HPRF 脉冲多普勒频率步进雷达信号处理与参数设计

任丽香[1], 龙 腾[1], 远海鹏[2]
(1. 北京理工大学雷达技术研究所, 北京 100081; 2 中国电子科技集团公司, 北京 100846)

摘 要: 频率步进雷达是一种距离高分辨雷达, 传统的处理方法是采用频时转换(IDFT)获得目标的一维距离像, 实际上其处理也可以采用时频转换(DFT)的方式进行, 这时也可把频率步进雷达看作是一种载频跳变的脉冲多普勒(PD)雷达. 采用这种分析方法的优点是, 在高重复频率(HPRF)的情况下, 可以通过雷达系统的参数设计和信号处理, 同时获得不模糊的测速性能和距离高分辨性能, 并解决 HPRF PD 雷达的距离模糊问题. 本论文在分析频率步进雷达时频转换(DFT)处理的基础上, 给出了 HPRF PD 频率步进雷达系统参数设计准则及频时耦合的解决方法, 以及距离模糊问题的解决方案. 理论分析和仿真结果证明, 这种雷达体制可以同时获得不模糊测速和距离高分辨性能.

关键词: 雷达; 频率步进; 时频转换处理; 波形分析; 解模糊
中图分类号: TN958.3 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2007) 09-1630-07

Signal Processing and Parameter Design of HPRF Pulsed-Doppler Stepped-Frequency Radar

REN Li-xiang[1], LONG Teng[1], YUAN Hai-peng[2]
(1. *Radar Research Lab, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China;*
2. *China Electronics Technology Group Corporation, Beijing* 100846, *China*)

Abstract: Stepped-frequency radar has the ability of high range resolution(HRR). It normally adopts frequency-time transformation(IDFT) processing to get the range profile of targets. Alternatively stepped-frequency radar can also use time-frequency transformation(DFT) processing, with which it is seen as a kind of pulsed-doppler(PD) radars that use stepped-frequency pulses. Through parametric design and signal processing methods of the radar system, DFT method can achieve both unambiguous velocity and high resolution ranging in a single dwell under HPRF circumstances. The range ambiguity problem in HPRF PD radars can be resolved by careful design of parameters and signal processing methods. This paper analyzes the time-frequency transformation processing of stepped-frequency radars, based on which the HPRF PD stepped-frequency radar system's parameter design principle, solutions to the frequency-time coupling issue and range ambiguity are also given. Both theoretical analysis and simulation result prove that this radar scheme can simultaneously achieve unambiguous velocity and high resolution ranging.

Key words: radar; stepped frequency; time-frequency transformation; waveform analysis; ambiguity resolution

1 引言

频率步进雷达是一种重要的距离高分辨雷达, 它发射一串载频线性跳变的窄带脉冲, 对回波脉冲通常采用频时转换(IDFT)的处理方法获得合成宽带高分辨距离像. 采用频率步进信号可以显著降低数字信号处理机的瞬时带宽, 降低雷达系统的硬件实现难度.

频率步进雷达的参数选取决定了雷达的基本性能, 同时信号处理算法的选择也起着关键的作用. 采用频时转换(IDFT)处理和目标抽取算法, 可以得到静止目标的高分辨距离像[1]. 但是对于运动目标, 需要通过运动补偿解决目标速度产生的耦合时移和波形发散[2~4].

实际上频率步进雷达的信号处理也可以采用时频转换(DFT)的方式进行. 采用这种分析方法的优点是: 在高脉冲重复频率(HPRF)的情况下, 可以通过雷达系统参数设计和信号处理, 同时获得不模糊的测速性能和距离高分辨性能; 这时也可把频率步进雷达看作是一种载频跳变的脉冲多普勒(PD)雷达. 本文所研究的时频转换处理最早由 Myers 1996 年提出[5,6], 但是 Myers 只介绍了时频转换处理在 HPRF 模式下的一种具体系统实现, 本文则从理论上分析了时频转换处理的原理, 并给出了时频转换处理在 HPRF 模式下的频率步进雷达系统参数设计原则和关键信号处理问题解决方案.

本文安排如下: 第二部分简单介绍了频率步进雷

收稿日期: 2006-03-24; 修回日期: 2007-01-15

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

达及其频时转换(IDFT)处理, 第三部分分析了频率步进雷达的时频转换(DFT)处理原理, 第四部分给出了HPRF PD 频率步进雷达的系统参数设计原则和特殊信号处理方法, 第五部分是仿真结果.

