

文章编号: 2095-4980(2021)04-0678-06

基于 FPGA+ARM 的电离层斜向探测系统设计

李江华, 杨国斌*, 张援农, 姜春华, 刘桐辛

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

摘要: 针对传统电离层斜向探测仪结构复杂、探测信道固定、多站同步探测中相干干扰严重问题, 提出一种基于现场可编程门阵列(FPGA)和先进精简指令集处理器(ARM)结构的嵌入式电离层斜向探测系统的探测方法, 并给出系统结构设计。采用完全互补码解决多站同步探测的相干干扰问题, 丰富了探测码制; 利用数字中频接收结构在数字域中进行二次混频, 避免了寄生信号和交调失真, 具有标准化、模块化、扩展性强的特点; 使用灵活的静态存储控制(FSMC)协议解决了控制模块之间高速并行数据传输问题, 实现了数据的自动判读和频率优选。实验结果验证了系统设计的正确性及可靠性, 该系统在空间物理学研究、天波超视距雷达探测、应急抢险救灾等领域有重要应用前景。

关键词: 电离层斜向探测; 嵌入式平台; 完全互补码; 数字中频接收; 静态存储控制(FSMC)通信; 频率优选

中图分类号: TN958

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021024

Design of ionospheric oblique detection system based on FPGA+ARM

LI Jianghua, YANG Guobing*, ZHANG Yuannong, JIANG Chunhua, LIU Tongxin

(School of Electrical and Information, Wuhan University, Wuhan Hubei 430079, China)

Abstract: In view of the disadvantages of the traditional ionospheric oblique sounder like complex structure, the fixed sounding path, and the serious coherent interference among multiple stations, a detection method for the embedded ionospheric oblique sounding system based on the Field Programmable Gate Array(FPGA) and Advanced Reduced Instruction Set Computing Machines(ARM) is proposed, and the design of system structure is put forward. Firstly, the complete complementary code is adopted to solve the problem of coherent interference in simultaneous detection of multiple stations. Secondly, the digital intermediate frequency receiving structure is used for secondary mixing in the digital domain, avoiding spurious signals and intermodulation distortion, bearing the characteristics of standardization, modularization and good expansibility. The Flexible Static Memory Controller(FSMC) protocol provides a high-speed parallel data transmission method between control modules. Finally, the data automatic judgment and optimal frequency selection are realized. The experimental results verify the correctness and reliability of the design. It has important application prospects in space physics, sky-wave over-the-horizon radar detection, emergency rescue and disaster relief and other fields.

Keywords: ionospheric oblique detection; embedded platform; complete complementary code; digital IF reception; Flexible Static Memory Controller(FSMC) communication; optimal frequency selection

电离层斜向探测仪是一种利用电离层的反射效应进行传播、工作在短波波段的雷达系统。电离层斜向探测仪通过对雷达回波信号进行检测和数据反演, 不仅可以得到电离层高度及其电子浓度的变化特征^[1], 而且可以为短波通信链路实时提供最佳可用工作频率、为天波超视距雷达探测服务、验证和修正射线追踪等理论模型^[2]。电离层斜向探测系统在短波通信选频、应急抢险救灾、空间物理学研究、超视距雷达探测服务等领域有重要应用^[3-4]。

收稿日期: 2021-01-15; 修回日期: 2021-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42074184)

*通信作者: 杨国斌 email:gbyang@whu.edu.cn

目前的电离层斜向探测系统主要有两种类型:一种是利用电离层垂直探测系统的发射天线的副波瓣,并加入一些同步方式来实现电离层斜向探测,如马萨诸塞大学洛厄尔大学大气研究中心研制的便携式电离层数字探测仪(Digisonde-Portable-Sounder-4D, DPS-4D)^[5];另一种是专门用于电离层斜向探测的斜测仪,系统采用线性调频连续波体制或双站脉冲压缩体制^[6]。传统的电离层斜向探测仪采用大量的模拟器件来实现功能,设备结构复杂,造价费用高,体积庞大,部署要求高且可扩展性较差。同时这种探测系统存在多站同时探测相干干扰严重^[7]、探测信道单一等不足。

