

频率步进与脉冲多普勒复合兼容性设计

林德福¹, 沈吉², 张伟¹, 祁载康¹

(1. 北京理工大学机电控制工程系, 北京 100081; 2. 中国电子技术标准化研究所, 北京 100007)

摘要: 研究基于圆锥扫描体制下, 频率步进与脉冲多普勒(PD)复合的兼容性设计. 从理论上分析了频率步进与脉冲多普勒信号的选择方法, 探讨了两种体制转换的工程算法及其实现, 并通过外场试验对毫米波导引头系统在频率步进和脉冲多普勒模式下分别对静止目标和运动目标的最大作用距离与圆锥扫描测角进行实验验证, 结果表明频率步进与脉冲多普勒复合体制下的静动目标距离分辨与测角是可行的.

关键词: 频率步进; 脉冲多普勒; 圆锥扫描

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12A-2410-04

Design of Compatibility of Stepped Frequency and Pulse Doppler

LIN De-fu¹, SHEN Ji², ZHANG Wei¹, QI Zai-kang¹

(1. School of Mechano-Electronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. China Electronics Standardization Institute, Beijing 100007, China)

Abstract: The compatibility of the stepped frequency mode and pulse Doppler mode has been studied based on the conical scanning system. The signal selection between stepped frequency and pulse Doppler was analyzed in theory. The arithmetic and the application of the conversion between the two systems were discussed. Outside test was validated about high range resolution and angle measure of MMW seeker under the composite system of stepped frequency and pulse Doppler. The result shows that the high range resolution and angle detect for rest and move target is feasible based on the composite system of stepped frequency and pulse Doppler.

Key words: stepped frequency; pulse Doppler; conical scanning

1 引言

频率步进脉冲压缩模式和脉冲多普勒模式是毫米波复合探测系统中的两种工作模式, 两者在系统的工作过程中具有不同的作用和功能. 频率步进脉冲压缩模式在径向距离上, 对目标具有高距离分辨的能力, 可以用于对目标进行识别. 由于背景杂波等影响, 系统工作在高距离分辨频率步进脉冲压缩模式下的作用距离相对有限, 理论计算在 1.5 km 左右, 因而主要是对较近距离的静止目标进行检测、识别和跟踪. 脉冲多普勒体制对背景杂波有很强的抑制能力, 系统在该模式下工作, 作用距离相对较远, 理论计算在 2.8 km 左右, 可以对较远距离的运动目标进行检测和跟踪. 但脉冲多普勒体制的识别目标能力较差, 只能区分出具有相对运动的目标. 这两种不同工作体制应用在毫米波探测系统中时, 可以相互弥补, 有效的提高系统的作用距离.

2 信号波形的产生

毫米波复合探测系统是一个全相干的系统, 其信号的产

生是通过频率合成器来实现的. 通过频率合成器的控制端口, 设计一个模式转换控制器开关, 可以实现高距离分辨频率步进工作模式和脉冲多普勒工作模式之间的转换, 根据不同的工作模式产生不同的信号波形. 图 1 所示的毫米波复合探测系统, 两种工作模式之间的转换时间小于 1 μ s.

毫米波复合探测系统工作模式之间的转换是由微控制器来控制的, 通过微控制器产生模式控制字, 提供给频综的控制端口, 来实现工作模式之间的转换. 若毫米波复合探测系统工作于频率步进高距离分辨体制, 由微控制器产生频率步进跳频的控制字, 提供给频综的控制端口. 同样, 若毫米波复合探测系统工作于脉冲多普勒体制, 由微控制器产生脉冲多普勒的控制字, 提供给频综的控制端口, 以实现脉冲多普勒工作方式.

