

无人机载 3 mm 波脉冲雷达信号处理系统*

肖国强** 向敬成 胡美莉

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】 介绍了一个采用专用 DSP 芯片 PDSP16510 以及大规模 PLD 芯片 PLEX10K 实现的无人机载 3 mm 波脉冲雷达信号处理系统。并对机载雷达普遍存在的主杂波抑制问题, 提出一种在回波视频信号上抑制主杂波的方法。该系统具有处理速度快、分辨率高和灵活的可编程方式的特点, 以及重量轻、体积小、可靠性高的工程实用性, 并给出了具体实验测试结果。

关键词 无人机; 脉冲雷达; 动目标检测; 主杂波; 机内自检

中图分类号 TN959.1

70 年代以来, 国外已先后研制了 J、K、L、M 等波段的无人机载试验雷达。由于毫米波 (M 波段) 雷达可以用较小孔径的天线得到较高的角分辨率和天线增益, 并且频带宽, 抗多径效应和抗干扰性能好^[1], 与 J、K 波段的侦察雷达相比, 毫米波雷达更便于小型化和轻型化。因此, 它更适合装备在无人侦察飞机上。毫米波雷达在较差的气象条件和战场烟雾环境中, 还具有比红外和光学侦察设备更好的探测性能。所以, 它可以在红外和光学侦察设备无法工作的恶劣环境下, 完成实时战场侦察任务。

1 系统简介

无人机载雷达主要用于从空中获取战场信息, 监视打击目标和评估打击效果。该试验雷达有五种工作模式: 1) 机载动目标检测 (MTD) 模式; 2) 机载高分辨率地图模式 (HRGM); 3) 地面动目标检测模式; 4) 地面高分辨率地图模式; 5) 计算机实时采集模式。

图 1 是该雷达信号处理系统框图。雷达系统采用全相参脉冲多普勒体制, 高分辨率实孔径成像。I、Q 是接收机输出的双极性正交视频信号, 经 8 位 A/D 变换器进行量化处理, 采样率为 50 MHz。A/D 采样后的数据送到高速乒乓缓存, 每个存储器容量为 $64k \times 16$ bits, I、Q 支路各 8 位, 存放 256 个重复周期、256 个距离单元的回波信息。256 个距离单元提供了大约 1km 的距离覆盖, 且能在雷达距离全程范围内滑动, 以使雷达在不增加系统设备量的情况下, 能观察距离全程。

目标及背景信号经门限判决后, 送目标合成单元电路。雷达工作在地面时, 目标及背景还进行 4 帧或 12 帧的非相参积累, 以进一步提高信噪比, 从而可以使最小可检测信噪比降低, 提高雷达检测目标的能力。经非相参积累的目标及背景信号作对数处理后, 送显示终端。

1.1 高分辨率地图模式

高分辨率地图模式是利用雷达系统发射窄脉冲和本身具有的窄方位波束 ($\theta_A = 0.4^\circ$) 获得较高的纵向和横向距离分辨率, 通过实孔径成像。操作人员从雷达图像上判读地面目标时, 能否发现目标或识别目标取决于目标尺寸所包含的雷达地面分辨单元数。由判读目标的实践得知^[2]: 对发现目标, 只需目标尺寸包含在一个地面分辨单元内 (一个亮点) 就够了, 若要分辨目标的形状, 目标的最短维尺寸应包含 4 个以上的分辨单元。根据这一经验数据, 该雷达在 1~3 km 探测距离上, 能发现车辆、飞机、坦克、机场、道路、港口、军事工事、城市等目标; 能识别机场、道路、港口、军事工事、城市等人工目标。

