0254-6124/2014/34(6)-849–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Wang Shun, Chen Ziwei, Zhang Feng, Gong Zhaoqian, Fang Guangyou. A new design for digital ionosonde (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 849-857, doi:10.11728/cjss2014.06.849

CAS-DIS 数字电离层测高仪系统研制*

王 顺 陈紫微 张 锋 宫兆前 方广有

(中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190)

摘 要 提出了将射频直接采样数字化的接收方式应用于数字电离层测高仪系统的设计方案, 并详细介绍了该方案在 CAS-DIS (Chinese Academy of Sciences, Digital Ionosonde) 电离层测高仪系统的应用, 给出了 CAS-DIS 电离层测高仪在中国武汉电离层探测标校试验场和武汉–北京斜向电离层探测系统中的实验结果. 观测结果表明, 采用本文提出的数字化方案设计的电离层测高仪系统性能优越, 且可以分别工作在垂直和斜向探测模式, 满足了电离层探测的多种应用需求.

关键词 数字电离层测高仪, 数字下变频, 脉冲压缩, 相位编码, 相干积分

中图分类号 P 352

A New Design for Digital Ionosonde

WANG Shun CHEN Ziwei ZHANG Feng

GONG Zhaoqian FANG Guangyou

(*Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract In this paper a new design for digital ionosonde is presented based on the concept of directly sampling in the RF domain, and the real time digital down-conversion processing is implemented in FPGA device, which improves the signals identity of I and Q, and enhances the dynamic range of the receiver. In addition, since the digital waveform generation in transmitting path, the digital down-conversion processing in receiving path, data pre-processing, and timing control functions of the whole system are integrated in one FPGA chip, which improved the flexibility of the ionosonde. To verify the design, a high quality digital ionosonde called CAS-DIS (Chinese Academy of Sciences, Digital Ionosonde) has been developed. This paper describes the details of CAS-DIS, its main features and testing results in the ionosphere detection, including in Wuhan ionospheric sounding and calibration station and Wuhan-Beijing oblique ionospheric sounding system, and the observations show that performance of the iononsonde using the proposed design is superior, and the ionosonde can operate in both vertical and oblique sounding mode, to meet a variety of applications in ionospheric detection.

* 国家高技术研究发展计划项目资助 (SS2012AA120505)

2013-10-17 收到原稿, 2014-05-19 收到修定稿

E-mail: swang@mail.ie.ac.cn

Key words Digital ionosonde, Digital down-conversion, Pulse compression, Phase encoding, Coherent integration

0 引言

电离层测高仪是目前地面探测研究电离层的常规设备之一, 其从地面向上发射脉冲调制的高频无线电波, 当电波频率与电离层等离子体频率相等时信号发生反射, 通过测量电离层反射回波到达接收机的时间延迟, 即可获得各频率点的电离层虚高.

目前广泛应用的电离层测高仪设备主要有澳大利亚的 IPS-71、加拿大的 CADI、意大利的 AIS-INGV、美国的 DPS-4 以及中国电波传播研究所研制的 TYC-1 测高仪系统等 [1]. CADI 测高仪系统发射通道采用数字频率合成技术 (DDS) 实时产生发射波形, 接收机采用两次模拟下变频的实现结构, 下变频输出的模拟 I, Q 信号分别通过两个独立的 ADC (模数转换器) 进行采样量化, 量化后的数字信号送入上位机进行处理, 该实现结构中模拟下变频处理容易造成 I, Q 两个通道的幅度和相位不平衡, 从而影响最终的处理结果 [2−3]. AIS-INGV 虽称为数字式电离层测高仪, 但其在接收机设计上仍采用了超外差结构和多次模拟变频的实现方式, 在对 I, Q 信号进行量化时与 CADI 相同, 仍采用两个独立的 ADC 通道实现 [4]. DPS-4 为数字化的电离层测高仪系统, 其设计上采用了数字上下变频芯片来实现波形合成和数字下变频功能, 例如采用的 GC5016 和 AD9857 芯片等, 该设计消除了模拟下变频中 I, Q 通道不平衡的现象, 但由于数字下变频芯片输出数据位宽是有限的, 因此输出 I, Q 信号的动态范围受到限制 [5]. 如果能在采用数字化方案的同时提高下变频处理时输出信号的动态范围, 将会改善数字式电离层测高仪的探测效果.

由于电离层测高仪工作频率在 1∼30 MHz 范围, 现有器件完全能够在射频前端对其进行数字化, 因此本文提出了一种数字化的电离层测高仪系统实现方案, 该方案采用射频直接采样的结构对天线接收的射频信号直接进行数字化, 在 FPGA 器件内进行实时下变频处理, 其输出数据位宽不受限制, 可以有效提高 I, Q 输出信号的动态范围. 另外, 由于该方案中发射通道数字波形产生, 接收通道数字下变频处理, 数据缓存以及整个系统的时序控制等功能均集成在同一 FPGA 内部, 因此该设计在提高系统灵活性的同时降低了系统的复杂度, 如果需要对电离层测高仪系统进行升级, 只需修改 FPGA 程序, 不用对硬件电路做任何修改.

目前本文所提出的射频直接采样数字化结构的电离层测高仪系统设计方案已成功应用于 CAS-DIS 电离层测高仪系统, 并在武汉电离层探测标校试验场和武汉–北京斜向电离层探测系统中进行了实验验证. 探测结果表明, 该方案不但结构简单、易于升级, 而且可以工作在垂直和斜向探测模式, 满足电离层探测的多种需要.

