

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106311

一种基于 SerDes 总线的机载雷达波控系统的设计

胥志毅 徐弘毅 邬天恺 郭敏敏

(南京电子技术研究所 南京 210039)

摘要:波控系统是相控阵雷达天线的一个重要的子系统。相控阵天线的波束合成、捷变以及赋形功能都需要由波控系统调度控制完成。传统波控系统由波控分机与波控单元的独立分级和模块组成,不能满足机载雷达空间尺寸小、速率要求高以及线缆布局轻量化的要求。本文设计并实现了一种基于 Serializer/Deserializer (SerDes) 总线的波控系统,通过将各模块集成在天线阵面的内部的方式,减小了对体积与重量需求,在模块间使用 SerDes 总线作为数据传输链路,传输速率达到 2 Gbit/s 的同时大大简化了芯线的连接。对系统/模块的设计、定时同步技术、高速链路设计方法与进行了阐述,最终的天线阵面性能测试结果验证了该系统的可实现性。

关键词:波控系统;相控阵雷达;SerDes;高速链路;定时同步

中图分类号: TB22 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 510.2025

Design of a beam steering system based on SerDes of airborne phased array radar

Xu Zhiyi Xu Hongyi Wu Tiankai Guo Minmin

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

Abstract: The beam steering system is an important subsystem for phased array antennas. The functions of phased array antennas such as beam steering, agility and shaping are accomplished by beam steering system. In traditional way, beam steering system are composed by beam steering crate and units. In order to achieve a high-integrated, high-speed and simplify cable layout system suiting airborne phased array radar, a beam steering system based on Serializer/Deserializer (SerDes) is presented on this article. The modules of system are integrated in antenna to reduce the weight and volume using 2 Gbit/s SerDes as the transmit bus which can simplify the cable connection. The design of system and modules, timing synchronization and high-speed data link are analyzed. The typical performance of the antenna is tested, which validates the design idea.

Keywords: beam-steering system; phased array radar; SerDes; high-speed data link; timing synchronization

0 引言

文献[1]中指出最新的有源相控阵机载雷达相较传统机载雷达,有源通道数量急剧增加(通常为 1 000~2 000,甚至更多),同时文献[2]中提到,目前的相控阵雷达具有多任务、多功能、波束捷变等特点,这就需要波控系统具备高速运算与大量数据传输的能力。

传统的机载波控系统多数采取集中式控制的方式^[3-4],通过一个独立的波控机箱完成波控码的计算,并将控制信号通过低频电缆分发到各个有源通道,速率往往只有 5~10 Mbit/s,因此在传统波控系统在实现时往往存在空间需求大,线缆布局困难等缺陷。

本文介绍了一种基于 SerDes 总线的波控系统,采用分

布式的架构,将模块集成到天线阵面内部,在模块间使用 SerDes 进行高速信号传输,速率可达 2 Gbit/s,相较于传统离散线缆,芯线数量也大大减少,优化了天线阵面的布局与走线。

通过对应用该系统方案的天线方向图进行测试,证明了该方法的可行性。

1 系统设计实现

1.1 波控系统架构设计

波控系统的主要任务是在满足雷达的环控条件下,根据雷达控制的指令完成对天线阵面波束合成的实时控制。

本文提出的波控方案采用分布式传输^[5-6]的方法将波控系统的功能分配到多个波控部件上,并且将波控部件集

成到天线阵面的其他模块内,各部件间采用 SerDes 总线传输波控码,单通道速率可达 2 Gbit/s,在满足分布式控制大量数据传输要求的同时,还具有更快速的波束捷变能力以及更简洁的波控布线等优点,而且并未增加系统的波束转换时间。另外因为不在需要独立的机箱,波控系统对环控条件要求也随之降低。

如图 1 所示,波控系统分为 3 个部分:波控模块、信号传输模块、组件控制芯片。波控模块作为核心模块,完成雷达控制输入指令的接收解析以及波控码计算的功能;信号传输模块实现阵面有源通道的电源、控制、射频的驱动与分发,将波控模块输出的波控码分发到每一个 TR 组件内;组件控制芯片的主要作用是接收串行波控码,在外部定时的触发下输出实时控制信号,完成对 TR 组件幅度、相位以及收发状态的控制。

