

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2021.01.006

一种新体制的高频地波雷达设计与实现

杨 刽, 吴雄斌, 张 兰

(武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430072)

摘要: 传统高频地波雷达接收机与天线阵列由长电缆连接, 存在成本高、架设难、不易维护等问题。本文提出了一种新体制的高频地波雷达系统, 该系统将多通道接收机分为多个装配在接收机天线附近的独立的单通道接收单元, 接收单元与天线之间采用短电缆连接模式, 各个接收单元之间通过 GPS/北斗进行时钟同步, 通过无线方式进行参数配置和数据传输。在完成单通道接收单元设计与实现后, 通过闭环实验和海边现场实验对整个新系统进行了检测, 得到了稳定的海洋回波, 证明了新体制雷达系统的可行性。

关键词: 地波雷达; 无线传输; 新体制; 单通道接收单元

中图分类号: TN958. 93 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2021)01-0035-05

Design and Implementation of a New HF Ground Wave Radar

YANG Zhao, WU Xiongbin, ZHANG Lan

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The receiver of the traditional high frequency (HF) surface wave radar (SWR) was usually connected with the receiving array by long cables, which may increase the cost and difficulty of the installation and maintenance for the radar system. A novel HF SWR system is introduced in this paper. The receiving module of this system composes of several independent single-channel receiving units mounted near the receiving antennas, and a short cable connection mode is used between the receiving unit and the antenna. The clock synchronization between each receiving unit is realized through GPS/BDS, and parameter configuration and data transition for the radar system are achieved through wireless transmission. The new radar system has been checked through the closed-loop experiments and field experiments and has received stable sea echoes, which demonstrates the feasibility of the proposed radar system.

Key words: ground wave radar; wireless transmission; new system; single channel receiving unit

0 引言

高频地波雷达可以实现对视距外海洋状态和海上目标的大范围、高精度和全天候的实时监测^[1], 因此, 高频地波雷达在海洋监测和国防等领域具有独特的应用前景和优势, 成为了立体化海洋信息监测的重要工具之一。

现有的高频地波雷达系统根据天线布置的不同, 常被分为紧凑型和阵列型。紧凑型高频地波雷达具有代表性的是 CODAR 公司开发的 SeaSonde 系统^[2], 该系统利用便携式小型化的接收天线, 可以灵活地部署在复杂的地形中。阵列

型雷达系统比较有代表性的有德国的 WERA^[3]雷达系统和国内武汉大学的 OSMAR 系列雷达^[4]等。与紧凑型雷达相比, 阵列型高频地波雷达可以获得更高的方位角分辨率, 能够更好地进行复杂海况监测和目标检测等, 但是其接收阵列往往较大, 尤其是在对探测目标方位分辨率要求比较高的应用场合, 连接天线和接收机之间的电缆有时需要数百米长。这会产生两个问题: 第一, 长电缆使雷达变得非常“沉重”且架设困难, 从而造成雷达站选址难, 雷达部署所需时间长、维护成本很高, 非常不利于雷达的应用与推广。第二, 过长的电缆可能会导致回波信号的衰减, 降低了接收信号的信噪比, 从而缩小雷达的最大探测距离。因

此,改变阵列式雷达的应用难题,研究一种新体制的系统使阵列式雷达变得轻便、灵活,使其能够更好地适应环境需求,具有重要的意义和价值。

虽然地波雷达在去电缆方面的研究较少,但是在其他领域有过相关研究,如机载雷达中把接收前端从接收系统物理位置中分离出来直接与馈线连接,大大缩短 X 波段馈线波导长度,从而减小馈线系统损耗^[5];在互联汽车领域,也存在很长的射频同轴电缆可能导致噪声系数和信号损耗增大的问题,设计者通过使得射频前端放置得更靠近天线,减少电缆长度,从而减少电缆带来的插入损耗,提高系统信噪比^[6]。对于数据传输问题,各类无线通信技术近年在雷达系统中得到应用,基于 WiFi 的数据传输系统在多线激光雷达系统的应用^[7],考虑使用无线网桥来实现无线传输^[8],用来解决去掉长电缆之后带来的数据传输的问题。

本文提出了一种新体制的高频地波雷达系统,该系统将多通道接收机分为多个装配在接收机天线附近的独立的单通道接收单元,该系统可以突破电缆的束缚,系统轻便灵活,方便在复杂环境下的应用和推广。