1 系统设计

1.1 CAS-DIS 电离层测高仪

在数字测高仪系统的设计中, 接收机的性能主要取决于接收回波信号的信噪比, 提高接收系统的信噪比主要有两个途径: 一是增加发射功率来提高回波信号的能量, 由于发射机的峰值功率限制, 发射功率不可能无限制提高; 二是增加发射脉冲信号的宽度, 但脉冲越宽, 高度分辨率就越低 [6]. 如果采用相位编码技术, 则可以在保证一定高度分辨率的情况下有效提高测高仪的高度分辨率, 因此在 CAS-DIS 电离层测高仪系统设计中采用了 16 位互补码的编码方式 [7−8].

本文研制的 CAS-DIS 电离层测高仪系统主要由控制信号产生单元、发射通道、接收通道、天线系统、脉冲压缩处理及显控终端等部分组成. CAS-DIS 电离层测高仪系统的功能模块划分如图 1 所示.

根据电离层探测的实际需求, CAS-DIS 电离层测高仪系统主要技术指标设计参见文献 [9] 的表 1.

1.2 控制信号产生单元

CAS-DIS 系统工作时序可以描述为: 上位机软件首先将配置参数通过 PCI 接口下载至 FPGA 内部参数 RAM 中, 然后产生一个相应的复位信号, 控制时序产生单元检测到该复位信号后去读取配置参数并根据配置参数生成相应的控制时序. CAS-DIS

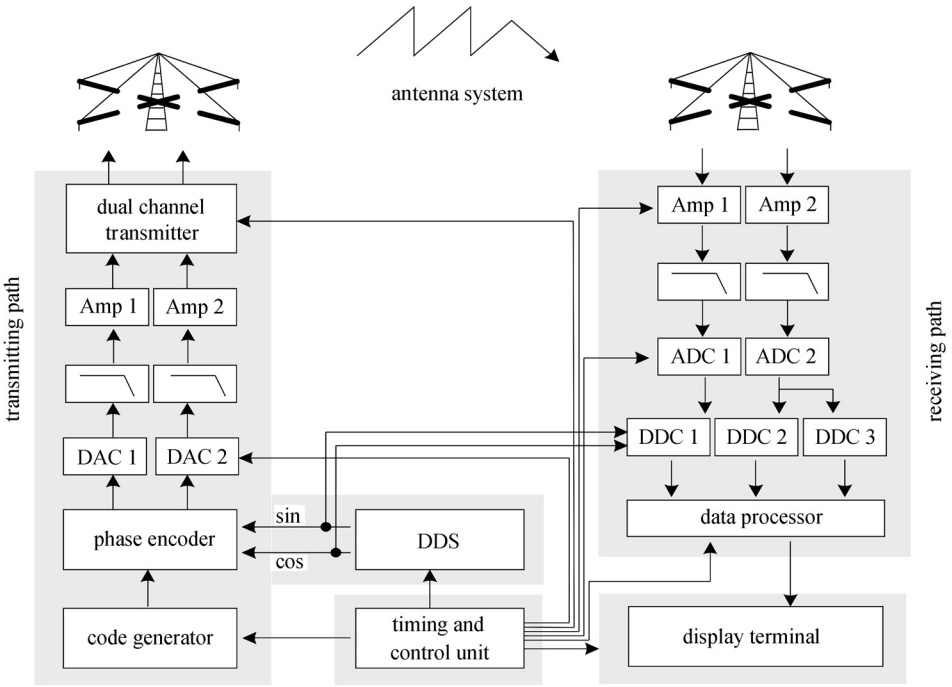


图 1　CAS-DIS 电离层测高仪系统组成

Fig. 1　Block diagram of CAS-DIS ionosonde

电离层测高仪系统的脉冲重复频率 (PRF) 为 20 Hz, 对应脉冲重复周期 (PRI) 为 50 ms, 其中 40 ms 为信号发射和数据采集时间, 10 ms 用于数据传输时间. 为了实现对 O 波及 X 波的分离以便对电离层频高图进行自动度量处理 [10−14], 在一次 PRI 内电离层测高仪系统需要完成以下工作模式的转换.

(1) 4 次码型变换: CAS-DIS 电离层测高仪系统采用相位编码调制技术, 设计中选用的调制码型为 16 位互补码, 包括 A 码和 B 码, 每次码型变换的持续时间为 10 ms.

(2) 2 次极化方式转化: 分别对应左旋圆极化和右旋圆极化.

(3) 4 次信号发射和 4 次数据采集过程: 分别对应每一个码型变换所产生的一次信号发射和接收过程, 发射信号时间窗口为 600 μs, 其中有效发射信号时宽为 533.33 μs, 接收信号时间窗口为 6 ms, 对应探测虚高为 900 km.

1.3　发射通道

如图 1 所示, CAS-DIS 电离层测高仪发射通道主要由频率合成单元 (DDS)、编码信号产生单元、相位调制器, DACs、双通道发射机和信号放大及滤波等信号调理单元组成.