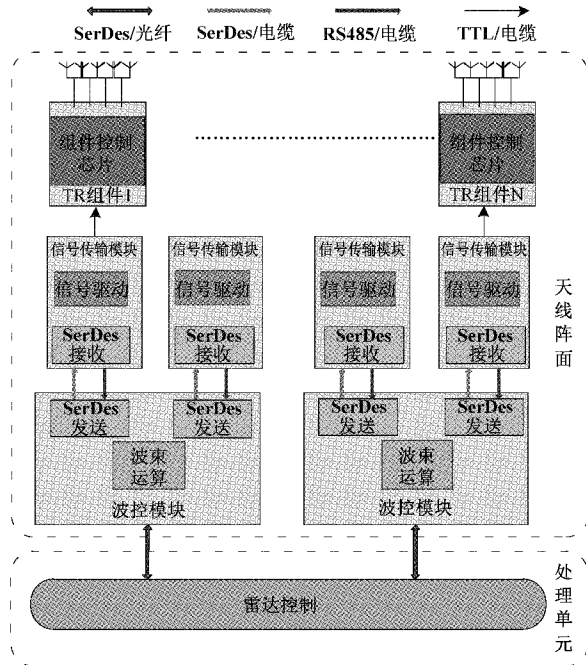


图 1 波控系统功能图

1.2 波控系统模块设计

1) 波控模块设计

波控模块接收处理单元送来的光信号,经过数据解析与计算后,得到波控码,将波控码与定时信号打包经过 SerDes 发送芯片转换为高速串行信号输出。除波控码以外,波控模块还输出系统的基准时钟给信号传输模块作为参考时钟,以达到综合层之间同步的目的。信号传输模块输出的电源信号作为波控模块的工作电源输入,波控模块变换后输出一组电压经过信号传输模块供给 TR 组件使用,同时还通过 RS485 接口接收信号传输模块收集的 BIT 信息。其功能组成如图 2 所示。结构安装图如图 3 所示。

由此,波控模块对外接口简化,与处理单元间通过一根光纤连接,与信号传输模块之间仅需要一根 8 芯的高速电

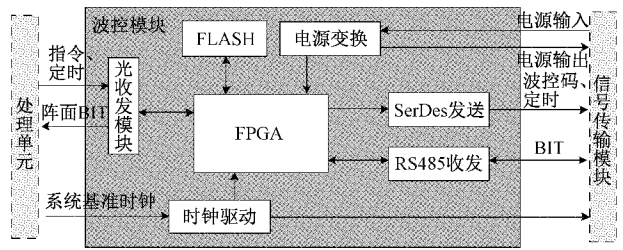


图 2 波控模块功能图

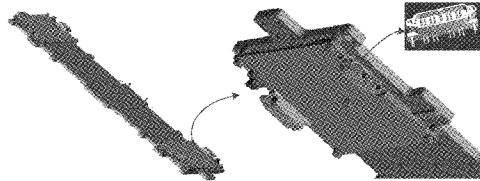


图 3 波控模块安装图

缆传输高速串行、RS485 BIT 信号即可^[7]。

波控模块实物如图 4 所示。

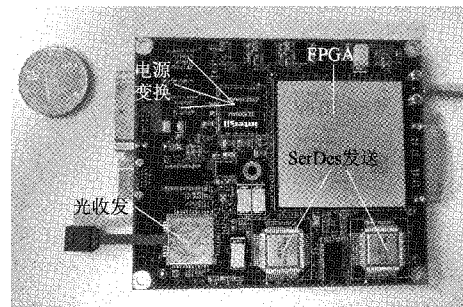


图 4 波控模块实物

2) 信号传输模块设计

信号传输模块接收波控模块输出的 SerDes 信号,解析后将波控码与定时发送到 TR 组件与子阵延时。同时,信号传输模块还可以接收 TR 组件与子阵延时输出的 BIT 信息,经过处理后按照约定协议通过 RS485 接口发送给波控模块。其功能组成如图 5 所示。

