

高高度脉冲压缩雷达高度表设计实现

刘建新, 齐锐, 许小文, 杨菲

(中国工程物理研究院电子工程研究所 四川 绵阳 621900)

【摘要】依据高高度雷达高度表实际应用,给出了基于脉内线性调频脉间二相编码波形的S波段脉冲压缩雷达高度表系统以及子系统的设计实现方法。结合整机性能飞行验证试验,给出了实际地貌条件下接收机、信号处理脉冲压缩输出及其处理结果,并针对试验结果进行分析。试验结果表明,高高度脉冲压缩雷达高度表具有非常高的测高性能,其各项技术指标达到了设计要求。

关键词 二相编码; 线性调频; 性能测试; 脉冲压缩; 雷达高度表

中图分类号 TN953+.2

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.01.007

Design and Implementation of High Altitude Pulse Compression Radar Altimeter

LIU Jian-xin, QI Rui, XU Xiao-wen, and YANG Fei

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physicals Mianyang Sichuan 621900)

Abstract The present paper describes the studies on an intra-pulses linear frequency modulation (LFM) and inter-pulses binary phase shift keying (BPSK) compression radar altimeter. The design technology on subsystems is given. Performance verification test including the maximum detection height, IF echo signal, pulse compression test results, and final processed output of signal processor in different geomorphies have been presented. Flight test shows that high altitude pulse compression radar altimeter has superior performance in measuring altitude. All specifications are well in accordance with technical requirements.

Key words biphas coded; LFM; performance verification test; pulse compression; radar altimeter

为了使雷达高度表的作用高度得到大幅度提高,所采用的技术途径大多是增大发射功率、提高发射脉冲重复频率或增加发射脉冲宽度,其目的是提高雷达发射脉冲的能量,提升雷达的探测能力^[1]。无论提高上述任何一个参量,都将使雷达设计难度增加。尽管脉冲压缩技术较好地解决了作用高度(峰值功率或信号能量)与距离分辨力的矛盾^[2],但某些应用如高高度雷达高度表的作用高度高达百公里以上,上述技术措施都必须采用,就增加了雷达高度表系统的波形设计和实现难度。这其中包括大功率发射机、高隔离高灵敏接收机以及去模糊去遮挡等波形设计。本文提出一种S波段百公里级大功率S波段脉冲压缩雷达高度表的设计。

1 脉冲压缩雷达高度表波形设计

文献[3]对高高度脉冲压缩雷达高度表相参脉冲压缩波形设计及其信号处理算法进行仿真研究,给

出了基于脉内线性调频脉冲压缩及脉间二相编码PD雷达高度表的波形及其模糊图如图1所示。从模糊图可见,该波形继承了LFM以及二相编码信号的特点,具有较高的距离和速度分辨力。在距离上,距离分辨力取决于压缩后的脉冲宽度,即线性调频脉冲的带宽,其最大不模糊距离为m序列长度与脉冲周期的乘积^[4],但存在二相码自噪声,其距离分辨力由线性调频带宽 B 决定;在多普勒域,该信号具有与传统PD雷达相参脉冲串相同的特性,其速度分辨力取决于发射脉冲的宽度 T ^[5]。

依据匹配滤波理论,基于该信号的雷达,在信号处理上采用两次相参积累处理方法。针对脉内线性调频信号匹配处理(脉压处理)和脉间二相编码的相关多普勒处理,从而获得较高的信号处理增益^[6],也极大地改善了雷达整机的灵敏度,使基于该波形雷达高度表的探测性能提高。