1998 年 11 月 24 日收稿, 1998 年 12 月 16 日修改定稿

* 电子部“九五”预研基金资助项目

** 男 30 岁 博士生

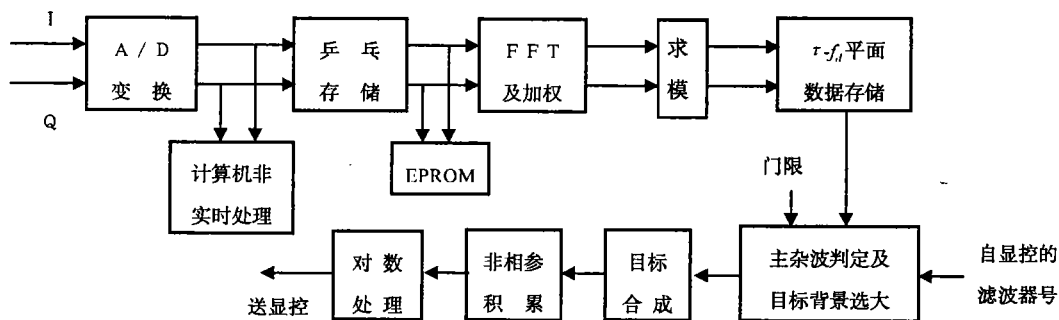


图1 雷达信号处理机框图

1.2 动目标检测模式

动目标检测是雷达信号处理中常见的方法之一。由于毫米波雷达的工作波长短,所以雷达回波信号的多普勒频率含量丰富,进行MTD处理可以得到较多的目标信息。快速傅氏变换是进行MTD的常用手段,FFT在频域上形成窄带多普勒滤波器组,只要判断各滤波器有无输出就可有效地检测运动目标及其速度。

该系统中,FFT采用Plessey公司的专用DSP芯片PDSP16510。该芯片能在 $97\mu\text{s}$ 内完成1024点复FFT,作256点复FFT只需 $20.4\mu\text{s}$ 。在256点复FFT模式下,因为芯片具有内部缓存,适当选择采样频率,可以进行连续的FFT处理。由于采用高速FFT芯片,使得在相同时间内能完成更多点数的FFT,在脉冲重复频率不变的条件下,使每个窄带多普勒滤波器的带宽更窄,从而有助于提高雷达的谱分辨率。雷达脉冲重复周期PRI= $40\mu\text{s}$,故雷达有25kHz的多普勒带宽。MTD中FFT点数为256,所以窄带多普勒滤波器的带宽约为98Hz,从而可以看出该雷达系统具有较高的谱分辨率。

2 主杂波抑制

由于雷达平台的运动,引起雷达回波信号中的地杂波频谱结构发生变化,地杂波频谱展宽^[3]。地杂波谱由主杂波、高度线杂波和旁瓣杂波谱构成。主杂波中心谱线随着天线扫描而产生多普勒频移,其多普勒频移由下式确定

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} \cos \alpha \cos \beta \quad (1)$$

式中 λ 为波长; V 为载机飞行速度; α 为方位波束中心线与 V 的夹角; β 为俯角。频谱还具有一定宽度,其多普勒频率的带宽为

$$\Delta f_d = \frac{2V}{\lambda} \cos \beta \left[\cos \left(\alpha - \frac{\Delta \theta}{2} \right) - \cos \left(\alpha + \frac{\Delta \theta}{2} \right) \right] \approx \frac{2V}{\lambda} \Delta \theta \cos \beta \sin \alpha \quad (2)$$

式中 $\Delta \theta$ 为方位波束3dB点角宽。由式(1)可知,由于天线的扫描以及载机速度的变化都会导致主杂波中心谱线产生频移,在MTD模式时,将对目标回波信号造成干扰,并严重降低MTD的性能。所以,必须对主杂波加以抑制。

机载雷达主杂波的抑制常采用主杂波频率跟踪技术^[4-5]。此方法是在回波信号中频上,采用锁相技术对主杂波中心频率进行动态跟踪,对接收通道混频器本振频率作主杂波多普勒频率补偿,使混频后主杂波的多普勒频移趋于零。由于在中频对雷达回波信号进行处理,技术要求高,系统也较复杂,而且,由于环路稳定性和鉴频零点漂移等因素的影响,使得要实现高精度的主杂波频率跟踪比较困难。