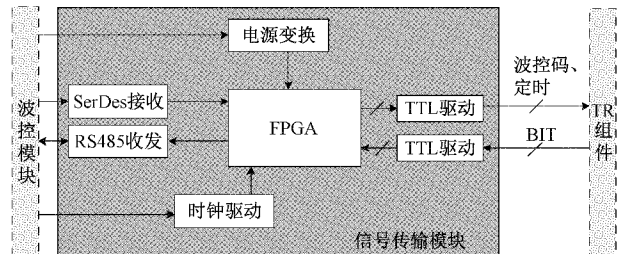


图 5 信号传输模块功能图

信号传输模块实物如图 6 所示。

在 BIT 信息传输方案上选择 RS485 而不是 SerDes 是因为使用 RS485 接口有如下优点^[8]。

(1)当波控系统出现故障时,测试人员可以外接调试计算机,通过向波控系统的任一模块发送串口命令,根据测试

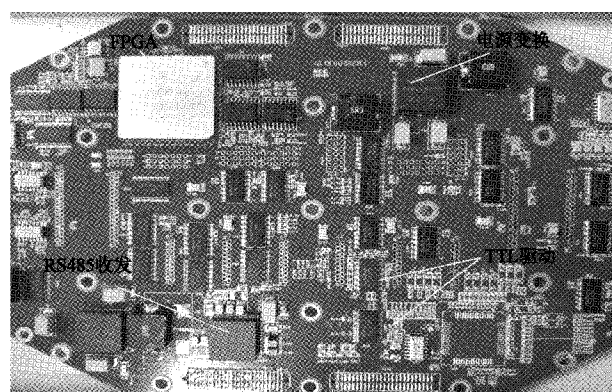


图 6 信号传输模块实物

结果准确地定位到故障点。

(2)当 SerDes 链路出现故障,波控系统仍然可以通过 RS485 接口完成波控的基本功能,确保雷达的常规工作不受影响。

3) 组件控制芯片设计

组件控制芯片是定制 ASIC,与射频芯片集成在 TR 组件内^[9-10],组件控制芯片的主要功能为接收外部输入控制码,在定时信号的触发下实现对有源射频通道幅度、相位、接收/发射的控制。一片控制芯片可完成一个 TR 组件内所有射频通道的控制。其功能组成如图 7 所示。

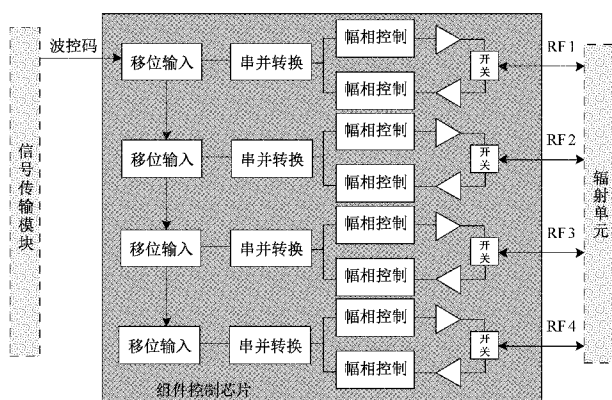


图 7 组件控制芯片功能图

组件控制芯片如图 8 所示。

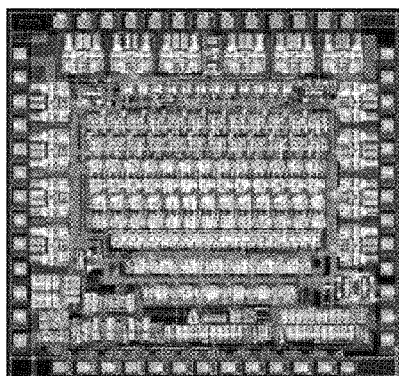


图 8 组件控制芯片

组件控制芯片与外部采用 SPI 的接口协议,接口时序如图 9 所示。

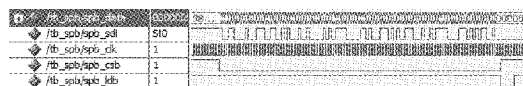


图 9 组件控制芯片接口时序

2 系统关键技术

2.1 SerDes 链路设计

由上文可知,在雷达内部,波控系统使用传输 SerDes 协议的光缆实现天线阵面与处理单元的数据交互,而在天线阵面内部,波控系统使用传输 SerDes 协议的电缆实现波控模块到信号传输模块的数据传输。