收稿日期: 2011-03-21; 修回日期: 2011-06-21

基金项目: 部级预研项目

作者简介: 刘建新(1966-),男,博士,研究员,主要从事雷达系统设计及其信号处理算法研究方面的研究。

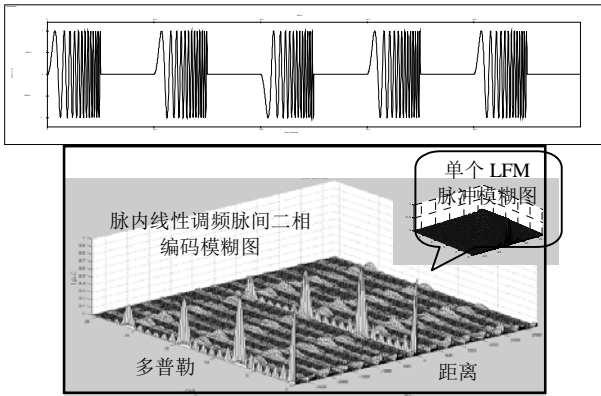


图1 脉内线性调频脉间二相编码信号及其模糊图

线性调频/二相编码脉冲

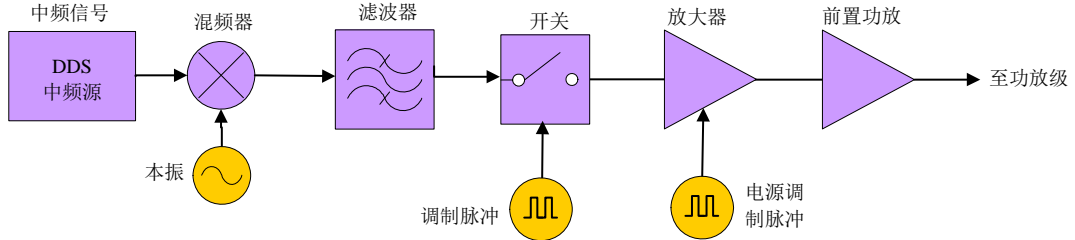


图2 S波段脉冲压缩波形产生原理框图

图3为发射信号的实测频谱, 图中看出脉冲压缩信号的频谱带内不平坦有起伏波纹, 其原因是脉冲间的伪码调制引入的, 这一点有别于传统LFM信号的频谱。

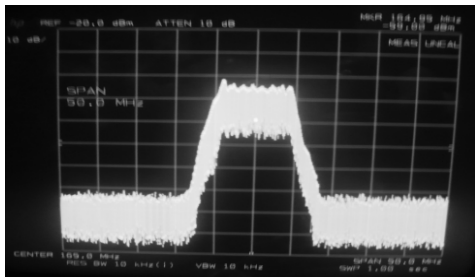


图3 脉内线性调频脉间二相编码信号实测频谱

2 S波段脉冲压缩波形产生

该脉冲压缩波形为复合调制波形, 要产生该波形信号需完成LFM调制、相位调制、脉冲调制。传统方法在射频段实现上述调制电路设计非常复杂。

本文方案如图2所示, 采用DDS在中频上实现上述所有调制, 然后通过一次上变频至微波段。为了提高发射脉冲信号的通断比, 在微波段又进行一次斩波(脉冲调制), 同时采用电源脉冲控制放大器, 这样发射脉冲信号通断比可达100 dB以上。

3 脉冲压缩雷达高度表系统描述

基于脉内线性调频及脉间二相编码高高度雷达高度表系统框图如图4所示。系统采用收发共用天线, 用S波段环行器作为雷达高度表的收发开关, 在接收端的环行器是一个大功率限幅器, 用于对接收机进行保护。在接收机工作期间, 为了抑制来自发射机的强泄漏信号, 在接收机前端采用了开关关断与低噪放电源脉冲控制关断相结合的方法(在中放级仅采用开关封闭, 图中未标识), 对发射机泄漏信号进行封闭, 对发射泄漏信号的抑制可达120 dB以上, 确保接收机高灵敏接收。

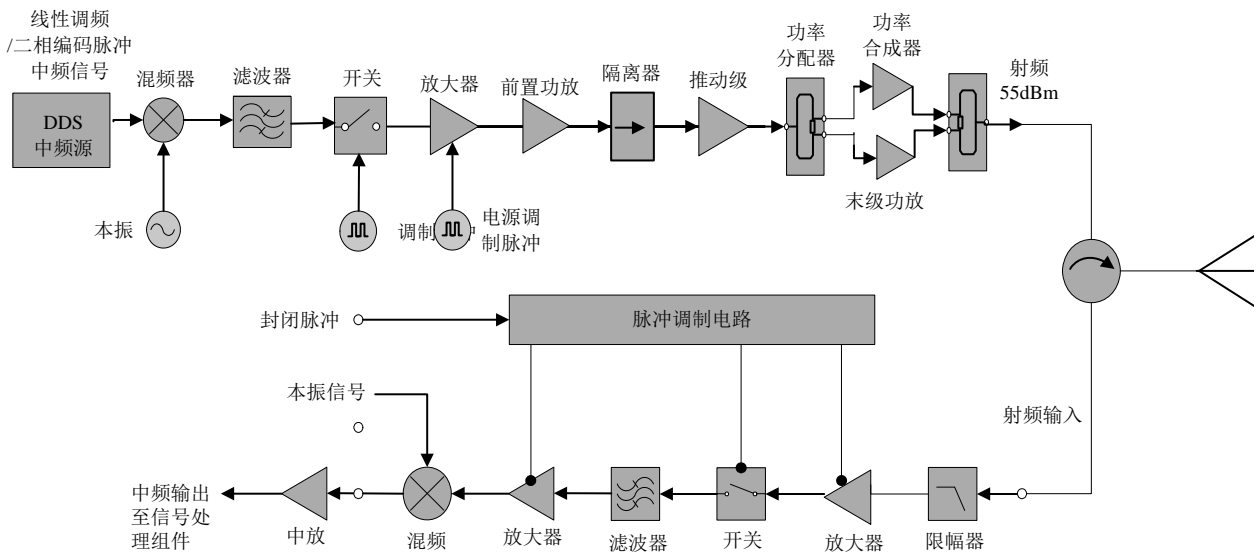


图4 高高度脉冲压缩雷达高度表系统框图(收发系统)