针对上述情况,本文提出一种基于嵌入式平台的电离层斜向探测系统。系统采用软件无线电设计思想,引入完全互补码,有效解决了多站同步探测中的相干干扰问题,丰富了探测码制;使用数字中频接收系统,减少了模拟电路的温漂、增益变换、直流漂移和非线性失真等影响,同时避免了模拟混频信号产生的寄生信号和交调失真;嵌入式平台的设计实现了数据的自动判读和频率优选,精简了系统结构,降低了系统成本,使系统便于部署,便于获取不同信道的电离层空间环境信息。

1 基于 FPGA+ARM 的电离层斜向探测系统设计

基于 FPGA+ARM 的嵌入式电离层斜向探测系统主要由数字中频接收机、数字相关器、数据处理模块、发射模块、时间同步模块、收发(Transmit/Receive, T/R)控制模块、短波收发天线、全球定位系统(Global Position System, GPS)天线组成,见图 1。系统工作模式分为两个阶段:接收阶段与发射阶段。第一阶段为信号接收阶段,系统采用 GPS 实现收发两端时间同步^[8],嵌入式斜向探测系统接收固定台站发射的周期性互补码扫频信号,接收信号通过接收天线进入接收系统,模数转换(Analog to Digital Converter, ADC)芯片采集到的数据在 FPGA 中进行数字下变频以及数字相关处理。ARM 芯片通过灵活的静态存储控制(FSMC)协议读取 FPGA 中的处理数据,并通过时间积累技术和恒虚警检测进行数据判读和频率优选^[9];第二阶段为信号发射阶段,扫频时长 5 min。系统采用键控调制方式对直接数字合成芯片进行二相调制编码,调制序列为周期性完全互补码扫频信号。系统实现了电离层斜向探测的自动收发以及数据处理,得到嵌入式斜向探测系统与固定台站中间位置的电离层参数信息。本系统总体设计指标见表 1。

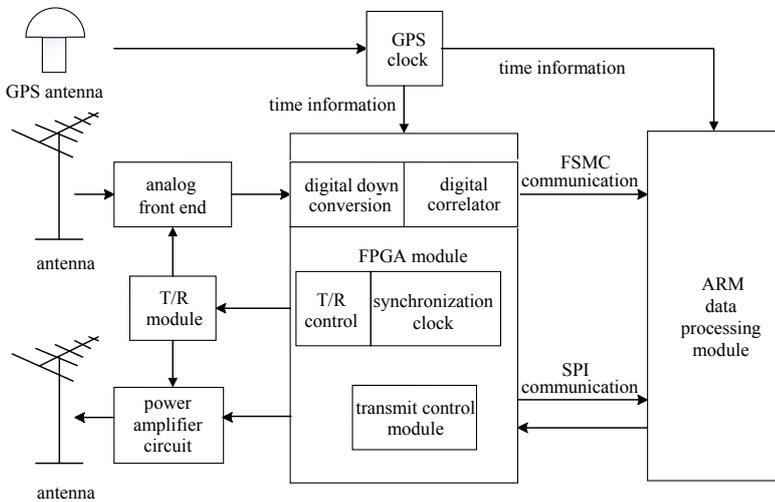


Fig.1 Block diagram of the embedded oblique detection system
图 1 嵌入式斜向探测系统结构框图

表 1 系统总体设计指标
Table1 Overall system design index

system parameters	performance
detection range/km	100-1 500
detection frequency/MHz	2-30
detection power/W	≤200
range resolution/km	3.84
detection period/min	15
peak power/W	283
pulse width/μs	25.6
duty cycle/%	5
detection coding	complementary code, complete complementary code
IF frequency/MHz	41.4
bandwidth/kHz	60
sensitivity/dBm	-110
power gain/dB	>55
dynamic range/dB	76

1.1 发射机波形产生模块设计

双站同步进行电离层斜向探测时,发射信号设为 $g(t)$, 经过电离层反射后的回波信号 $s(t)$ 可以表示为:

$$g(t) = a(t)e^{j2\pi f_1 t} \tag{1}$$

$$s(t) = \int_{\rho} h(t, \tau)a(t - \tau)dt \tag{2}$$

式中: $a(t)$ 为调制的窄带信号; f_1 为载频; τ 为经过电离层传播后的相对时延; ρ 为信号传播路径; $h(t, \tau)$ 为电离层信道的脉冲响应函数。当 $a(t)$ 的自相关函数满足 Dirac 形状的特点,且信道在 T_1 时间内处于稳态,将发射信号 $g(t)$ 延时 t_d 后与回波信号 $s(t)$ 作时间长度为 T_1 的互相关运算,表达式为:

$$L_{g,a}(t_1, t_d) = \frac{1}{T_1} \int_{t_1-t_d}^{t_1} \int_{\rho} h(t, \tau) a(t-\tau) a(t-t_d) d\tau dt = \int_{\rho} h(\tau) L_{a,a}(t_1, t_d - \tau) d\tau = h(t_1, t_d) \quad (3)$$