1 新体制雷达设计思路和整体方案

传统的高频地波雷达系统通常由收发天线、多通道接收机、发射机、上位机和电缆等部分组成^[9]。发射端,由多通道接收机产生发射信号,经发射机进行功率放大后通过电缆传送到天线辐射出去;接收端,海面/目标等的回波信号经天线进入接收通道,首先经过接收电缆进入多通道接收机的射频前端,经放大、滤波和解调等一系列处理后的基带信号传送至上位机进行后续的反演。

传统的高频地波雷达系统示意图如图 1(a)所示,多通道接收机、发射机和上位机往往位于雷达站的室内或者专用的设备仓内,收发天线架设在海边,便于检测海洋目标和海洋状态,天线和接收机、发射机之间用电缆连接。而对于高精度相控阵高频雷达,例如 WERA 雷达系统,天线阵列庞大,所需的电缆数量较多,长度较长,虽然 MIMO 技术的应用可以在保持天线口径的前提下减少天线的数量^[10],但仍无法避免长电缆的使用。

为了满足快速部署和灵活移动雷达的要求,

需要对传统雷达结构需要进行一定程度的改进。因此,本文提出一种新体制的高频地波雷达系统,如图 1(b)所示。该系统将多通道接收机分为多个装配在接收机天线附近的独立的单通道接收单元,将收发天线、单通道接收单元和发射机组成一个独立收发单元,根据所设计的天线阵型来确定收发单元的数量和配置方式,雷达参数配置和数据传输均以无线传输的方式进行。这样可以让接收机射频前端尽可能地接近天线,大大缩短发射和接收电缆的长度。

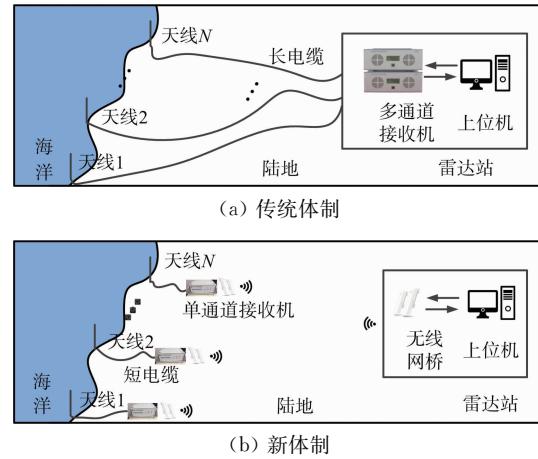


图 1 雷达探测结构对比图

与之前的探测结构相比较,新体制高频地波雷达需要解决两个主要问题:第一,同步问题,即每个独立收发单元之间需要统一的时钟标准的问题;第二,数据传输问题去掉电缆之后,单通道接收单元和上位机相隔较远,如何实现有效的数据传输。为此,对原接收机进行升级改造,各收发单元之间使用 GPS/北斗时钟同步模块进行时间和时钟的同步,数据通过无线网桥进行无线传输。

2 单通道接收单元各模块设计与实现

在新体制下,原来的多通道接收机被分离成一个个独立的单通道收发单元,通过它们的组阵、组网完成探测,因此其性能将直接影响系统最终的探测性能。单通道收发单元整体设计框图如图 2 所示。

每个收发单元系统由接收模块、发射模块、收发天线、时钟同步模块和数据传输模块等组成,其中接收模块对回波信号进行处理,发射模块产生

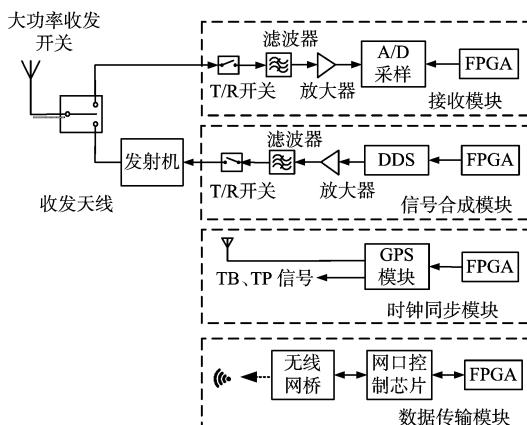


图2 单通道收发单元整体设计框图

雷达发射波形,天线采用收发共用天线,通过收发开关实现信号分时发射和接收,时钟同步模块确保各个收发单元时钟同步,数据传输模块完成收发单元和上位机之间雷达参数配置和采样数据传输等。