接收信号经一级下变频后送入中放放大后至信号处理器进行数字化处理。图5为实验室接收机中放实测结果。

发射通道将S频段的脉冲压缩信号进行功率推动放大, 并进入功分-放大-合成脉冲峰值功率300 W以上输出。

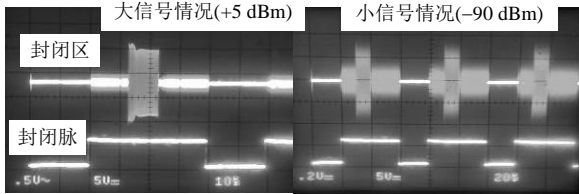


图5 接收机中放输出的测试结果

4 信号处理器

信号处理组件数字化全部在中频进行, 其信号处理算法实现框图如图6所示。通过对脉内LFM及脉间二相编码信号进行二次相参积累实现对目标的检

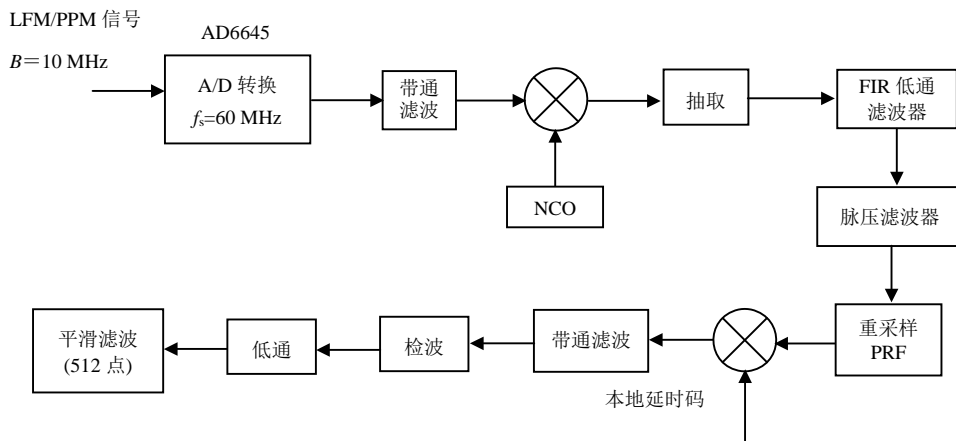


图6 脉内线性调频脉间二相编码雷达高度表信号处理框图

5 脉冲压缩雷达高度表性能验证

5.1 整机性能

实验室测试脉内线性调频脉间二相编码雷达高度表整机达到的主要技术指标: 发射脉冲功率大于300 W; 脉冲压缩处理增益为18.5 dB(理论20 dB);

测, 即脉内相参积累(脉冲压缩)和脉间码相关积累。

带宽10 MHz的LFM中频脉冲串信号进行60 MHz欠/过采样(相对载波为欠采样, 相对信号带宽为过采样)、数字下变频至基带并进行降速率后, 进行脉冲压缩处理; 脉压后的脉冲按距离单元与本地参考码相关, 进而进行脉间相参积累(多普勒滤波)、检波及非相参积累滤波、平滑滤波输出进行门限判决, 完成整个信号处理算法。

在脉冲压缩实现上, 采用了基于DA算法的FIR滤波器实现时域脉压, 脉冲间相参积累多普勒滤波用FFT频域滤波实现。中频采样采用了一片AD6645完成, 信号处理算法采用两片XC2V1000实现设计。其中一片用于完成数字接收机和脉压处理(包含数字前端、发射接收定时控制等)、码处理; 另一片用于实现多普勒滤波及非相参处理。受FPGA芯片容量及速度的限制, 对信号的速率、字长进行了优化, 实现芯片容量、速度以及信号处理性能间的折中。

脉冲占空比为15%; 整机灵敏度为-125 dBm。

5.2 飞行试验验证

为验证脉内线性调频脉间二相编码雷达高度表原理可行性以及在不同地貌条件下的测高性能, 针对不同地貌, 用直升机对高高度脉冲压缩雷达高度表进行挂飞试验。

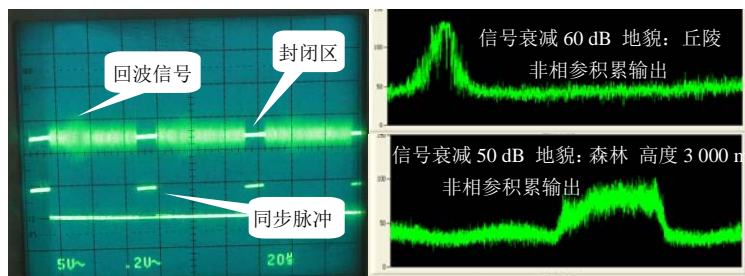


图7 高高度雷达高度表飞行测试结果(高度3 500 m、信号衰减60 dB)