DDS 产生 1∼26 MHz 的正余弦信号, 其频率和初始相位可以根据控制参数实时调整. DDS 产生的正余弦信号一路作为发射脉冲的载波信号, 另一路则作为接收通道数字下变频单元 (DDC) 的本振信号. 在 CAS-DIS 系统中, DDS 采用 FPGA 内部的逻辑资源实现, 其时钟频率 $f_{\rm clk}$ = 60 MHz, 频率分辨率 Δf = 0.25 Hz, 虚假抑制 S = 82 dB, 相位累加器 (PACC) 位宽 28 bit, 输出数据位宽 14 bit. 图 2 为 CAS-DIS 系统中 DDS 的实现结构.

编码信号产生单元产生 16 位的互补码, 该编码对 DDS 产生的载波信号进行相位调制. 设计中单个码元的时间宽度 $T_{\rm s}$ = 33.33 μs, 带宽为 30 kHz, 对应高度分辨率为 5 km, 发射信号持续时间为 16 位码元的时间宽度, 即 T = 533.33 μs.

DAC 将调制后的载波信号转化为模拟信号后送入低通滤波器进行滤波, 滤波器输出信号经放大后幅度为 1 V (峰–峰值), 再由双通道发射机将该信号放大至 600 W 输出. 在 CAS-DIS 系统中, 发射机包括两级放大器, 其中前级为驱动放大器, 将 1 V (峰–峰值) 信号放大至 50 V (峰–峰值); 第二级为功率放大级, 将驱动放大级输出的信号放大至 500 V (峰–峰值).

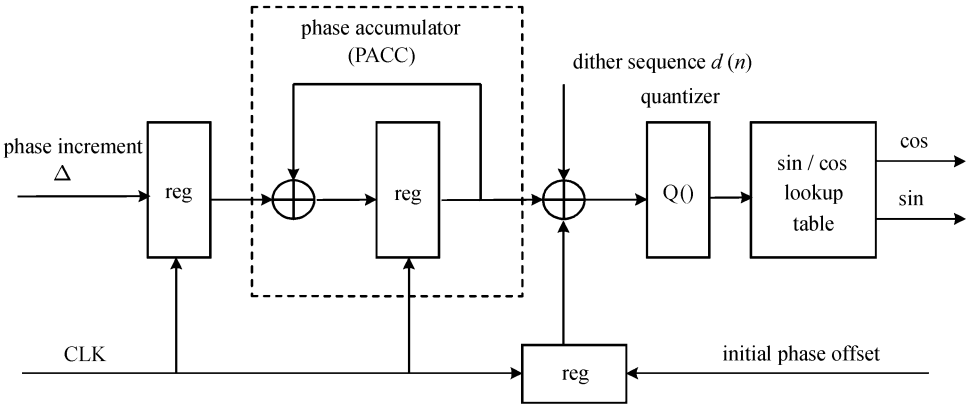


图 2 CAS-DIS 系统中 DDS 的实现结构

Fig. 2 Implementation of DDS in CAS-DIS

1.4 接收通道

接收通道由可调增益放大电路、抗混叠滤波器、ADCs、数字下变频处理 (DDCs) 和数据缓存 (FIFO) 等部分组成.

由于接收天线感应的电离层回波信号电压较小, 一般为微伏量级, 为了尽可能不失真地接收该回波信号, 需要对该信号进行低噪声放大; 另外, 由于数字式测高仪工作在短波频段, 在该频段内存在大量广播信号的干扰, 如果广播信号过大会使 ADC 出现饱和, 因此需要采用可调增益放大器来对进入 ADC 的信号幅度进行调整, 因此可调增益放大电路由位于前级的低噪声放大器 (LNA) 和可调增益放大器组成. 在 CAS-DIS 系统中, LNA 的增益为 16 dB, 可调增益放大器的增益调整范围为 −12 dB 到 32 dB, 从而保证了模拟接收信号在 ADC 的有效输入范围内.

在 CAS-DIS 系统中 ADC 采样率 $f_{\mathrm{clk}} = 60$ MHz, 由于 ADC 的采样率较高, 量化后的数字信号无法直接进行脉冲压缩处理, 因此需要进行数字下变频处理 (DDC). 图 3 为 CAS-DIS 系统中 DDC 的实现结构. DDC 包括数字混频器 (M1, M2)、积分抽取滤波器 (CIC)、补偿滤波器 (CFIR) 和可编程滤波器 (PFIR) 等. 数字混频器 M1, M2 的输入信号为 ADC 量化后的信号和 DDS 所产生的正余弦本振信号, M1, M2 的工作时钟为 60 MHz. 混频器的输出信号分别进入两组积分抽取滤波器 CIC 中, CIC 对混频后的信号进行 10 倍的抽取和低通滤波处理, 对应输出数据率为 6 MHz. 为避免 CIC 抽取后造成有效信号带宽内信号幅度的衰减, 需要 CIC 输出信号进行幅度补偿, 同时进一步进行抽取滤波器处理 (PFIR), 设计中 PFIR 的抽取倍数为 8, 对应输出数据率为 750 kHz. 为进一步降低数据率, DDC 最后一级采用了 128 阶的可编程滤波器进行低通滤波, 该级的抽取倍数为 5, 输出数据率为 150 kHz. 图 4 给出了 DDC 中滤波器的频率响应特征.