由式(3)可知, 当探测码制具有较好的自相关特性时, 通过探测可获得电离层信道的脉冲响应函数, 从而获取电离层的各种信道参数。由于电离层斜向探测的回波信号较弱, 选择自相关性好且增益高的探测码制很有必要, 如 m 序列或互补码序列。但使用上述探测码制在进行多站同步探测过程中会出现严重的相干干扰, 武汉大学电离层实验室引入了同时具有良好自相关和良好互相关特性的完全互补码序列用于电离层探测^[10]。

完全互补码序列最早由 Suchiro^[11]提出, 因为理想的正交特性用于多输入多输出系统。完全互补码能够克服电离层多站同步探测中的相干干扰。对于 N 个 M 阶序列集 $\{(S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1M}), (S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2M}), \dots, (S_{N1}, S_{N2}, \dots, S_{NM})\}$, 每个元素 S_{ij} 是长度为 L 的序列, $(S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1M})$ 是一个子集。 $\{N, M, L\}$ 代表序列集的序列族, 其中 M 是序列集中的序列数, N 是序列集的数目, L 是序列 $S_{n,m}$ 的长度。当同一子集中每个序列的自相关函数的总和为零(零移位除外), 并且不同子集中对应序列的互相关函数总和也为零时, $\{N, M, L\}$ 序列家族被认为是完整的互补码。因此, $\{N, M, L\}$ 序列满足等式(4)和(5)。

$$\sum_{j=1}^M R_{S_{i,j}}(\tau) = ML\delta(\tau) \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^M R_{S_{ij}, S_{kj}}(\tau) = 0 (i \neq k) \quad (5)$$

式中: $R_{S_{i,j}}(\tau)$ 为序列 S_{ij} 的自相关函数; $R_{S_{ij}, S_{kj}}(\tau)$ 为序列 S_{ij} 和 S_{kj} 的互相关函数; $\delta(\tau)$ 为典型的脉冲函数; τ 为时间偏移量。

表 2 {4,4,16}完全互补码

Table2 {4,4,16} complete complementary code

coding sequence	values			
	1	2	3	4
A0	+++	++-	+--	++++
A1	++-	+--	+++	+--
A2	+--	+++	++-	++-
A3	++++	+--	++-	++-
B0	+++	---+	+--	---
B1	+++	---+	+++	-+-
B2	+--	---	+--	---+
B3	++++	-+-	+++	-+-
C0	+++	++-	-+-	---
C1	++-	+--	---	-+-
C2	+--	+++	-+-	---+
C3	++++	+--	---+	-+-
D0	+++	---+	-+-	+++
D1	++-	-+-	---	+--
D2	+--	---	-+-	++-
D3	++++	-+-	---+	-+-

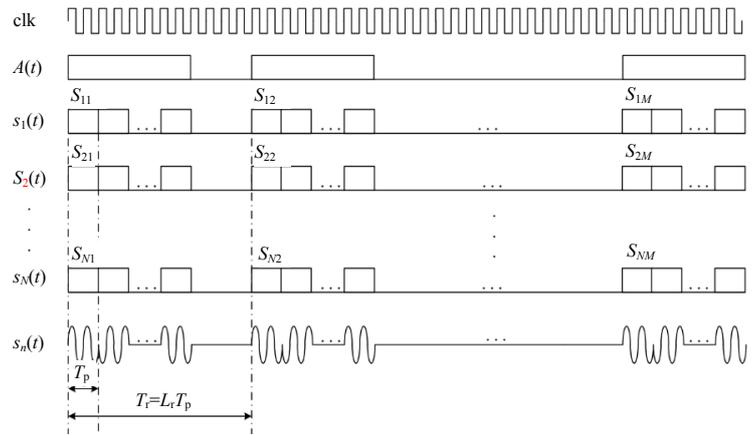


Fig.2 Waveform diagram of single cycle
图 2 单周期波形示意图

本文的双向完全互补码通过 Han 和 Suchiro^[12]提出的方法生成。表 2 显示了一组 {4,4,16}完全互补序列。在表 2 中, +和-分别代表+1 和-1, 4 个子集分别由字母 A,B,C,D 索引, 子集中的序列由数字 0,1,2,3 索引。