利用无人机飞行速度较慢 (≤ 42 m/s), 天线扫描范围及波束较窄 ($\pm 20^\circ$ 和 0.4°) 的特点, 我们采用一种在视频上进行主杂波抑制的方案。这一方法采用数字技术, 简单易行, 特别适用于无人机载雷达^[9]。由 256 个重复周期、256 个距离单元的回波数据经 FFT 处理及求模后, 存入 $64\text{k} \times 8$ bits 的存储器, 形成一帧 $\tau\text{-}f_d$ 平面数据。

平台运动所引起的主杂波中心频率的偏移与天线方位扫描角 α 、载机高度 H 和距离 R 有关。在一个相干处理帧中 ($256T_r = 10.24$ ms), 雷达天线方位角变化很小。以 $10^\circ/\text{s}$ 的天线扫描速度为例, 在一帧中, 方位角仅变化 0.1° 。在飞行高度 H 和距离 R 一定的情况下, 由于天线不进行俯仰扫描, 因此, 主杂波中心谱线的频率变化不大 (在 $H=400$ m, $R=1\ 500$ m 时, 距离向的变化约 250 Hz 左右), 所以, 在 $\tau\text{-}f_d$ 平面内, 不同距离单元的主杂波谱线所处的滤波器号几乎相同, 而目标是随机的, 不同距离单元上出现的目标, 它们的运动速度不会完全相同, 因此, 目标将随机地分布在不同的滤波器中。在 $\tau\text{-}f_d$ 平面内, 对不同距离单元的同一号滤波器的输出进行相加求和, 其和值最大的一项所对应的滤波器就是主杂波中心位置所占据的滤波器, 从而就可以判断出主杂波中心所处的位置。

主杂波中心判断框图如图 2 所示。一帧 $\tau\text{-}f_d$ 平面数据是按距离单元顺序存放, 因此, 其高 8 位地址刚好代表距离单元数, 低 8 位地址则代表滤波器号。读取数据时, 按滤波器号的顺序读取, 对同一号滤波器的数据进行累加求和, 其结果与和值锁存器中的数据进行比较, 如果和值较大则存入锁存器, 反之, 则锁存器内容不变。在每帧数据判断之前和值锁存器被清零。同时, 比较器的结果控制地址锁存器, 地址锁存器的输入为低 8 位地址, 即滤波器号。当和值较大时, 地址锁存器锁存新地址, 否则地址锁存器内容不变。因此, 当判断结束时, 地址锁存器中的地址就是主杂波中心所对应的滤波器号。

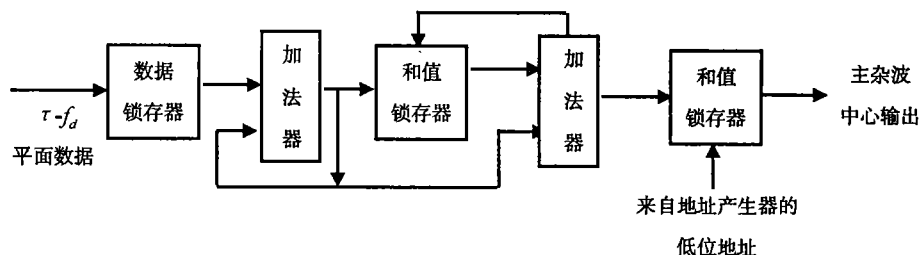


图 2 主杂波中心判断框图

3 自检系统

信号处理机具有机内故障自动诊断能力, 故障点定位到重要模块。在每次天线扫描中, 由伺服系统送来一个正程扫描起止信号, 当信号处理机收到正程扫描信号时, 信号处理机开始工作 (判断目标); 当收到止信号时, 信号处理机将数据进行切换, 即将接收机输入的回波数据切换为自检信号, 在每次天线扫描的逆程时间内, 完成对 A/D 变换器、FFT 及求模、主杂波判定、动目标选大、背景输出和非相参积累等模块进行功能测试, 并输出相应的 BIT 信号到显控。