在 CAS-DIS 中, 每个 PRI 时间内 ADC 的采样时间为 6.0 ms, 由于 ADC 的采样率为 60 MHz, DDC 的抽取率为 400 倍, 经过 DDC 抽取后一帧的数据量为 900 点, 对应探测高度范围为 90~990 km. 经过 DDC 处理后 I, Q 分量数据分别被送入数据缓存 FIFO 中, 当一帧数据处理完后, 控制时序产生单元产生相应的 DMA 中断并将 FIFO 中的数据经 PCI 接口送往显控终端进行脉冲压缩处理. 为了改善回波信号的信噪比可以采用相干积分技术, 实际上由于电离层反射面的不稳定性, 回波信号在经过一段时间之后就变得不再相干, 因此相干积分的次数有限, 在 CAS-DIS 系统中最大积分次数为 128 次, 对应可以获得超过 20 dB 处理增益.

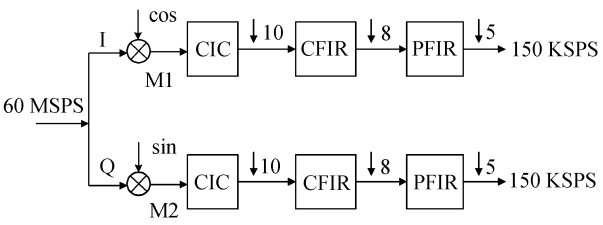


图 3 CAS-DIS 系统中 DDS 的实现结构

Fig. 3 Implementation of DDS in CAS-DIS

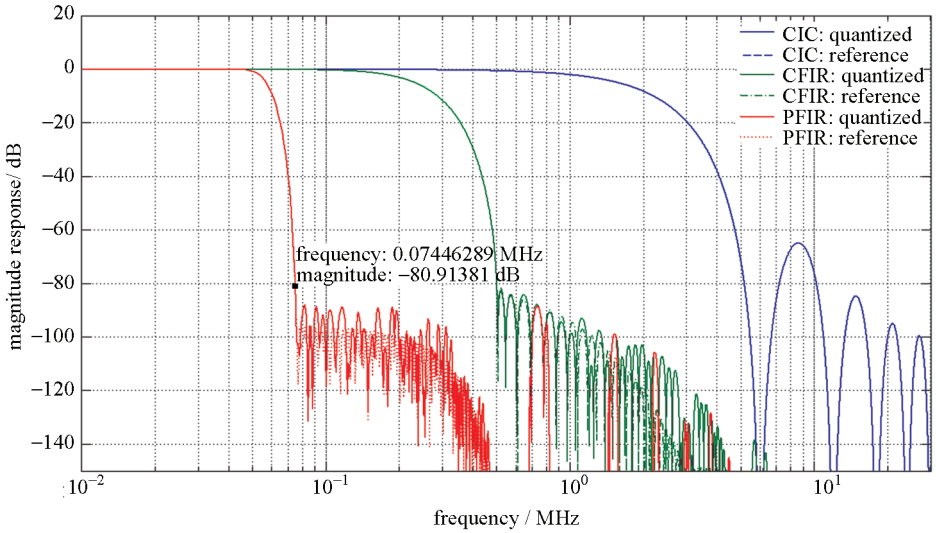


图 4　CIC, CIC+CFIR, CIC+CFIR+PFIR 滤波器频率响应特性

Fig. 4　Frequency response of CIC, CIC+CFIR and CIC+CFIR+PFIR filter

1.5　脉冲压缩处理及显控终端

雷达回波信号的匹配滤波处理通常采用数字脉冲压缩技术实现. 数字脉冲压缩可以分为时间域和频率域两种实现方式, 其中时间域实现方式是直接将数字下变频后的复包络输入序列与匹配滤波器脉冲响应序列在时域进行卷积, 由于时域卷积的计算量很大, 本设计中采用频率域实现方式. 图 5 给出了频率域数字脉冲压缩处理的实现结构, 其中输入分别为下变频后基带 I, Q 信号组成的复包络信号和参考波形信号, 在 CAS-DIS 系统中, 数字脉冲压缩处理在上位机通过软件实现.

图 6 和图 7 分别为经过数字下变频后的基带 I, Q 波形和脉冲压缩处理后的结果 (相干积分次数为 100 次, 积分增益为 20 dB). 从图 7 可以看出, 在

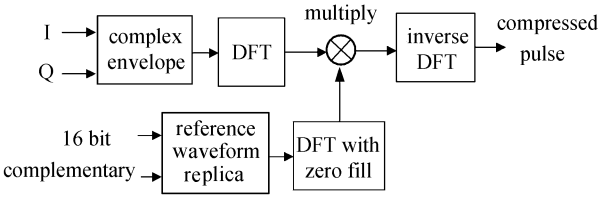


图 5　频率域数字脉冲压缩处理实现结构

Fig. 5　Implementation of digital pulse compression in frequency-domain

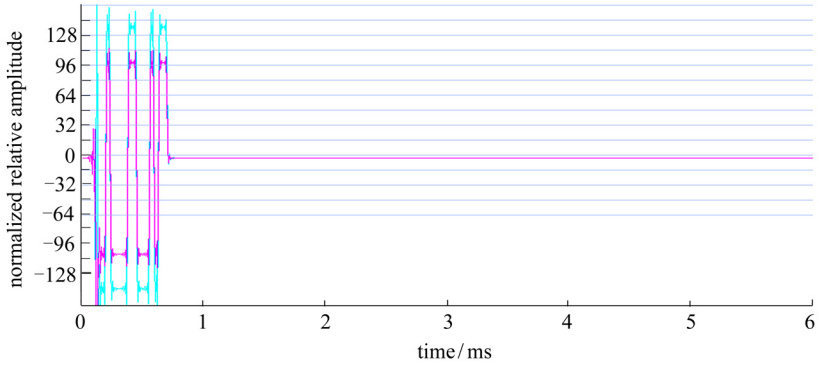


图 6　CAS-DIS 系统闭环测试下的基带 I, Q 信号 (蓝色和粉色曲线分别对应数字下变频后 I, Q 基带信号)