本系统中 SerDes 总线的传输速率为 2 Gbit/s,光缆链路因在单元之间传输,可以获得较好的传输性能。但是,电缆链路在波控系统内部传输,高速差分信号经过 PCB、接插件、高速电缆、接插件、PCB 的传输,传输链路组成如图 10 所示,设计如图 11 所示。

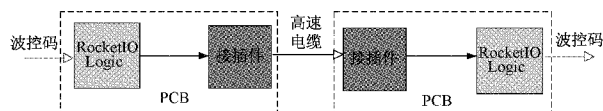


图 10 SerDes 信号传输链路组成



图 11 SerDes 信号传输链路设计

为了获得更好的信号完整性,在设计时需要注意如下几点。

1)对 PCB 板的层叠结构,包括每层的材料、厚度、线宽、线间距、阻抗信息和介电常数等进行控制。

2)接插件选用基于高速性能优化的非等间距排列方式,差分对密度高达 14 对/英寸,同时采用绞线式弹性插针及刚性插孔,对接可靠性好,抗振动冲击能力强,克服了机载环境恶劣,空间小的不良条件。

3)高速电缆使用高屏蔽四绞线,具有良好的屏蔽效果。设计如图 12 所示。

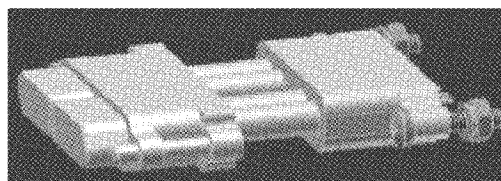


图 12 高速电缆设计

设计完成后,再通过对传输链路信号仿真结果的分析,调整设计,以达到最优的链路传输性能。链路仿真真图结

果如图 13 所示;实测结果如图 14 所示。可以看出实测结果与仿真结果基本吻合,说明仿真对设计起到了指导性的作用。

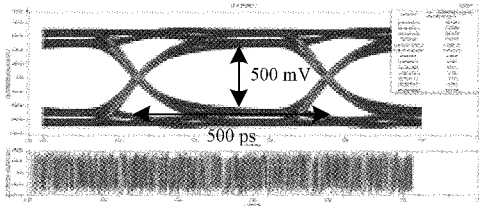


图 13 SerDes 信号链路仿真眼图

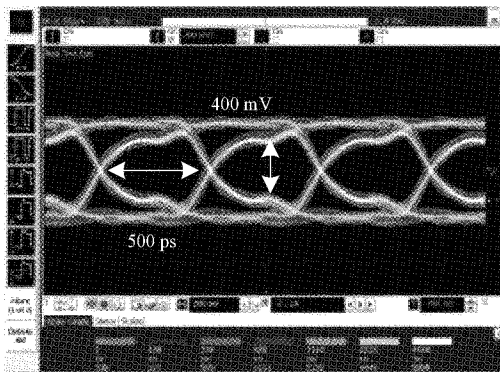


图 14 SerDes 信号链路实测眼图

基于 SerDes 总线的高速串行传输系统的设计大大降低了天线阵面数据传输的互联复杂程度,同时保证了数据传输的实时性和准确性。

2.2 定时同步设计

定时信号采用基于 SerDes 技术的高速串行传输技术实现,处理单元产生定时信号通过光纤传输至波控模块,波控模块将定时信号通过高速电缆传输至阵面各 T/R 组件。定时信号的精度直接影响阵面发射与接收波束的性能。光定时的抖动性主要来自于定时信号在不同时钟域之间的多次传递,这些时钟不存在相参性,造成定时信号的绝对传输