图 2 为单周期波形示意图, 图中 clk 为系统时钟; $A(t)$ 为脉内二相编码脉冲宽度; $S_N(t)$ 代表脉内二相编码宽度, 单位为 T_p ; 发射周期 $T_r=L_r T_p$, 其中 L_r 为单个发射周期的编码个数; $s_n(t)$ 为输出的调制波形。对于一组由 {A0,B0,C0,D0}组成的 16 bit 完全互补码序列, 脉内二相编码宽度 T_p 为 25.6 μs , 距离分辨力为 3.84 km, 占空比为 5%, 最大探测距离为 1 167 km。

1.2 数字中频接收系统设计

数字中频接收系统基于软件无线电思想, 系统结构框图见图 3。接收信号经过天线后首先在射频前端进行第一次混频, 得到 41.4 MHz 的中频信号; 16 位 ADC 芯片将模拟信号转换为数字信号, FPGA 对输入信号进行二次混频, 得到基带同相(In-phase, I)分量和正交(Quadrature, Q)分量, 并且通过积分梳状滤波器、有限冲激响应滤波器进行数字滤波和抽取, 这个过程称为数字下变频(Digital Down Conversion, DDC)^[13]。数字相关器将基带 I,Q 分量与本地探测序列进行相关处理并输出相关峰值。数字中频接收系统的主要特点是将第二次混频在数字域完成, 使系统在具有超外差接收机灵敏度高、增益大、动态范围大等特点的同时, 减少了模拟电路的温漂、增益变换、直

流漂移和非线性失真等影响,数字混频器实现正交解调得到的 I,Q 信号避免了模拟混频信号产生的寄生信号和交调失真,同时具有标准化、模块化、可扩展的特点^[14]。

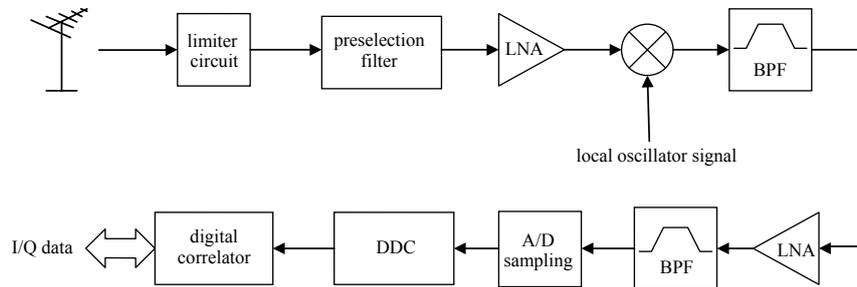


Fig.3 Hardware architecture of digital IF receiver
图 3 数字中频接收机硬件架构

2 数据处理流程

基于 FPGA+ARM 的嵌入式斜向探测系统的核心是 ARM 作为主控芯片,通过 FSMC 通信协议、串行外设总线(Serial Peripheral Interface, SPI)通信协议与 FPGA 相互配合,实现斜向扫频探测各个模块的信息交互。斜向扫频探测的详细流程见图 4。系统首先通过 GPS 同步时间信息, FPGA 和 ARM 进行初始化参数设置;GPS 时钟达到触发时间后,系统进入探测第一阶段, T/R=0 为接收模式,系统接收主叫台站发出的 2~30 MHz 的扫频信号,接收的扫频信号经过模拟前端、数字下变频以及数字相关处理后通过 FSMC 协议送入 ARM 芯片;ARM 端首先对读取的数据进行 32 次功率积累,然后对信号进行恒虚警检测,最后对检测到的信号计算信噪比并进行优选。第二阶段开始时, T/R=1,系统进入发射模式,ARM 向 FPGA 发送控制指令;FPGA 通过更新频率控制字的方式,控制直接数字合成(Direct Digital Synthesis, DDS)芯片产生频率工作范围相同的扫频信号;调制方式选择信号 (Modulation Access, MA)=0 时,选择互补码调制信号; MA=1 时,选择完全互补码调制信号。主叫台站对接收信号进行数据处理及反演,并在上位机显示处理之后的电离图,完成斜向探测。根据图 4 可以看出,本系统根据预先设置好的工作方式自动完成探测流程。