2.1 接收模块设计

接收模块的功能对接收到的雷达回波信号进行滤波、放大和采样。如图3所示,接收天线接收到雷达回波信号,经过由脉冲控制的收发开关 SA630,具有 60 dB 的隔离度,使用带通滤波器进行滤波,再由低噪声放大器 GALI-52 进行固定增益放大再经带通滤波器后由 AD8331 程控放大器调整信号幅度,送入 ADS5562 采样芯片进行采样,采样芯片最高采样速率为 80 MHz,有效位数是 16 bit,在 3 MHz 输入时无杂散动态范围为 85 dBc,能够很好地实现接收模块采样。

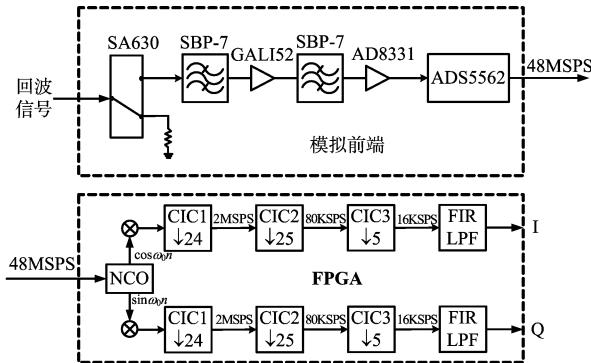


图3 接收模块具体实现框图

采样后的数字信号在 FPGA 中进行数字下变频(Digital Down Converter, DDC)处理。通过数字混频实现去载去斜,然后通过滤波抽取得到满足信号处理实时性要求的低速数字信号^[1],滤波

器调用 FPGA 内部的 IP core 实现,三级 CIC 滤波器级联实现 3 000 倍抽取,经过 DDC 之后得到 I、Q 两路正交信号,之后通过两次 FFT 得到多普勒谱结果。

2.2 发射信号合成模块设计

发射信号合成模块的功能是根据上位机软件设置的雷达波形参数,产生雷达发射所需的波形。图4 为发射通道的结构框图,上位机通过软件可以设置接收机的工作模式和频率,设置的参数通过无线传输到 FPGA,FPGA 控制 DDS 芯片 AD9910 产生所设置频率的波形,之后经过两级滤波和一级放大,经过收发开关控制,成为发射信号。

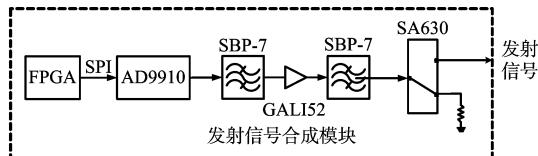


图4 发射信号合成模块框图

发射波形为线性调频中断连续波(Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave, FMICW),可以进行上扫频或下扫频。DDS 芯片选用 AD9910,14 bit、1 GSPS 的直接数字频率合成器产生需要的波形,通过 SPI 总线可以由 FPGA 直接对芯片进行配置,数字斜坡调制模式配置简单,斜坡采用数字化生成,输出分辨率为 32 bit,可以对频率、相位或振幅进行编程,同时可以控制上扫频或是下扫频波形的产生,斜坡的上下限值、频率步长和步进速率都可以单独控制,这使得雷达信号的产生更加快捷灵活。

2.3 时钟同步模块设计

GPS 同步模块。时钟同步模块接收 GPS/北斗卫星信号,提供高精度的 10 MHz 同步时钟以及高精度的秒脉冲信号,作为每个收发单元的外同步源,为每个收发单元提供稳定的时钟参考,保证各个收发单元之间的时钟和时间同步。在该模式下,系统通过 GPS 时间信息同步各个接收单元的时间,利用 GPS 秒脉冲和恒温晶振生成同步脉冲信号和同步时钟,一方面,基于同步时钟和秒脉冲信号产生控制各个接收单元收发的发射脉冲 TP,接收脉冲 TB,确保在收发共置的工作模式下各个收发模块均可以正常工作,确保多台雷达之间不

会由于发射接收不同时而导致设备损坏;另一方面,通过每秒同步来保证发射波形相位之间的一致性。

时钟同步模块的时频同步精度对系统性能有较大的影响,时频不完全同步会造成多普勒谱展宽和收发单元间的通道不一致。因此,每个收发单元均选用同一款高精度时钟同步模块,采用 GPS/北斗频率测控技术,授时精度 $<30\text{ ns}$,10 MHz 频率输出日平均稳定度 $<1\times10^{-12}$,实时准确度可达 5×10^{-10} 。