时间的不确定,对大规模阵面控制中的高精度定时与同步带来了很大地挑战。高精度定时同步的解决主要通过克服这种收发时钟的不确定性来实现。其基本原理是采用相位控制技术,在定时数据发送端采用发射相位控制模块,根据参考时钟,鉴别发送时钟相位,并反馈 SerDes 发送端,使得发送时钟最终稳定在所预设的相位上。同理,在定时数据接收端,接收相位控制模块根据参考时钟,鉴别接收时钟相位,并反馈 SerDes 接收端,使得接收时钟最终稳定在设计相位上。采用这种方法能够很好地克服收发时钟的不确定性,进而实现高精度的定时信号传输与同步。其原理如图 15 所示^[11]。

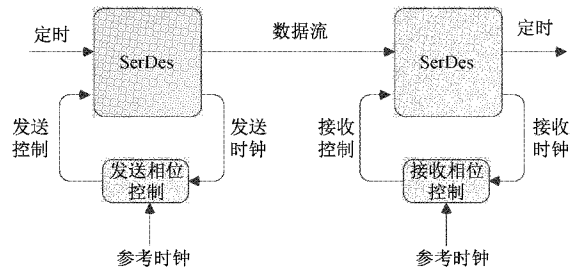


图 15 高精度定时同步原理

2.3 系统工作方式实现

雷达系统在工作时根据任务需求需要完成扫描、跟踪、电子对抗等功能,在不同的工作模式下对波控系统也提出了不同的要求。总体来说,波控系统主要包括两种工作方式^[12-13]。

一种为常规工作模式,按照帧周期进行波束控制。如图 16 所示,在帧起始时刻,处理单元向波控模块发送雷控指令表,波控模块解析出波控指令后进行波束计算,然后将计算得到的波控码通过 SerDes 协议发送到数据传输模块,数据传输模块对波控码解析重排后,输出组件控制芯片所需的控制时序,完成对天线阵面的控制^[14]。在该帧中,波束不再变化,每个收发脉冲按照固定的波位进行工作。

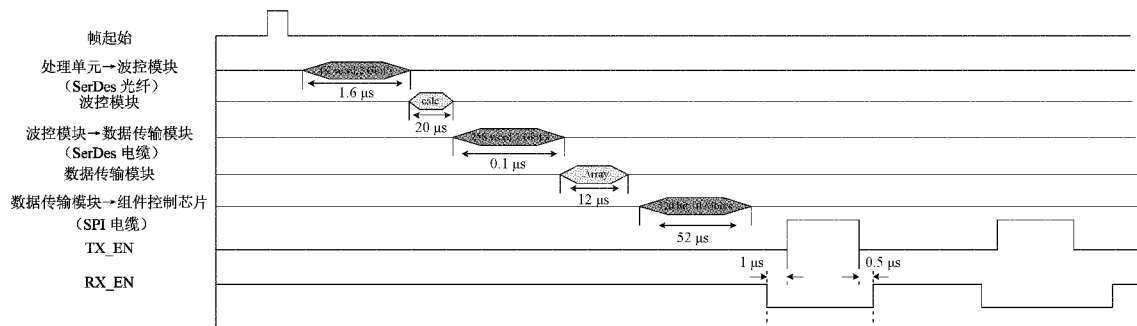


图 16 常规工作模式时序

另一种为脉间捷变工作模式,波控系统按照脉冲周期对天线阵面进行波束控制^[15]。与常规工作模式类似,在帧起始发送雷控指令表,此时雷控表中包含若干个波位,波控系统分别将不同波位写入到不同的波位寄

存器中,在每个脉冲的起始时刻波控系统通过短指令(1 μs 左右)选择不同波位输出,实现天线阵面的脉间捷变功能。工作时序如图 17 所示,波位存储器控制如图 18 所示。

