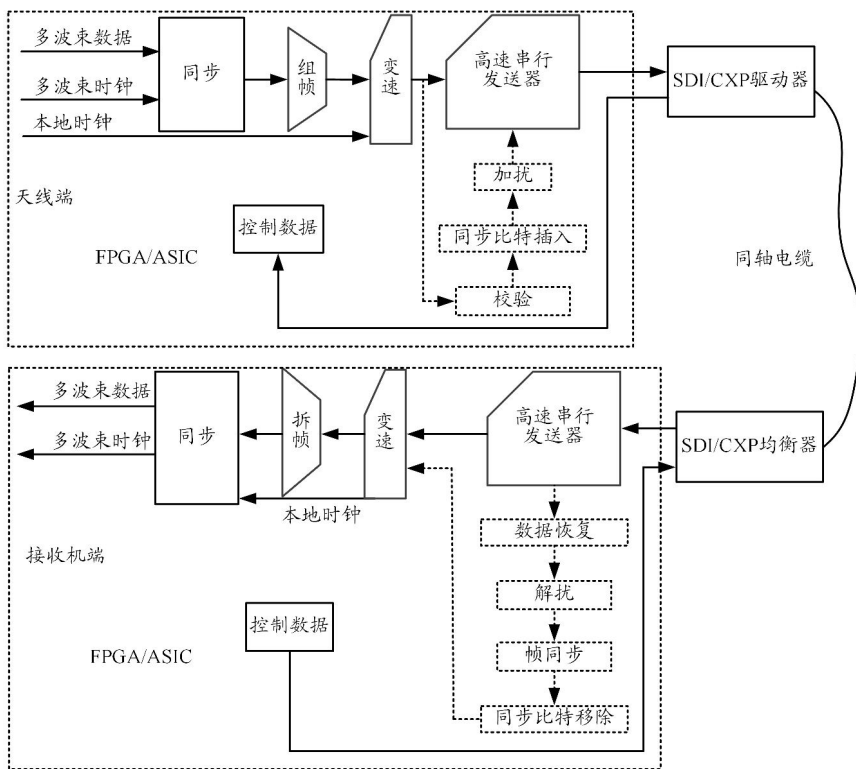


图4 同轴电缆多波束数据传输方案原理图

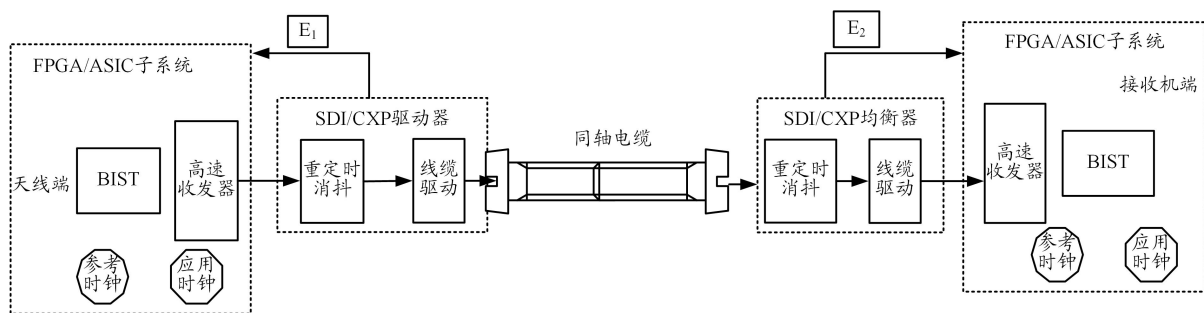


图5 多波束数据传输方案硬件功能模块图

集成了重定时、线缆驱动/均衡和眼图监测(如图5中 E_1 和 E_2 位置分别监测发送和接收眼图)功能,有助于提升传输方案的设计效率,但硬件上需要按照超高速信号规范进行约束,如印制电路板(PCB)要按照射频信号进行布局布线,连接驱动器的同轴电缆需按 $75\ \Omega$ 特性阻抗进行选型等。

2.2 软硬件协同设计

多波束数据传输过程中的发送操作、SDI信号的驱动和提取、时钟恢复、多路同步、波束数据速率变速调整与高速收发器的跨时钟域等都是成熟技术,可调用现有的软件模块,实现难度低,因此本方案的难点在于实现超高速信号收发的长期稳定性。这需要软硬件协同配合,通过监控信道的眼图特性和测试误码率来解决。软件在实现多波束数据输出传输功能的同时实现在线测试功能。

眼图整体反应了传输信道的优劣和信号质量高低,可以通过示波器或软件监测。若通过软件监测可以省略昂贵的高速示波器,操作更灵活方便。本文采用Xilinx公司提供的IBERT模块监测传输环节各个位置的眼图特性,监测示意图如图6所示,监测的位置为 E_5 和 E_6 。

IBERT用PRBS作为激励信号进行误码率测试,只能自回环测试,或者要求双向通信,对于单向传输的应用则需要专门设计测试软件。误码率测试软件流程如图7所示。

测试软件分天线端和接收机端,测试原理是收发双方采用同一个反馈多项式的LFSR而且初始化值相同,这样收发双方产生的PRBS集合内容一样,通过对比接收和发送PRBS的值就能进行误码率统计。其中,天线端的测试软件进入测试模式后就循环发送PRBS;在接收机端,首先完成同步,即接收和缓存发送端的PRBS,同时产生本地的PRBS,然后将发送端的PRBS值动态加载到本地PRBS发生器中;实现收发同步后即可将本地产生的PRBS和接收到的PRBS进行