Fig. 6　Baseband waves of I and Q data in CAS-DIS (Lines in blue and pink are the baseband waves of I and Q after DDC)

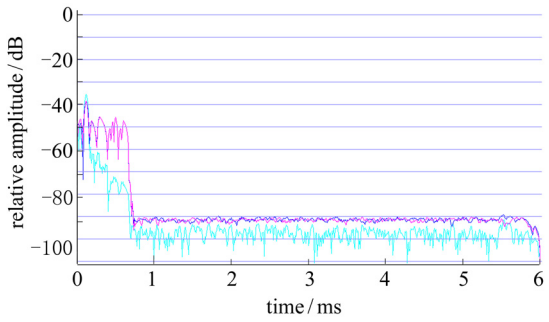


图 7 CAS-DIS 系统闭环测试下的脉冲压缩处理结果. (蓝色和红色曲线分别对应 16 位互补码的 A 码和 B 码基带波形的脉冲压缩处理结果, 绿色曲线为 A 码和 B 码信号进行合成后的处理结果)

Fig. 7 Result after pulse compression processing in CAS-DIS (Lines in blue and red are the pulse compression results of code A and code B of the 16 bits complementary code, and the line in green is the added result of the two codes)

相干积分次数为 100 次的情况下采用 16 位互补码编码的 CAS-DIS 系统脉冲压缩处理后可以获得优于 55 dB 的信噪比.

1.6 天线系统

CAS-DIS 电离层测高仪系统收发天线均采用的是 Delta 天线, 天线从塔顶向两端斜向拉紧, 塔顶处安装负载, 两条水平回线连接馈电巴伦. 在对天线的轴向增益和电压驻波比进行仿真比较之后可以得出以下结论.

(1) 在高度和张角一定的情况下, 双线天线和单线天线的轴向增益差异不明显, 但双线天线的电压驻波比 (VSWR) 要比单线天线低, 如图 8(a) (b) 所示.

(2) 在天线高度一定的情况下, 张角越大低频段的增益越高, 但是高频段的增益变差; 电压驻波比随张角的增大而升高, 特别是在低频段, 如图 8(c) (d) 所示.

(3) 当天线张角一定时, 高度越高天线低频段增益越高, 而高频段增益则需对应一定的高度才能获

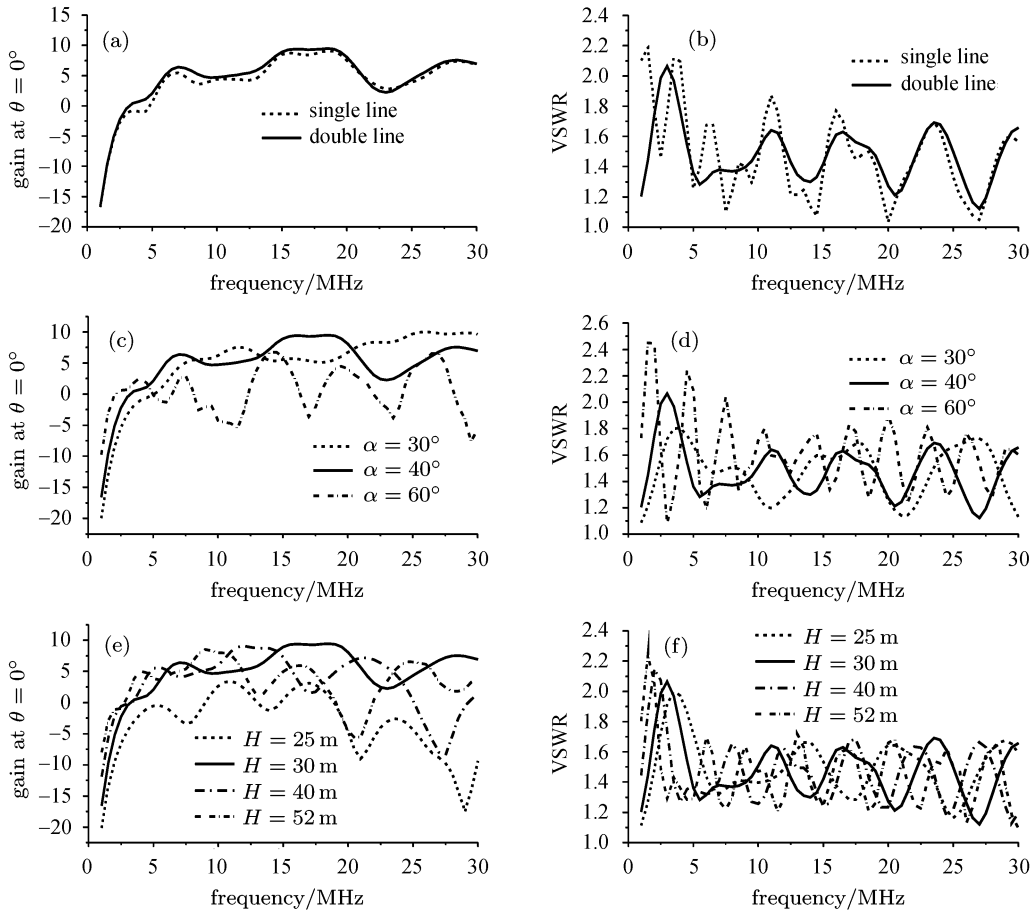


图 8 CAS-DIS 电离层测高仪天线系统仿真结果

Fig. 8 Simulation results of antennas in CAS-DIS

得较好的值, 在低频段电压驻波比随高度的升高而增大, 如图 8(e) (f) 所示.