2　频率步进雷达及其频时转换处理[1]

设频率步进信号的脉冲重复周期为 T_r, 发射脉冲宽度为 τ, 载频起始频率为 f_0, 频率步进阶梯为 Δf, 频率步进数为 N. 频率步进发射信号可以表示为[1]:

$$x(t)=\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{rect}\left(\frac{t-iT_r-\tau/2}{\tau}\right)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(f_0+i\Delta f)t} \tag{1}$$

对于径向距离为 R_0 的一个静止点目标, 发射信号经过距离延迟 $2R_0/c$, 由相参接收机接收, 接收机的检波输出为:

$$y(t)=\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{rect}\left(\frac{t-iT_r-\tau/2-2R_0/c}{\tau}\right)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(f_0+i\Delta f)\frac{2R_0}{c}} \tag{2}$$

对每个距离单元上的检波输出信号采样、归一化、做 IDFT 处理:

$$y(i)=\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(f_0+i\Delta f)\frac{2R_0}{c}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi i\frac{l}{N}} \tag{3}$$

对 IDFT 结果求模:

$$|Y(k)|=\left\|\frac{\sin(-l+k)}{\sin((-l+k)/N)}\right\|,\quad k=0,1,2,\cdots,N-1 \tag{4}$$

对静止目标, 就可以通过 $l=\mathrm{Round}\left(\frac{2R_0N\Delta f}{c}\right)$ 得到目标距离 R_0.

上述频时转换处理的物理意义是: 目标回波在每个距离单元上的 N 个采样, 可以看成是以 Δf 为间隔, 对带宽为 $B=N\Delta f$ 的回波频谱的采样, 故 IDFT 后有距离高分辨的效果. 频时转换处理频率步进雷达的关键性能主要由发射脉宽 τ、脉冲重复周期 Tr、采样间隔 Ts、频率步进阶梯 Δf、频率步进数 N 决定[1].

对于径向速度为 v(朝向雷达为正)、初始径向距离为 R_0 的匀速运动目标, 接收机的检波输出为[1]:

$$y(t)=\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{rect}\left(\frac{t-iT_r-\tau/2-2R_0/c+2vt/c}{\tau}\right)\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(f_0+i\Delta f)\left(\frac{2R_0}{c}-\frac{2vt}{c}\right)} \tag{5}$$

每个距离单元上的检波器输出回波信号相位为:

$$\varphi=-2\pi f_0\frac{2R_0}{c}+2\pi f_0\frac{2v}{c}iT_r-2\pi i\Delta f\frac{2R_0}{c}+2\pi i\Delta f\frac{2v}{c}iT_r \tag{6}$$

其中一次相位 $2\pi f_0\frac{2v}{c}iT_r$ 会造成耦合时移, 二次相位 $2\pi i\Delta f\frac{2v}{c}iT_r$ 会造成波形发散, 因此需要在 IDFT 处理前对回波信号相位进行运动补偿[1~4].

3　频率步进雷达的时频转换处理

3.1　静止目标的时频转换处理

实际上频率步进雷达的信号处理也可以采用时频转换(DFT)的方式进行. 式(2)中每个距离单元上的检波输出信号采样、归一化后, 做 DFT 处理:

$$y(i)=\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(f_0+i\Delta f)R_0}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi i\frac{1}{N}} \tag{7}$$

然后对 DFT 结果求模:

$$|Y(k)|=\left\|\frac{\sin(l+k)}{\sin((l+k)/N)}\right\|,\quad k=0,1,2,\cdots,N-1 \tag{8}$$

上述时频转换处理的物理意义是: 在 DFT 处理中, N 个频率步进回波脉冲可以被视为一个时宽 NT_r、带宽 $N\Delta f$ 的 Chirp 信号以 T_r 为间隔的采样, Chirp 信号的等效调频斜率为 $k=\Delta f/T_r$. 频率步进雷达用频率步进的本振信号与回波信号混频, 等效于对 Chirp 信号的去斜处理; 对混频后的信号采样、做 DFT 处理, DFT 结果中不同的频率成分就对应不同距离的目标.

对于静止目标, 式(7)中的目标回波相位变化部分可以改写为 $-2\pi\frac{\Delta f}{T_r}\frac{2R_0}{c}iT_r$, 它在 DFT 结果中对应的频移为 $\frac{\Delta f}{T_r}\frac{2R_0}{c}$, 它是由目标回波延迟 $\frac{2R_0}{c}$ 所产生的距离耦合频差. 对静止目标, 通过 $l=\mathrm{Round}\left(-\frac{2R_0N\Delta f}{c}\right)$ 就可以得到目标距离 R_0.

由于目标距离耦合频率是以 T_r 为采样间隔进行 DFT 分析的, 采用 DFT 频率分析的方法, 可以得到 DFT 处理方法对静止目标的不模糊距离和距离分辨率性能与 IDFT 处理完全相同[1].