图 5 是锁定状态下两个时钟同步模块秒脉冲稳定性数据观测结果,可以看出两个秒脉冲上升沿时差是缓慢变化的,最大变化为 3 min 变化 30 ns,变化率约为每秒 0.17 ns,相对于高频雷达几百 ms 的扫频周期 T_r ,这个量很小,可以忽略不计,即对距离谱没有明显影响。在多普勒域,对于 10 MHz 的载波所带来的相位变化为 0.6°,最大附加多普勒频移为 $1/(1200\pi T_r)$, T_r 为扫频周期,在雷达相干积累周期个数低于 1200π 时,时间同步误差所带来的多普勒频移小于多普勒分辨率,也可以忽略不计。但是同步精度和信号不同源等原因所带来的收发单元间的通道不一致性会对目标的方位估计产生影响,需要后续通过船只 AIS 数据或者应答器作为辅助源进行矫正。

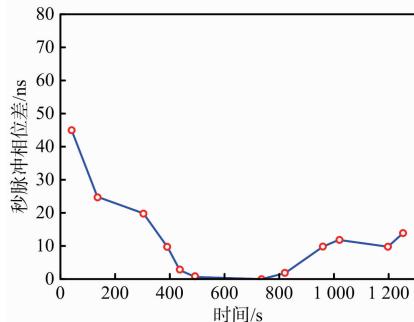


图 5 秒脉冲稳定性测试结果

2.4 数据传输模块设计

数据传输模块实现 FPGA 和上位机之间的无线数据传输,考虑到阵列口径和接收机采样数据率,要求无线传输距离至少要在 100 m 以上,数据率不高于 20 Mbit/s,因此采用基于无线网桥的百兆无线网传输技术。

具体实现方式为 FPGA 芯片通过 GMII 接口和电路板上的 Gigabit PHY 芯片 88E1111 通信,

将数据打包,再由 Gigabit PHY 芯片把数据通过无线传输模块传输给无线网桥,通过无线方式传输给上位机,通信协议采用 UDP(User Datagram Protocol, UDP)通信协议。考虑到阵列式雷达阵列口径,因此无线传输距离至少要在 100 m 以上,该无线网桥提供 20 dBm 的发射功率,可以有效地确保隔离和分集接收,有效传输距离超过 5 km,可以满足系统要求,数据传输模块框图如图 6 所示。



图 6 数据传输模块框图

通信用的无线网桥天线是双极化定向天线,工作频段为 5.8 GHz,总带宽为 900 MHz,不同的无线链路占用不同的信道,无线网桥会对信道进行侦测,动态分配,因此各单元通信之间不会产生干扰。

3 实验结果

3.1 收发单元射频前端性能测试

射频前端的技术指标主要包括通道增益、灵敏度、动态范围^[12]等。

增益测试进行三次以确保结果准确性,得到输出信号功率分别是 -41.5, -41.4 和 -41.5 dBm,取三次平均值,得到输入 7 MHz 信号时射频前端增益为 35 dB。

灵敏度测试使用外部信号源,信号源信号的大小为 -40 dBm,经过 70 dB 衰减器衰减,输入射频前端的信号大小为 -110 dBm,此时为最小输入信号,使用 MATLAB 处理采样后的信号,结果如图 7(a)所示。可以看出,信号为 7 MHz,信号高于底噪 10 dBm,因此模拟前端的灵敏度为 -110 dBm。

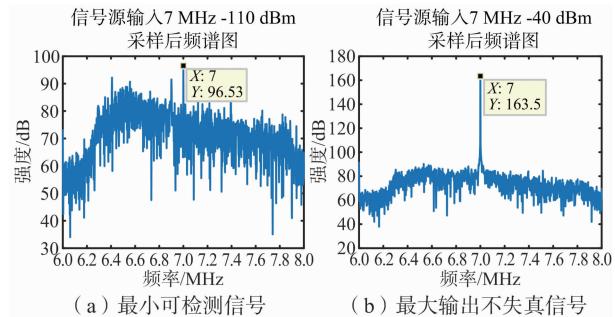


图 7 模拟前端灵敏度动态范围测试

经过测试,射频前端的最大不失真信号为 -40 dBm ,如图7(b)所示,因此射频前端的动态范围为 70 dB 。

3.2 闭环测试结果

在闭环测试中,扫频信号是由发射模块产生并通过衰减器输入到接收模块,该信号设置了时间延迟以模拟 90 km 处的目标回波,根据实际波形来测试系统的最小可检测信号。测试条件为:发射使用 7 MHz 扫频信号,扫频带宽为 30 kHz ,扫频周期设置为 125 ms ,给出闭环距离谱的结果如图8所示。