作为毫米波复合探测系统重要组成部分的数字信号处理机处理模式的转换, 则是根据系统的实际工作过程来实现. 若系统工作于脉冲多普勒模式, 则 PRF 是可选择的, 即脉冲多普勒可具有多重 PRF, 由数字信号处理机根据处理器的响应选定合适的 PRT, 以解决高 PRT 时的遮蔽效应, 同时利用二重

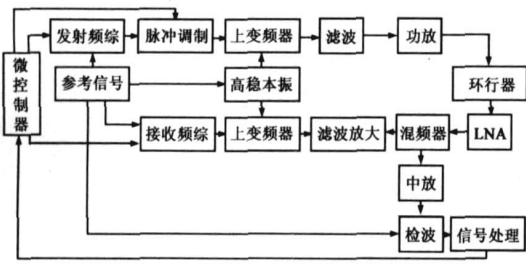


图 1 频率步进与脉冲多普勒复合体制的实现框图

或双重 PRF 解除距离模糊, 提高脉冲多普勒模式下的测距精度。此时微处理机工作于固定频段。

若数字信号处理机选定系统工作于频率步进模式, 则两个频综在微处理器的控制下实现频率同步步进, 两个频综输出的频率一直相差一个固定的中频。频率步进高距离分辨体制和脉冲多普勒体制共用一套射频收发系统, 在实现上比较简单, 仅通过一个控制器就可以实现工作模式的转换, 因此没有太多的增加系统的负担和成本, 可以共用一套信号处理器, 只需更换算法, 对硬件没有额外的要求。

在频率步进高距离分辨和脉冲多普勒的复合体制系统中, 可以不去苛求常规脉冲多普勒体制下的低副瓣要求。因为毫米波复合探测系统工作于脉冲多普勒模式的时间很短, 毫米波复合探测系统在远距离探测搜索运动目标后, 很快就会转入频率步进高距离分辨模式。在脉冲多普勒模式下, 还可以采用距离选通门的措施来抑制副瓣回波对系统的影响。

3 目标的跟踪

频率步进脉冲压缩是利用圆锥扫描来获取目标角度误差, 角度误差值的提取可以利用电压投影法来完成。投影法的原理认为 IFFT 变换的最大幅所代表的回波电压在水平和垂直两方向上的投影值不大时, 近似正比于导引头位标器的输出角误差 Δx 和 Δy , 计算公式见式 (1) 和式 (2)。其中, k_k 是角度比例系数; N 是天线锥扫一周内包含的发射帧; U 是目标回波的 IFFT 幅值; y_j 是 $U(j)$ 对应的天线转角。

$$\Delta x = k_k \frac{\sum_{j=0}^{N-1} U(j) \cos y_j}{\sum_{j=0}^{N-1} |U(j) \cos y_j|} \quad (1)$$

$$\Delta y = k_k \frac{\sum_{j=0}^{N-1} U(j) \sin y_j}{\sum_{j=0}^{N-1} |U(j) \sin y_j|} \quad (2)$$

对于脉冲多普勒工作模式的角度提取, 同样也可以利用圆锥扫描状态下的电压投影法来完成。只不过是 FFT 的最大幅值来代替频率步进脉冲压缩的 IFFT 最大幅, 关系见式 (3) 与 (4), 其中, k_k 是角度比例系数; N_1 是天线锥扫一周内包含的发射帧; U_i 是第 i 个多普勒速度对应的幅值; y_j 是 $U_i(j)$ 对应的天线转角。

$$\Delta x_i = k_k \frac{\sum_{j=0}^{N_1-1} U_i(j) \cos y_j}{\sum_{j=0}^{N_1-1} |U_i(j) \cos y_j|} \quad (3)$$

$$\Delta y_i = k_k \frac{\sum_{j=0}^{N_1-1} U_i(j) \sin y_j}{\sum_{j=0}^{N_1-1} |U_i(j) \sin y_j|} \quad (4)$$

4 体制转换与工程算法

毫米波复合探测系统工作体制的转换是基于不同的战术指标要求。毫米波复合探测系统在启动工作后, 首先工作于脉冲多普勒体制, 从较远距离开始对运动目标进行搜索, 若能检测到运动目标的存在, 则按一定的规则初步选定要攻击的目标, 并锁定、跟踪该运动目标。然后, 在一定的延迟条件下, 迅速切换到频率步进高距离分辨工作模式, 利用频率步进高距离分辨工作模式的高距离分辨能力来区分具有同一多普勒频率的不同目标形式, 经数字信号处理机按照一定的规则综合分析后, 最终选定要打击的目标, 并进行有效跟踪。