为了得到高高度脉冲压缩雷达高度表最大作用高度,在3 000 m左右高度,通过对射频端口加可变衰减器观测信号处理器的输出,利用雷达高度表方程反推出雷达最大作用高度。实际飞行过程中,记录不同地貌条件下脉冲压缩输出情况,研究地貌对脉冲压缩性能的影响。飞行试验地貌分别为农田、城市、水面以及森林4种地貌。

图7、图8给出了高高度雷达高度表在丘陵(森林)地貌条件下非相参积累滤波后的实测输出(通过雷达高度表的1553B总线)结果,通过chip-scope记录脉

压检波输出以及示波器记录中频放大器输出。为了验证雷达高度表的测高性能,试验时针对不同的地貌对发射信号进行衰。所有测试结果均在弱回波信号条件下测试完成。结果表明,不同地貌(扩展目标)对雷达脉冲压缩性能影响较小,由于脉冲宽度以及调频带宽参数选择得当,文献[7-8]中地表去相关时间对脉冲压缩性能的影响并不显著。此外,试验结果还表明,森林地貌使雷达高度表高度探测能力(信噪比)较丘陵地貌探测能力降低至少10 dB。

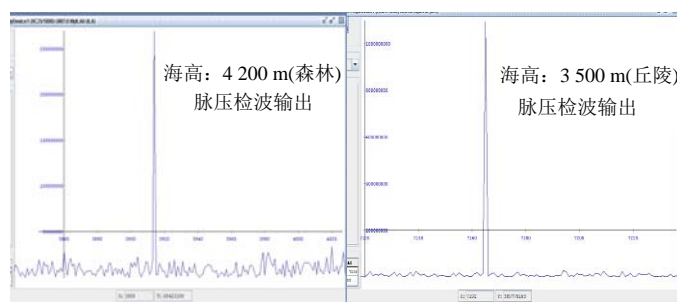


图8 高高度雷达高度表脉压检波输出

6 结 论

根据实际雷达系统参数以及衰减量,估计出高高度脉冲压缩雷达高度表实际作用高度可达300 km以上,即便是在反射特性较差的森林地貌其作用高度也可达100 km以上。不同地貌去相关特性对脉冲压缩性能的影响相对较小。然而,由于脉冲压缩采用长脉冲发射,目标回波起伏对脉冲压缩性能的影响相对较大。通过整机性能飞行试验,充分验证了该脉压雷达高度表波形体制可行性以及整机设计的有效性,其技术指标达到设计要求。

雷达高度表的研制成功,在高高度雷达高度表系统及组件的设计、优化,尤其在复杂脉冲压缩波形设计方面提供了有价值的信息。

参 考 文 献

- [1] 朱启明. 雷达高度表设计理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
ZHU Qi-ming. Basic theory and design of radar altimeter [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1992.
- [2] LEVANON N. Radar signal[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2004.
- [3] 刘建新. 脉冲压缩多普勒雷达高度表信号处理算法设计[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(3): 1-4.

- LIU Jian-xin. Signal processing algorithm for pulse compression Doppler radar altimeters[J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(3): 1-4.
- [4] AXELSSON S R J. Suppressed ambiguity in range by phase-coded waveforms[C]//2001 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, US: IGARSS. [S.l.]: IEEE, 2001: 2006-2009.
- [5] 殷国平, 曹旭平, 崔占忠. 伪码调相与线性调频调制信号探测性能研究[J]. 弹箭与控制学报, 2007, 27(2): 280-282.
YIN Guo-ping, CAO Xu-ping, CHUI Zhan-zhong. Research on detection performance of complex modulation signal using pseudorandom code phase modulation and linear frequency modulation[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(2): 280-282.
- [6] 刘建新, 陈惠连, 向敬成. 脉间二相编码脉冲信号的多普勒处理[J]. 信号处理, 2003, 19(2): 132-134.
LIU Jian-xin, CHEN Hui-lian, XIANG Jing-cheng. Doppler processing for pulse to pulses biphase coded pulse wave[J]. Signal Processing, 2003, 19(2): 132-134.
- [7] SHAPIRO A, YAPLEE B S. Anomalous radar backscattering from terrain at high altitudes[J]. IEEE proceedings letters, 1975(63): 717.
- [8] KOZU T. Effects of signal de-correlation on pulse compressed waveforms for nadir-looking space-borne radar [J]. IEEE Trans on Geo-Science and Remote Sensing, 1991, 29(5): 786-790.

编辑 漆蓉