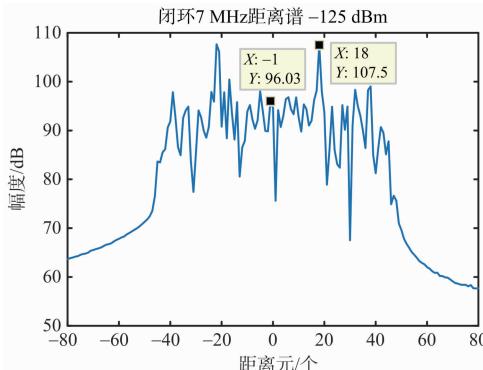


图8 7 MHz扫频信号闭环距离谱

由图8可看出,回波在第18距离元,距离分辨率为 5 km ,和预设目标位置一致。此外,在不计人相干积累增益的前提下,在最低可检测信噪比设为 10 dB 时,接收机工作于 7 MHz 扫频时最小可检测电平为 -125 dBm 。

闭环测试结果表明接收机的各模块均工作正常,可以完成距离和多普勒谱信息的测量,进行相应的现场实验验证。

3.3 现场实验结果

为了验证新体制雷达系统的性能,2019年10月在福建省龙海地波雷达站进行了现场实验。雷达发射 7.5 MHz 的调频扫频中断连续波,扫频周期 125 ms ,扫频带宽 30 kHz ,相位偏置设置 315° ,对应多普勒谱上位置为 -1 Hz ,单通道发射功率为 200 W 左右。

得到的单根天线回波谱图如图9(a)所示,相干积累时间为 5 min ,该回波谱中心位置多普勒频率为 -1 Hz ,与设置相符合,位于中心两边的是一阶海洋回波,雷达可探测到 200 km 处的海洋回

波,在多普勒频率为 -0.9 Hz ,距离为 40 km 的位置可以看到疑似目标信息。

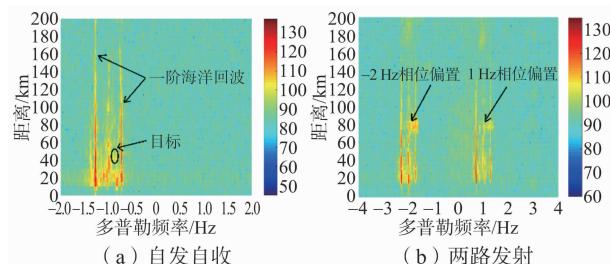


图9 雷达回波多普勒谱

此外,用两个单通道收发单元进行了两路发射两路接收实验,两个单通道设备用GPS进行时频同步,发射功率为 100 W 左右,发射信号进行了相位调制,两路收发单元由GPS同步模块进行时钟和时间的同步,得到的回波谱图如图9(b)所示。左边回波谱中心位置多普勒频率为 -2 Hz ,右边回波谱中心位置多普勒频率为 1 Hz ,与设置相符合,并无明显的偏移和明显多普勒谱展宽。结果表明,通过GPS同步的收发单元可以接收到两路发射的回波信号,多普勒回波谱清晰可区分,该结果也论证了由多个收单元进行组阵和组网探测的可行性。

4 结束语

本文针对传统地波雷达探测中因雷达系统与天线阵列之间的长连接电缆限制而导致的一系列问题,提出了一种新体制的双频高频地波雷达系统。在完成单通道接收单元设计与实现后,通过闭环实验测试了系统的性能,并通过海边现场实验对整个单通道收发单元进行了检测,得到了稳定的海洋回波和目标信息。实验结果表明,在新的体制和设计结构下,单通道收发单元各方面的性能指标达到预期,为进行后续的基于该收发单元的组阵、组网实验奠定了基础。

参考文献:

- [1] 张兰,吴雄斌,岳显昌,等.一种轻便式高频地波雷达系统:201910014207.7[P]. 2019-01-08.
- [2] BARRICK D E, EVANS M W. Implementation of Coastal Current Mapping HF Radar System [R]. Washington, DC: NOAA, 1976.

(下转第47页)