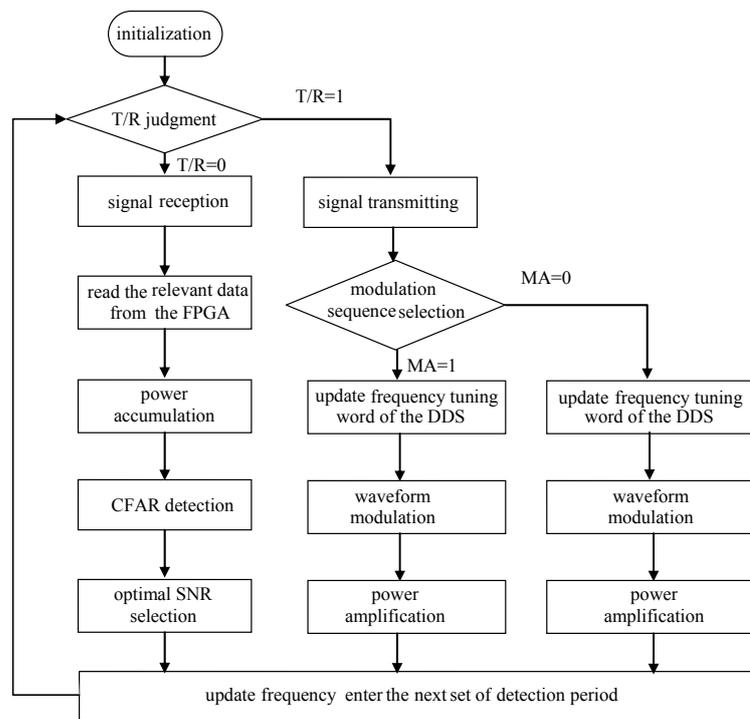


Fig.4 Flowchart of data processing
图 4 数据处理流程图

3 实验结果分析

为验证系统设计的可靠性,在四川乐山和湖北武汉进行嵌入式斜向探测系统的电离层斜向探测实验。实验主要分为 3 个阶段:第一阶段采用 16 位互补码调制序列,由湖北武汉的嵌入式斜向探测系统向四川乐山的固定台站发送扫频范围为 2~30 MHz、步进为 0.05 MHz 的扫频调制信号,四川乐山的固定台站接收信号后进行数据反演并得到图 5 所示的电离图。提取图中的参数,可得到斜返实验中信号传播群距离范围为 1 205.8~1 251.8 km。武汉台站与乐山台站之间的大圆距离为 1 127.88 km,根据电离层等效虚高定理计算得到电离层虚高为 237.799~291.307 km,属于电离层 F2 层,实验验证了斜向探测的正确性。

第二阶段实验采用 16 位互补码。湖北武汉的嵌入式斜向探测系统与四川乐山的固定台站进行同步收发实验,见图 6,四川乐山的固定台站不仅接收到武汉嵌入式斜向探测系统的斜测信号,同时收到本地台站发射的垂测信号,表明使用互补码进行多站同步收发实验时,会出现严重的相干干扰,使用现有软件很难自动度量这种电离图。

第三阶段实验采用 16 位完全互补码。湖北武汉的嵌入式斜向探测系统发送 16 位完全互补码 1 调制信号,四川乐山同步发送 16 位完全互补码 2 调制信号。图 7 为四川乐山的固定台站使用本地完全互补码序列对接收到的信号进行相关后得到的电离图。本阶段的回波信号既有垂测回波也有斜测回波,利用完全互补码序列的正交性与回波信号进行相关处理后消除了斜测回波信号,得到了纯净的垂测回波信号。实验表明,完全互补码能够有效消除多站同步探测中出现的相干干扰,验证了完全互补码不仅具有良好的自相关特性同时还具有良好的互相关特性,能够用于多站同步探测实验。