若工作在脉冲多普勒模式的毫米波复合探测系统没有发现具有相对运动的目标, 则系统应迅速转入频率步进高距离分辨工作体制, 通过对毫米波回波进行高距离分辨波形的合成来搜索静止目标, 一旦发现目标的存在, 马上就开始对目标进行识别和角度误差的提取, 最后跟踪目标。

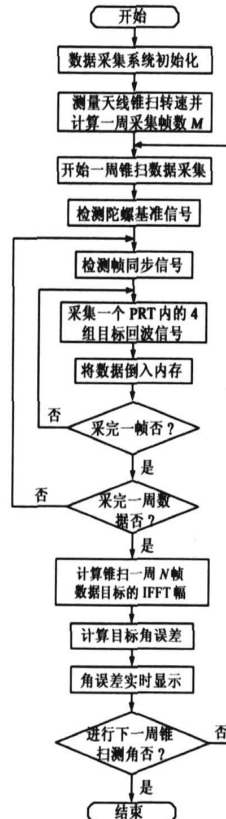


图 2 频率步进体制测角软件流程图

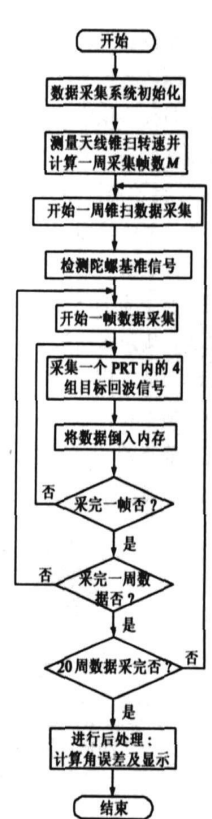


图 3 脉冲多普勒体制测角软件流程图

毫米波雷达在两种体制下的测角程序流程如图 2 和图 3 所示。在频率步进体制下, 帧同步为大同步, 同步周期为 127 个脉冲的同步周期之和, 故需要进行帧同步的检测, 并测量帧同步相对陀螺基准的滞后时间。在脉冲多普勒体制下, 脉冲间没有跳频, 发射脉冲的频率相同, 因此从任何脉冲开始一帧采集都可以, 在这种体制下不需要检测帧同步, 只需要采集特定的脉冲数即可, 当然也就不需要测量帧滞后角。在频率步进体制下目标为静止目标, 目标始终在雷达的视场内, 因此, 实验

系统可以实时采集实时显示测得的角误差。对于动目标，目标会逐渐运动跑出雷达视场，因此在目标经过给定的位置时进行采集，连续采集多周，采集完成后进行后处理，通过计算后显示角误差结果。

5 频率步进与脉冲多普勒体制下的距离分辨与测角

对毫米波导引头系统在频率步进模式和脉冲多普勒模式下对静止目标及运动目标的最大作用距离及圆锥扫描测角进行实验。其中雷达系统在频率步进模式测静目标，在脉冲多普勒模式下测动目标。频率步进实验结果横坐标为距离窗口，距离窗口宽度为 $0.3 \times 16 = 4.8$ m，距离分辨单元为 0.3 m，纵坐标为经 IFFT 处理后的归一化结果幅值。频率步进实验数据信号处理为 64 点 IFFT 处理。脉冲多普勒实验结果横坐标为频域窗口，窗口宽度为 PRF，频率分辨单元为 PRF/128，纵坐标为经 FFT 处理后的归一化结果幅值。脉冲多普勒实验数据处理为 128 点 FFT 处理。

图 4 为频率步进体制下目标分别位于 730 米和 1055 米处的一维距离像，目标 IFFT 幅仍较高，能够检测到目标，当目标大于此距离时较难检测到目标，因此频率步进体制下毫米波雷达的最大作用距离约为 1055 米。图 5 为脉冲多普勒体制下运动目标分别经过 1765 米(目标运动速度 36.16km/h)，2145 米(目标运动速度 30.13km/h)时的目标检测结果，在此距离上能够检测到目标。由于实验场地所限，无法进行更远距离的目标检测实验，因此脉冲多普勒体制下毫米波雷达的最大作用距离至少为 2145 米。由此我们可知脉冲多普勒体制下系统的最大作用距离比频率步进体制大至少一倍，因此在两种体制相结合的工作方式下，对预计目标出现的区域，首先应该从远距离搜索动目标；当没有搜索到动目标时，则转入在近距离下搜索静目标，该复合体制符合工程实际需要。