从以上结论可以看出, 在天线设计时应采用平行双线结构并选择适当的天线高度和张角以改善天线系统的电压驻波比和增益, 考虑到工程实现的难度, 在对 CAS-DIS 电离层测高仪系统进行实际探测时发射天线和接收天线高度分别为 30 m 和 18 m, 张角均为 40°.

2　系统性能测试与分析

为对 CAS-DIS 电离层测高仪系统性能进行测试, 2013 年 4 月在武汉和北京两地进行了垂直和斜向探测实验. 实验时分别在武汉电离层探测标校试验场和位于北京的中国科学院电子学研究所放置一台 CAS-DIS 电离层测高仪设备, 其中位于武汉的设备包括发射机和接收机, 工作于垂直探测模式下, 位于北京的设备只有接收机作为斜向接收, 两台设备之间通过 GPS 同步.

2.1　垂直探测模式

图 9 给出了 CAS-DIS 电离层测高仪垂测系统在武汉电离层探测标校试验场一天中观测到的电离层频高图 (每隔 4 h 一幅图), 从图 9 可以看出, 起测频率在白天和夜晚时段均可达到 1.5 MHz, 如图 9(c) (f)

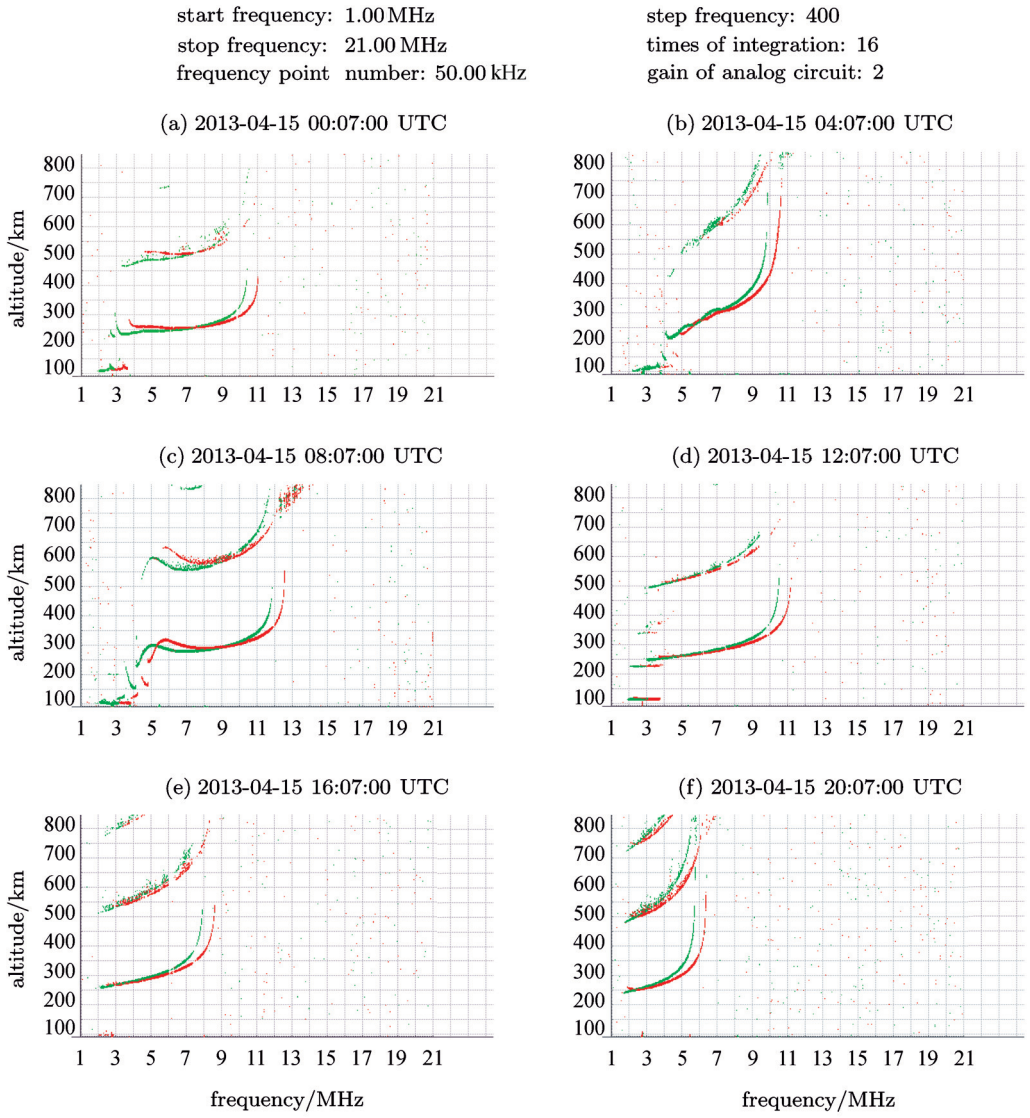


图 9　CAS-DIS 电离层测高仪系统垂测结果 (绿色描迹为 O 波, 红色描迹为 X 波)