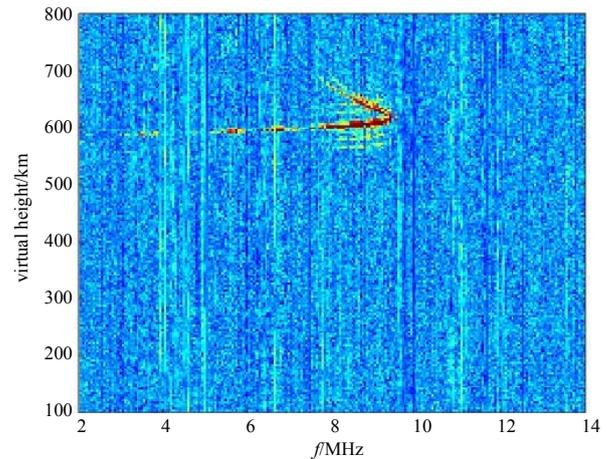


Fig.5 Sweep frequency echo detection diagram of embedded oblique detector

图 5 嵌入式斜向探测系统扫频回波探测图

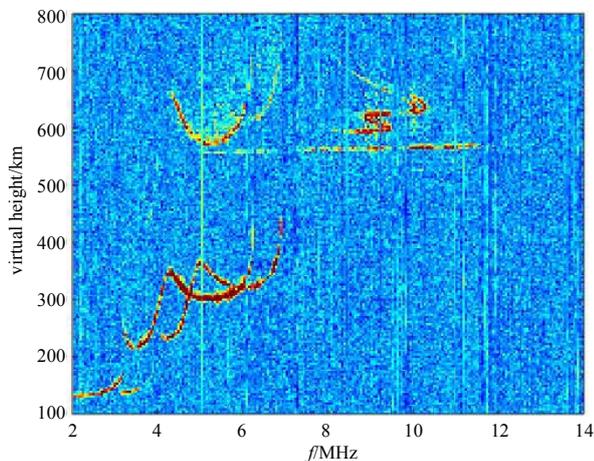


Fig.6 Ionization diagram of dual-station synchronous detection experiment based on complementary code

图 6 基于互补码的双站同步探测实验电离图

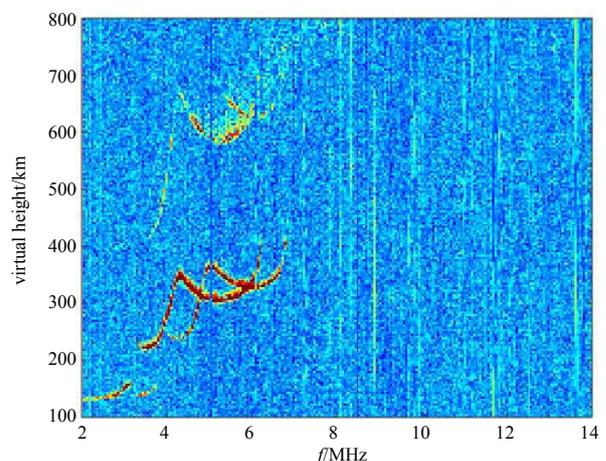


Fig.7 Ionization diagram of dual-station synchronous detection experiment based on complete complementary code

图 7 基于完全互补码的双站同步探测实验电离图

4 结论

本文提出的基于 FPGA+ARM 的嵌入式电离层斜向探测系统创新性地改变了常规电离层斜向探测系统的系统结构,提高了系统的便携性,抑制了探测中的相干干扰。完全互补码的使用不仅丰富了系统探测码制,同时有效抑制了多站同步探测中的相干干扰。数字中频接收结构在改善信号质量的同时具有标准化、模块化、扩展性强的特点;FSMC 通信协议提供了高速并行数据传输的解决方案。从实验结果可以看出,系统可以得到高质量的电离层斜测回波信息,对于空间物理学研究、天波超视距雷达探测、应急抢险救灾以及短波无线通信有重要意义。

本文提出的嵌入式斜向探测系统已经在电离层斜向探测的自动数据判读和频率优选方面取得了一定应用效果,下一步将用于区域电离层多站同步组网探测,以获取更多探测数据,并反演不同信道的电离层特性;引入嵌入式操作系统,提高系统的扩展性和人机交互能力,最后针对数据判决算法进行优化,从而提高嵌入式电离层斜向探测系统的探测能力和抗干扰能力。