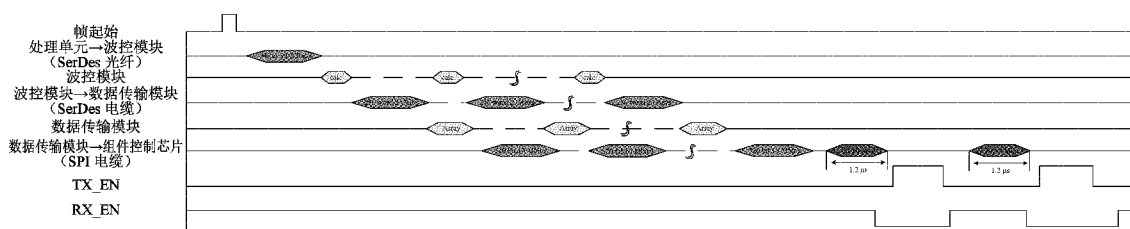


图 17 脉间捷变工作模式时序

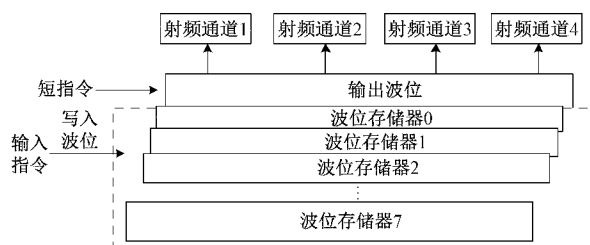


图 18 波位存储器控制

3 系统验证

为了便于分析,任意构建一个圆形轮廓的天线阵面如图 19 所示,阵元规模为 920 个,三角形栅格排布,组件为条式组件垂直放置,全阵阵元共划分为 16 个子阵。

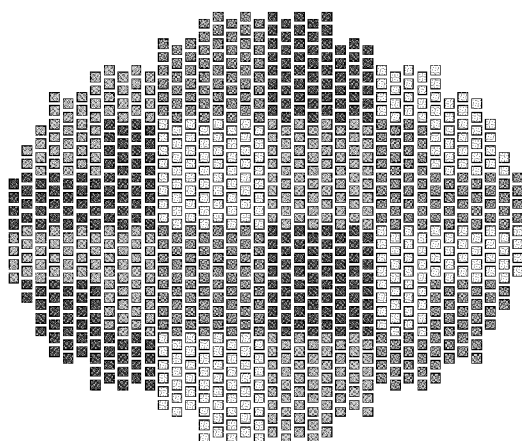


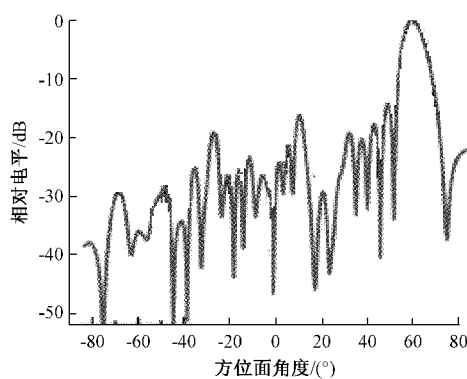
图 19 实验天线阵元分布

选定频点与角度后,通过仿真可计算天线阵面在工作频段内的方向图典型参数。

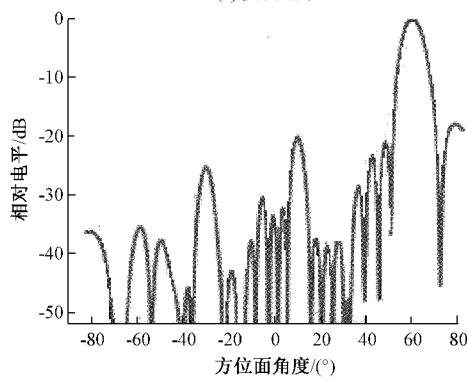
将上文系统在课题设计中验证,天线的阵元分布与仿真模型基本一致,选取相同频点与扫描角后可测试得到实际方向图,将实测结果与仿真结果进行对比,若方向图性能一致,则可验证波控系统对天线阵面起到了准确控制的作用。

通过实际测试结果可以发现,考虑到天线阵面的装配、测试、标校等流程中不可避免的代入其他随机误差,使得测试和仿真存在一些差异,但通过一定的设计要求和校准流程可以将这些误差降到工程上可接受的范围内。在

方位面扫描 60° 时,在 F0 的测试方向图切面如图 20(a) 所示,可以看到和图 20(b) 相比,曲线和仿真结果基本类似,设计和测试的符合性良好。



(a) 实测结果



(b) 仿真结果

图 20 方位面 60° 扫描方向图

其他频点仿真方向图结果如表 1 所示,测试方向图结果如表 2 所示。通过对表 1 与表 2 其他频点天线性能的仿真与测试对比,可以发现,在方向图性能上基本一致,验证了波控系统在全频段内都达到了预期效果。