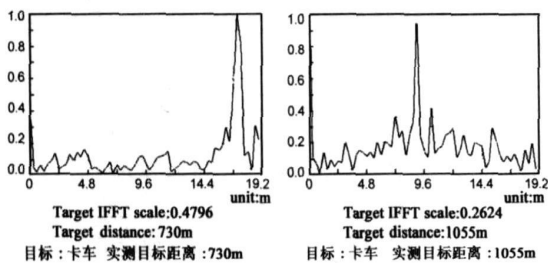


图 4 频率步进体制下试验结果

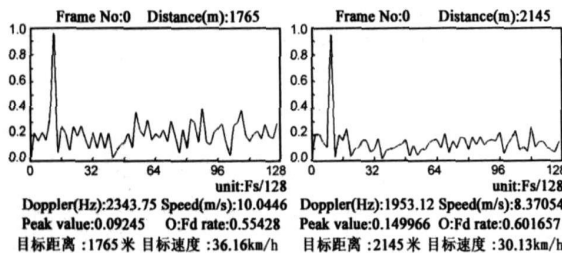


图 5 脉冲多普勒体制下试验结果

采用圆锥扫描测角方法来提取目标角误差，因此有必要通过实验来验证锥扫测角方案的可行性。角误差提取采用傅氏变换法，分别进行频率步进体制和脉冲多普勒体制下的锥

扫描角实验。

实验场地形条件如图 6 所示，静目标测角交叉路口为锥扫中心，雷达距锥扫中心的斜距 $L_s = 500$ m，动目标测角锥扫中心距雷达斜距 $L_M = 250$ m。

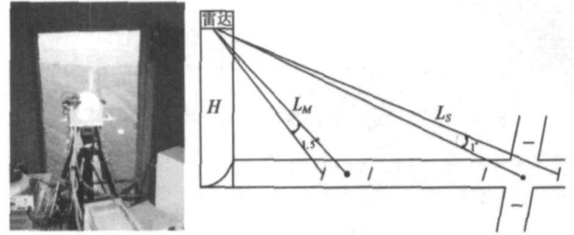


图 6 测角实验场几何地形图

频率步进体制下静目标测角实验采用定标法，首先将交叉路口作为锥扫中心点，使锥扫天线的机械轴对准该中心；然后由雷达所在高度和雷达距中心点的距离，计算出对应四个坐标轴方向角误差为 1° 的位置距中心点的距离，并在对应的位置上设立标记；接着让卡车依次停在指定各方向的位置上，利用雷达系统测量卡车目标与锥扫中心的角误差并实时处理显示。在每个位置，存储若干组测角实验结果，每组采集 20 周数据，以验证测角的稳定性。

在脉冲多普勒体制下测角，首先在纵向确定一个中心点，使锥扫天线机械轴对准该中心位置。在对应纵向正负方向角误差约为 1.5° 的地方设立标记，让卡车依次行驶过指定两个方向的位置，当卡车经过指定位置时，完成数据采集与存储，每个位置采集若干组数据，每组采集 20 周测角数据。对于横向测角，则将雷达天线分别向左和向右偏转约 1.5° ，使目标驶