参考文献:

- [1] BOSTAN S M,URBINA J V,MATHEWS J D,et al. An HF software-defined radar to study the ionosphere[J]. Radio Science, 2019,54(9):839-849.
- [2] BLAGOVESHCHENSKY D V,ZHBANKOV G A,MALTSEVA O A. Observed and calculated ionograms of oblique ionospheric sounding on hf radio paths during a magnetic storm of September 7-8, 2017[J]. Radiophysics and Quantum Electronics, 2019,61(9):881-892.
- [3] 冯静. 基于返回散射探测和垂直探测的电离层反演技术研究[D]. 武汉:武汉大学, 2018. (FENG Jing. Research on ionospheric electron density inversion based on backscatter and vertical soundings[D]. Wuhan,China:WuHan University, 2018.)
- [4] 王楠,付海洋,李索,等. 基于频带分割法反演电离层TEC参数[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(2):198-205. (WANG Nan,FU Haiyang,LI Suo,et al. Retrieving ionospheric TEC based on the split-spectrum method[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(2):198-205.) DOI:10.11805/TKYDA201702.0198.
- [5] REINISCH B W,GALKIN I A,KHMYROV G M,et al. Advancing digisonde technology:the DPS-4D[J]. AIP Conference Proceedings, 2007,974(1):127-143.
- [6] LIU T X,YANG G B,ZHAO Z Y,et al. Application of beamforming technology in ionospheric oblique backscatter sounding with a miniaturized L-array[J]. Remote Sensing, 2020,12(3):499.
- [7] 刘力,杨小鹏. 稳健的相干干扰抑制算法[J]. 信号处理, 2017,33(12):1555-1561. (LIU Li,YANG Xiaopeng. Robust algorithm to suppress coherent jamming[J]. Journal of Signal Processing, 2017,33(12):1555-1561.
- [8] LIU T,YANG G,ZHAO Z,et al. Design of multifunctional mesosphere-ionosphere sounding system and preliminary results[J]. Sensors, 2020,20(9):2664.
- [9] 金元华,叶春茂,鲁耀兵,等. 一种基于CFAR检测和密度聚类的ISAR图像预处理方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(2):278-283,290. (JIN Yuanhua,YE Chunmao,LU Yaobing,et al. A pre-processing method of ISAR images based on CFAR detection and density clustering[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(2):278-283,290.)
- [10] YANG G,DUAN P,JIANG C,et al. Application of bi-phase complete complementary code for ionospheric sounding[J]. Sensors, 2018,18(9):2811.
- [11] HAN C G,SUCHIRO N. A generation method for constructing(N,N,MN/P) complete complementary sequences,mobile future[C]// SympoTIC '04. Joint 1st Workshop on Mobile Future & Symposium on Trends In Communications. Bratislava, Slovakia:IEEE, 2004:70-73.
- [12] HAN C G,SUEHIRO N,HASHIMOTO T. N-shift cross-orthogonal sequences and complete complementary codes[C]// 2007 IEEE International Symposium on Information Theory. Nice,France:IEEE, 2007.
- [13] 胡晓芳,郑世连,朱亮,等. 多通道高速数字收发设计[J]. 现代雷达, 2019,41(5):73-76. (HU Xiaofang,ZHENG Shilian,ZHU Liang,et al. A multi-channel high-speed digital transceiver[J]. Modern Radar, 2019,41(5):73-76.)
- [14] 周春良,周芝梅,王连成,等. LTE230数字中频接收机的设计[J]. 电子技术应用, 2017,43(9):46-49. (ZHOU Chunliang,ZHOU Zhimei,WANG Liancheng,et al. Design of a digital IF receiver for LTE230[J]. Application of Electronic Technique, 2017,43(9):46-49.)

作者简介:

李江华(1994-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为空间探测与信息处理. email:2018202120024@whu.edu.cn.

杨国斌(1983-),男,教授,主要研究方向为空间探测与信息处理. email:gbyang@whu.edu.cn.

张援农(1963-),男,教授,主要研究方向为空间物理学.

姜春华(1983-),男,副教授,主要研究方向为空间探测与信息处理.

刘桐辛(1993-),男,博士后,主要研究方向为空间探测与信息处理.