3.2　运动目标的时频转换处理

对运动目标也可采用时频转换处理, 这种情况下时频转换处理也可从 PD 处理的角度分析. 将式(6)的回波相位变化部分改写为:

$$2\pi\cdot f_0\frac{2v}{c}\cdot iT_r-2\pi\cdot\frac{\Delta f}{T_r}\frac{2R_0}{c}\cdot iT_r+2\pi\cdot i\Delta f\frac{2v}{c}\cdot iT_r \tag{9}$$

对式(9)进行 DFT 处理, 式中各项在 DFT 结果中的意义如下:

(1) 一次相位项 $-2\pi\cdot\frac{\Delta f}{T_r}\frac{2R_0}{c}\cdot iT_r$: 距离为 R_0 的目标由步进频率产生的耦合频率 $\frac{\Delta f}{T_r}\frac{2R_0}{c}$;

(2) 一次相位项 $2\pi\cdot f_0\frac{2v}{c}\cdot iT_r$: 目标速度引起的多谱勒频率 $f_0\frac{2v}{c}$;

(3) 二次相位项 $2\pi i\Delta f\frac{2v}{c}iT_r$: 造成处理结果的发散[2,3,7].

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

根据 3.1 和 3.2 的分析, 频率步进的时频转换处理有两种物理解释: 以 $c/(2\Delta f)$ 为周期的时域上的距离结果, 或以 PRF 为周期的频域上的速度结果. 如果看成是以 $c/(2\Delta f)$ 为周期的时域上的距离结果, 目标运动速度会对目标测距造成耦合时移, 这与通常的 IDFT 处理相同. 如果看成是以 PRF 为周期的频域上的速度结果, 频率步进产生的目标距离像会造成运动目标多普勒的耦合频移; 因此当这种雷达采用 DFT 方式对运动目标处理时, 可以看成是载频跳变的 PD 雷达, 跳变载频的效果是可以在 PD 测频的同时获得目标的距离高分辨, 但是会在目标多普勒的处理结果上叠加一个耦合频移.

4 HPRF PD 频率步进雷达参数设计

在传统频率步进雷达参数设计中, 脉冲带宽 B_τ 与步进频率 Δf 是近似相当的; 即 IDFT 或 DFT 结果的距离覆盖范围 $1/\Delta f$ 与脉冲宽度 τ 相当[7]. 对于静止目标, 处理所获得的是目标的一维高分辨距离像; 对于运动目标, 所获得的是目标循环移动后的一维高分辨距离像. 但是在 HPRF 情况下, 通过雷达系统参数设计, 频率步进雷达可以在一个频率步进周期内同时获得无模糊测速和高分辨测距.

4.1 雷达系统参数设计

4.1.1 雷达系统的接收机带宽 B_{IF}

(1) B_{IF} 与子脉冲带宽 B_τ 和跳频阶梯 Δf 的关系

首先, 雷达系统的中频接收机带宽 B_{IF} 应该满足匹配滤波条件:

$$B_{IF} \approx B_\tau \tag{10}$$

此外, 在频率步进雷达中, 为了避免处理结果发生混叠, 每个采样点成像的距离范围 $1/\Delta f$ 必须大于等于该采样点对应的距离段 τ[1], 即:

$$\tau \leqslant \frac{1}{\Delta f} \text{或} B_\tau \geqslant \Delta f \tag{11}$$

比较上两个公式, 显然有:

$$B_{IF} \approx B_\tau \geqslant \Delta f \tag{12}$$

(2) B_{IF} 与去斜后频差 δf 和 PRF 的关系

从去斜处理的角度分析, 对于调频斜率为 $k = \Delta f / T_r$ 的频率步进信号, 去斜后的最大信号带宽为:

$$\delta f = k\frac{2R_{\max}}{c} = \frac{\Delta f}{T_r}\frac{2R_{\max}}{c} = \Delta f\frac{R_{\max}}{cT_r/2} \tag{13}$$

其中 $R_{\max}$ 为最大目标距离. 根据式(13):

如果雷达系统工作于 LPRF 模式, 即系统不存在距离模糊($R_{\max} \leqslant \frac{cT_r}{2}$), 此时有 $\delta f \leqslant \Delta f$; 考虑到通常雷达为保持足够的平均发射功率, 一般有 $R_{\max} \approx \frac{cT_r}{2}$, 所以 $\delta f \approx \Delta f$. 这时的中频接收机带宽 B_{IF} 只要满足式(12)的约束即可; 这与普通频率步进雷达对中频接收机带宽的要求是一致的. 实际上 LPRF 模式下的频率步进 DFT 处理与 IDFT 处理完全相同.