对比,如果连续5次对比均相同,则进行误码统计;否则移动本地PRBS的位置,重复上述过程。

3 仿真测试和验证

本文在某接收机端上建立多波束传输环境进行测试验证。仿真软件采用Vivado Simulator,测试速率为12 Gb/s,同轴电缆长40 m,误码率测试采用图5配

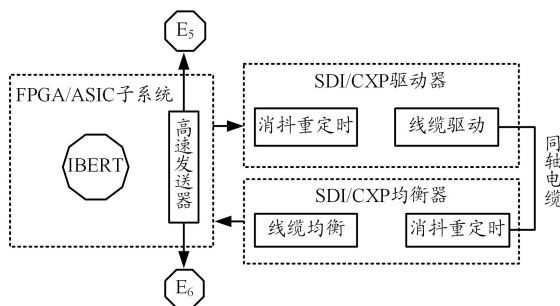


图6 IBERT监测眼图特性示意图

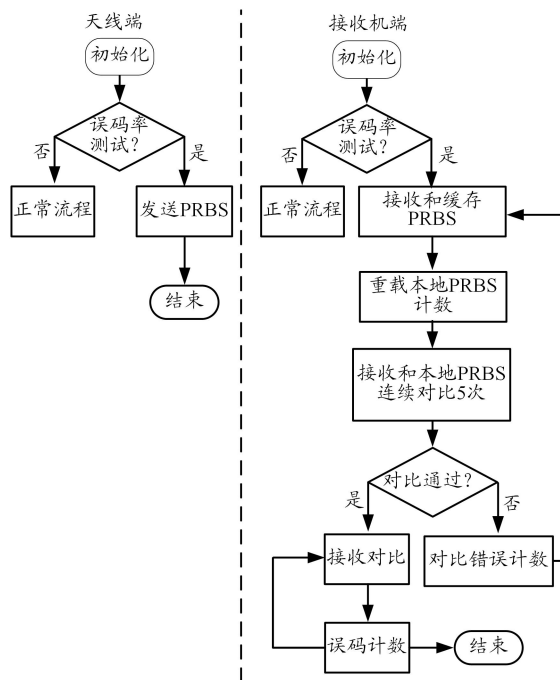


图7 单向通信误码率测试流程图

置,以 PRBS 31-bit 作为样式,利用 IBERT 工具监测 FPGA 内部的 E_5 和 E_6 位置眼图,以及读取芯片的 E_1 和 E_2 位置眼图,监测到的眼图如图 8 所示。

从图 8 可以看出,眼图张开完整,同时垂直开口很高,表明整个信道的底噪很低;眼图的水平开口很大,表明抖动很小。随后进行 24 h 误码率测试,结果显示误码率为 0,符合高速率数据传输标准的误码

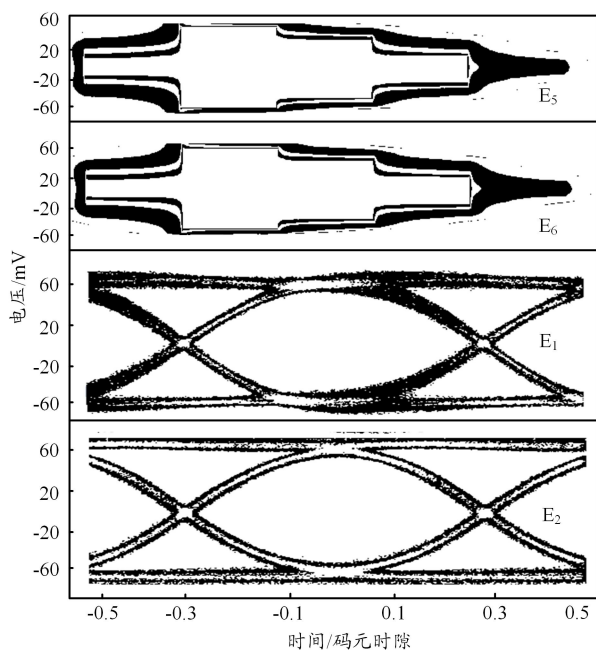


图 8 监测位置的眼图

率($<10^{-12}$)要求,进一步验证了传输信道的信号完整性较好。测试结果表明,本方案可以满足高速实时多波束数据传输的需求,同时留有了较大的扩展空间。

4 结束语

通过研究分离型接收机应用环境中多波束数据传输的需求和对比各种数据传输技术,本文提出一种基于 SDI/CXP 芯片的方案。相比传统方案,该方案大幅减少了硬件、体积和成本,且在性能上和光纤传输方案相当,具有很大的扩展空间。测试结果表明,本文方案在分离型接收机领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 章坚武,李杰,何赛灵. 卫星多波束天线对干扰源的抗干扰性能分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2005,39(4):483-486.
- [6] Analog Devices Inc. Integrated, quad RF transceiver with observation path ADRV9026 [EB/OL]. [2022-04-15]. <http://www.analog.com>.
- [7] Texas Instruments Incorporated. 在数字预失真系统中使用 AFE77xx [EB/OL]. [2022-04-15]. <http://www.ti.com>.
- [8] Maxim Integrated Products Inc. MAX9276A [EB/OL]. [2022-04-15]. <http://www.maximintegrated.com>.
- [9] Xilinx, Inc. 采用 Xilinx7 系列技术的高性能机器视觉系统 WP453 (1.0 版) [EB/OL]. [2022-04-15]. <http://www.xilinx.com>.
- [10] Microchip Technology Inc. EQCO125X40 Family [EB/OL]. [2022-04-15]. <http://www.microchip.com>.