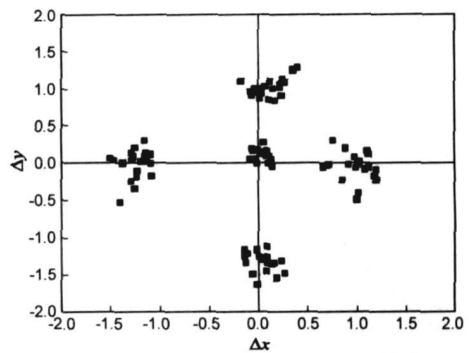


图 7 频率步进体制下各位置的 20 次测角结果

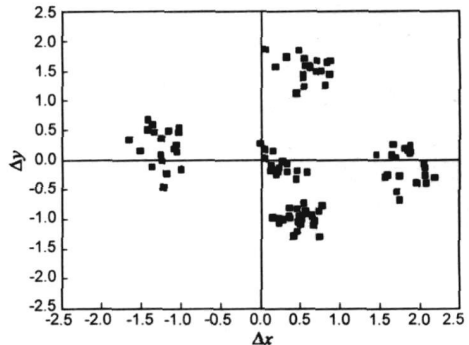


图 8 脉冲多普勒体制下各位置的 20 次测角结果

过中心位置，当目标经过中心位置时，完成数据采集与存储。

图 7 为对同一位置连续采样 20 次得到的静目标测角实验结果. 图 8 给出了每个位置 20 次动目标测角实验结果. 由测角结果可以看出, 在频率步进和脉冲多普勒体制下在各位置的连续 20 次测角可以提取出较稳定的角误差, 实验重复性较好. 因此我们可以得出结论: 锥扫描测角方法用于频率步进体制下的静目标测角和脉冲多普勒体制下的动目标测角是可行的.

6 结束语

高距离分辨频率步进脉冲压缩模式和脉冲多普勒模式在系统的工作过程中具有较强的互补性, 可以有效的提高系统的作用距离. 通过对该系统复合兼容性分析, 研究了工程化算法设计并对两种体制进行了外场动静目标距离分辨与测角试验验证, 试验结果证明频率步进体制下的静目标距离分辨与测角和脉冲多普勒体制下的动目标距离分辨与测角是可行的.

参考文献:

- [1] 沈吉. 耐高过载主动毫米波/被动双色红外亚成像复合导引头总体技术研究[D]. 北京: 北京理工大学博士学位论文, 2001. 32- 37.
Shen Ji. Research on the overall technology of the initiative MMW/ passive IR imaging composite seeker[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2001. 32- 37. (in Chinese)
- [2] 沈吉, 向锦武, 祁载康. 运动目标对步进频率毫米波雷达锥扫描测角的影响研究[J]. 电子学报, 2004, 32(6): 987- 989.
Shen Ji, Xiang Jin-wu, Qi Zai-kang. Research on the effect of the moving target on the conical scan angle of the stepped frequency MMW seeker[J]. Beijing: Acta Electronica Sinica, 2004, 32(6): 987- 989. (in Chinese)
- [3] 沈吉, 向锦武, 祁载康. 圆锥扫描对步进频率体制毫米波

雷达一维距离像的影响研究[J]. 弹箭与制导学报, 2003. 23(2): 21- 26.

Shen Ji, Xiang Jin-wu, Qi Zai-kang. Research on the effect of the conical scan on the one dimensional imaging of the stepped frequency MMW seeker[J]. Xi'an: Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2003, 23(2): 21- 26. (in Chinese)

- [4] 杨军. 双色红外/毫米波复合制导技术研究[D]. 北京: 北京理工大学博士学位论文, 1998. 72- 83.

Yang Jun. Research on the IR/ MMW composite guidance technology[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1998. 72- 83. (in Chinese)

- [5] 薛良金. 毫米波工程基础. 北京: 国防工业出版社[M]. 1998. 5- 32.

Xue Liang-jin. Foundation of the MMW Engineer[M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 1998. 5- 32. (in Chinese)

作者简介:



林德福 男, 1971 年 9 月生于吉林省长岭县, 2005 年 8 月获得北京理工大学机电控制学院飞行器设计专业博士学位, 现在北京理工大学宇航科学技术学院飞行器设计系工作, 主要从事飞行器总体设计技术、制导与控制、计算机控制技术以及毫米波雷达信号处理技术的研究工作. E-mail: lindf@bit.edu.cn

沈吉 男, 1961 年 11 月生于河南省沁阳市, 现在中国电子技术标准化研究所工作, 主要从事计算机控制技术以及毫米波雷达信号处理技术的研究工作.