Fig. 9　Testing results of CAS-DIS in vertical sounding mode (The curve in green is O wave and red is X wave)

所示; F_2 层截止频率变化较大, 白天可达到 10 MHz 以上, 如图 9(c) 所示, 夜晚在 5 MHz, 如图 9(f) 所示. 另外, 从图 9 还可以看出, 无论是在白天还是夜晚时段, O 波和 X 波的描迹区分都比较明显, 且 F 层的多次回波及其扩展现象均可以被观测到.

2.2 斜向探测模式

图 10 为武汉–北京电离层斜向探测系统在一天中的探测结果, 共给出了 6 幅电离图, 观测时间与垂测系统相对应, 分别为 2013-04-15 00:07:00 UTC, 2013-04-15 04:07:00 UTC, 2013-04-15 08:07:00 UTC, 2013-04-15 12:07:00 UTC, 2013-04-15 16:07:00 UTC 和 2013-04-15 20:07:00 UTC. 与垂直探测模式不同, 电离层频高图在斜向探测模式下纵轴对应的不是电离层描迹对应的虚高, 而是电波在发射和接收端的传播时间, 单位 ms. 从图 10 可以看出, F 层描迹对应的传播时间约为 3.9 ms. 另外, 从图 10 还可以看出, 斜向探测时电波是斜入射, 由于等离子体的折射作用, 使得最大反射频率明显增加, 图 10(a) 中已经超过了系统设定的上限工作频率, 即 21 MHz.