表 1 方位面 60° 扫描仿真

频率	方向性系数/dB	方位指向误差	方位最大副瓣/dB
F0-1.5	29.55	0.24°/2.83%	-17.94
F0-0.5	30.43	0.12°/1.58%	-18.43
F0	31.21	0.03°/0.42%	-18.69

表2 方位面60°扫描实测

频率	方向性系数/dB	方位指向误差	方位最大副瓣/dB
F0-1.5	28.99	0.47°/5.61%	-14.31
F0-0.5	30.24	0.21°/2.80%	-14.05
F0	30.66	0.06°/0.85%	-14.84

4 结 论

波控系统在阵面轻薄化、多功能用途的发展趋势下倾向于采用集中式运算,分布式传输的设计方案。在此基础上,本文采用 SerDes 总线实现分布式模块间的数据传输问题,既可以实现波束捷变的任务,也可以简化阵面走线,满足系统的结构、重量、冷却要求。该套波控系统可按照雷达系统的工作时序要求产生相应的控制时序,实现了雷达扫描、跟踪、电子对抗等功能。

参考文献

- [1] SUN X, LU B Y, JIN T, et al. Antenna planes based wall-clutter mitigation in through-wall-imaging applications[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(10): 2638-2646.
- [2] WEN F Q, ZHANG X Y, ZHANG Z J. CRBs for direction-of-departure and direction-of-arrival estimation in colocated MIMO radar in the presence of unknown spatially coloured noise [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019, 13(4): 530-537.
- [3] LIU T T, WEN F Q, ZHANG L, et al. Off-grid DOA estimation for colocated MIMO radar via reduced-complexity sparse Bayesian learning [J]. IEEE Access, 2019, 7: 99907-99916.
- [4] WEN F, MAO C, ZHANG G. Direction finding in MIMO radar with large antenna arrays and nonorthogonal waveforms[J]. Digital Signal Process, 2019, DOI:10.1016/j.dsp.2019.06.008.
- [5] YI J, WAN X, LEUNG H, et al. Joint placement of transmitters and receivers for distributed MIMO radars[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(1): 122-134.
- [6] CHEN P, QI C, WU L. Antenna placement optimisation for compressed sensing-based distributed MIMO radar[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2016, 11(2): 285-293.
- [7] CHENG Z, HAN C, LIAO B, et al. Communication-aware waveform design for MIMO radar with good transmit beampattern [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(21): 5549-5562.
- [8] QIAN J, LOPS M, ZHENG L, et al. Joint system design for coexistence of MIMO radar and MIMO communication [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(13): 3504-3519.
- [9] DI CARLO FELICE A, DE PAULIS F, FINA A, et al. Compact and reliable T/R module prototype for advanced space active electronically steerable antenna in 3-D LTCC technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2018, 66(6): 2746-2756.
- [10] ZHAO Y ZH, WANG SH D. A novel 3D T/R module with MEMS technology [C]. IEEE International Conference on Integrated Circuits and Microsystems, Chengdu, 2017: 286-289.
- [11] 李明. 雷达光互连技术研究[J]. 现代雷达, 2013, 35(12): 7-13.
- [12] HASSANIEN A, AMIN M G, ZHANG Y D, et al. Signaling strategies for dual-function radar communications: An overview [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2016, 31(10): 36-45.
- [13] TIAN T, ZHANG T, KONG L. Timeliness constrained task scheduling for multifunction radar network [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(2): 525-534.
- [14] YUAN X L, GAN L. Robust adaptive beamforming via a novel subspace method for interference covariance matrix reconstruction [J]. Signal Processing, 2017, 63(7): 1643-1650.
- [15] BARBARESCO F, CHEVALIER P. Noncircularity exploitation in signal processing overview and application to radar [C]. IET Waveform Diversity and Digital Radar Conference, London, UK, 2008: 1-6.

作者简介

胥志毅,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为有源相控阵天线阵面、阵面控制与BIT系统等。

E-mail: homyee@163.com