4 测试结果

这里主要测试雷达信号处理系统的平均信噪比改善因子和平均信杂比改善因子两个重要指标, 同时对主杂波中心判定结果进行测试。改善因子定义为在目标所有可能的径向速度上取平均后, 输出信号杂波 (噪声) 比与输入信号杂波 (噪声) 比的比值。信噪比改善因子反映了信号处理系统抑制噪声的能力。信杂比改善因子衡量 MTD 中信号处理系统对杂波的抑制能力。

表 1 和表 2 给出了部分平均信噪比改善因子和平均信杂比改善因子的测试结果。表中数据考虑了 3 dB 的平均改善因子与滤波器中心频率下改善因子的校正值。表 2 中的主杂波中心频率为 4 kHz。

由表2可见,平均信噪比改善因子 ≥ 21 dB,平均信杂比改善因子对慢速目标 ≥ 20 dB,对快速目标 ≥ 25 dB,均达到系统设计要求。

在上述各种信噪比和信杂比,以及主杂波产生不同多普勒频移的情况下进行主杂波判定,系统均能对主杂波中心位置所处的滤波器号进行正确地判别。

表1 平均信噪比改善因子测试结果

f_d/kHz	Δ_q/dB	$(S/N)_0/\text{dB}$	I_{NN}/dB
4.79	0	24.02	21.02
15.63	0	24.64	21.64
21.48	0	24.08	21.08

表2 平均信杂比改善因子测试结果

f_d/kHz	$(S/C)_i/\text{dB}$	$(S/C)_0/\text{dB}$	I_{SC}/dB
4.79	0	23.21	20.21
15.63	0	28.63	25.63
21.48	0	28.36	25.36

5 结 束 语

本文研究的无人机载3 mm波脉冲雷达实验系统处理速度快,具有高的距离分辨率、角分辨率和谱分辨率。该系统还具有机内故障自动诊断能力,达到准实时地对机内重要模块进行自检,并输出相应的自检信号。该系统平均信噪比改善因子 ≥ 21 dB,平均信杂比改善因子对慢速目标 ≥ 20 dB,对快速目标 ≥ 25 dB。由于采用大规模可编程器件,使整个系统体积小、重量轻、功耗低,而且工作的可靠性和稳定性得到大大提高,已接近于工程样机。

参 考 文 献

- 1 向敬成,张明友. 3 mm 雷达技术的现状和发展动向. 电子科技大学学报 1991, 增刊:14~25
- 2 巴顿 K J 威尔茨 J C 编,方再根,刀育才译. 毫米波雷达. 北京:电子工业出版社,1989 出版社,1991
- 3 毛士艺,张瑞生,许伟武等. 脉冲多普勒雷达. 北京:国防工业出版社,1991
- 4 Morris G V 著,季 节,许伟武译. 机载脉冲多普勒雷达. 北京:航空工业出版社,1990
- 5 刘光祐,赵俊声,向敬成. 机载 MTI 雷达主瓣杂波频率高精度跟踪. 现代雷达. 1990 (5):98~104
- 6 肖国强,胡美莉,向敬成. 无人机载脉冲雷达主杂波抑制的一种方法. 系统工程与电子技术, 1998, (12):24~28

A Signal Processing System of 3 mm-wave Pulse Radars for RPVs

Xiao Guoqiang Xiang Jingcheng Hu meili

(College of Electronic Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract A signal processing system of 3mm-wave pulse radars for RPVs is accomplished with DSP chip PDSP16510 and PLD Flex10k. The method of suppressing the main lobe clutter of airborne pulse radars in video signal processing system is proposed to deal with the problem generally existing in airborne radars. The system has the advantages of high processing speed high range and spectrum resolution and easily programmable control. It also has the features of light weight small volume and high reliability. The measuring results are also given in this paper.

Key words remotely piloted vehicle; pulse radar; moving target detection; main lobe clutter; build-in test