3 结论

提出了一种将射频直接采样数字化的接收方式应用于数字电离层测高仪系统的设计方案, 并将该方

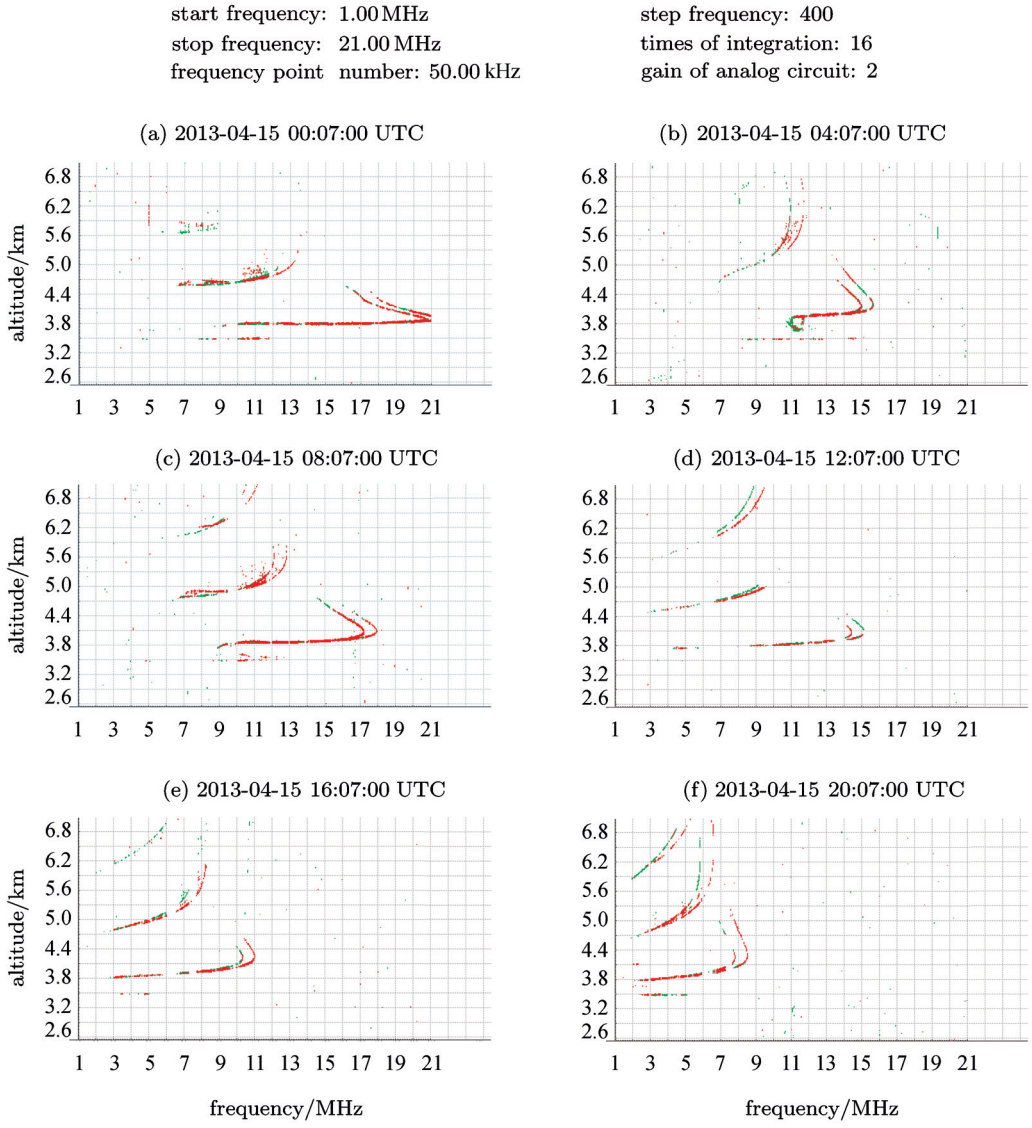


图 10 CAS-DIS 电离层测高仪武汉–北京电离层斜向探测结果

Fig. 10 Testing results of CAS-DIS in Wuhan-Beijing oblique sounding mode

案应用于 CAS-DIS 电离层测高仪系统, 通过在中国武汉电离层探测标校试验场和武汉–北京斜向电离层探测系统中的实际探测实验, 验证了该方案的正确性以及采用该方案设计的 CAS-DIS 电离层测高仪系统的优异性能. 本文所研制的电离层测高仪系统具有以下特点.

(1) 设计中采用了射频直接采样数字化的接收方式. 与现有电离层测高仪相比 CAS-DIS 系统设计中采用 ADC 对射频信号直接进行量化, 对量化后的数字信号进行数字下变频处理, 得到相互正交的 I, Q 分量信号, 有效消除了模拟下变频所带来的 I, Q 通道不平衡的影响.

(2) 设计中数字下变频功能采用 FPGA 实现. 无论是 CADI 系统还是 DPS 系统或 AIS-INGV 系统, 在数字下变频的实现上均采用现有的数字下变频器件, 由于该类型的芯片输出数据位宽有限, 因此 I, Q 输出的动态范围受到限制, 本设计采用 FPGA 逻辑实现数字下变频的功能, 其输出数据位宽可以根据需要进行调整, 有效提高了接收机的动态范围.

(3) 在 CAS-DIS 系统中采用了 16 位互补码编码与数字脉冲压缩技术, 结合相干积分方法来提高系统的信噪比, 在相干积分次数为 100 的闭环测试情况下可以获得 55 dB 的信噪比, 保证了系统的接收性能.

(4) 所设计的 CAS-DIS 电离层测高仪系统既可用于垂测模式, 也可以用于斜测模式, 实验观测表明系统性能可以满足电离层探测的多种需要.

参考文献

[1] Bibl K. Evolution of the ionosonde [J]. *Ann. Geophys.*, 1998, **41**:5-6

[2] Zhu Zhengping, Ning Baiqi, Wan Weixing. Measurement and analysis of ionospheric virtual height with high precision [J]. *Chin. J. Space. Sci.*, 2007. **27**(3):204-210. In Chinese (朱正平, 宁百齐, 万卫星. 电离层虚高的高精度测量与分析 [J]. 空间科学学报, 2007, **27**(3):204-210)

[3] Zhu Zhengping, Ning Baiqi, Sun Fenglou, Chen Kun. Study of passive receiving observation mode for ionospheric digital ionosonde [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(4):389-396. In Chinese (朱正平, 宁百齐, 孙奉娄, 陈锟. 电离层数字测高仪被动接收观测模式研究 [J]. 空间科学学报, 2009, **29**(4):389-396)

[4] Zuccheretti E, Tutone G, Sciacca U. The new AIS-INGV digital ionosonde [J]. *Ann. Geophysi.*, 2003, **46**(4):647-659

[5] Reinisch B W,Galkin I A, Khmyrov G M, *et al*. New Digisonde for research and monitoring applications [J]. *Radio Sci.*, 2009, **44**:1-15

[6] Bassem R Mahafza. Radar System Analysis and Design Using Matlab [M]. London:Chapman and Hall/CRC, 2000:263

[7] Bianchi C, Sciacca U, Zirizzotti A, Zuchheretti E, Baskaradas J A. Signal processing techniques for phase-coded HF-VHF radars [J]. *Ann. Geophys.*, 2003, **46**(4):697-705

[8] Cabrera M A, Zuccheretti E, Ezquer R G, *et al*. Some considerations for different time domain signal processing in pulse compression radars [J]. *Ann. Geophys.*, 2010, **53**(5/6):1-11

[9] Wang Shun, Chen Ziwei, Zhang Feng, *et al*. A method for separating O wave and X wave in digital ionosonde [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(2):186-193. In Chinese (王顺, 陈紫微, 张锋, 等. 一种数字电离层测高仪系统中 O 波与 X 波的分离方法 [J]. 空间科学学报, 2014, **34**(2):186-193

[10] Devies K. Ionospheric Radio [M]. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990:92

[11] Huang X, Reinisch B W. Vertical electron density profiles from the digisonde network [J]. *Adv. Space Res.*, 1996, **18**:121-129

[12] Pezzopane M, Scotto C. Automatic scalling of critical frequency f_0F_2 and MUF(3000)F_2: A comparison between Autoscala and ARTIST 4.5 on Roma data [J]. *Radio Sci.*, 2007, **42**:RS4003

[13] Carlo S. Elecron density profile calculation technique for Autoscala ionogram analysis [J]. *Adv. Space Res.*, 2009, **44**:756-766

[14] Krasheninnikov M, Pezzopane C, Scotto C. Application of Autoscala to ionograms record by the AIS-Parus ionosonde [J]. *Comput. Geosci.*, 2010, **36**:628-635