如果雷达系统工作于 HPRF 模式, 即目标回波对雷达有 PRT 距离模糊($R_{\max} > \frac{cT_r}{2}$), 此时有 $\delta f > \Delta f$; 如果要求单个接收机覆盖整个雷达作用距离, 接收机带宽需要满足 $B_{IF} \geqslant \delta f$. 加上公式(12)的约束条件 $B_{IF} \geqslant \Delta f$, HPRF 模式下的中频接收机带宽 B_{IF} 一般会比 LPRF 模式有所增加.

4.1.2 雷达系统的距离窗口

当 PD 频率步进雷达工作于 HPRF 模式时, 通常有雷达作用距离 $R_{\max} \gg \frac{cT_r}{2}$, 根据式(13)有回波信号带宽 $\delta f \gg \Delta f$. 如果仍选择 $B_{IF} = \delta f$, 对雷达回波直接进行采样和处理, 即 $B_{IF} \gg \Delta f$, 则要求雷达具有很高的采样速度和信号处理能力, 这时频率步进体制相对于 Chirp 信号的大带宽处理就没有优越性可言. 因此必须采用类似于 Chirp 去斜处理对远距离目标的处理思路, 即通过中频放大器带宽 B_{IF} 限制所处理的回波信号频带范围(即所处理的距离窗口), 以此来限制采样速率和信号处理量.

距离窗口的大小 $\delta R = \frac{\delta f}{\Delta f} \cdot \frac{cT_r}{2}$ 需要根据具体系统的要求设置, 其大小决定于接收机中频带宽. 距离窗口越大, 则每个窗口覆盖的距离范围就越大, 接收机扫描整个雷达工作距离范围所需要的时间就越短, 雷达数据率越高; 其代价是接收机带宽增加, 系统硬件实现难度增加. 此外, 大的距离窗口($\delta f > \Delta f$)还会造成目标在距离窗口内的 PRT 模糊($\delta R > \frac{cT_r}{2}$); 如果距离窗口 $\delta R = n\frac{cT_r}{2}$, 则有 $B_{IF} \approx B_\tau \approx n\Delta f$, 即距离窗口内的 PRT 模糊数为 n. 根据以上分析, 距离窗口的大小要根据雷达数据率、系统实现难度等折中考虑和设置.

4.1.3 雷达系统的接收机本振

对于 HPRF PD 频率步进雷达系统, 雷达的最大作用距离可能远远大于距离窗口的大小. 跟踪雷达可以通过距离窗口的移动覆盖整个雷达作用距离; 搜索雷达可以通过多个具有不同距离窗口的接收机覆盖整个雷达作用距离. 无论是跟踪雷达或是搜索雷达, 都要求距离窗口的位置可调. 不同的距离窗口可以通过频率步进本振脉冲的起始时刻 t_0 来设置.

采用起始时刻为 t_0 的频率步进本振进行混频, 接收机所处理的距离窗口决定于 t_0 和中频接收机带宽 B_{IF}:

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$-\frac{B_{IF}}{2}\leqslant\frac{\Delta f}{T_r}\left(\frac{2R}{c}-t_0\right)\leqslant\frac{B_{IF}}{2} \tag{14}$$

4.1.4 HPRF 模式下的雷达系统参数设计

在 LPRF 模式下, 采用时频转换处理的频率步进雷达系统通常无距离模糊, 有速度模糊; 系统参数设计和处理与 IDFT 系统类似. 在 HPRF 模式下, 通常目标速度产生的最大多普勒频率满足 $f_{d\max}<1/T_r$, 而最大作用距离 $R_{\max}\gg\frac{cT_r}{2}$, 即测速无模糊, 测距有模糊.

根据距离窗口的大小不同, HPRF 模式下的参数设计和处理是不一样的:

如果距离窗口 $\delta R=\frac{cT_r}{2}$, 则有 $B_{IF}\approx B_\tau\approx\Delta f$, 系统在一个距离窗口内测距无模糊. 但是由于 $\tau\approx1/\Delta f$, 目标距离像占据了 DFT 处理结果的大部分区域; 即对于距离窗口内距离为 R 的静止目标, 其频移 $\frac{\Delta f}{T_r}\frac{2R}{c}$ 所对应的 DFT 结果峰值可能出现在任何点上. 而运动目标除了距离耦合频移 $\frac{\Delta f}{T_r}\frac{2R}{c}$, 还会产生多普勒频移 $f_0\frac{2v}{c}$, 因此 DFT 结果就可能产生循环移位. 所以在 HPRF 模式下, 如果距离窗口 $\delta R=\frac{cT_r}{2}$, 系统就无法实现无模糊测速. 这种距离窗口设置下的 HPRF 模式与 LPRF 模式效果相同.

如果距离窗口 $\delta R=n\frac{cT_r}{2}$, 即通过系统参数设计使得 $B_{IF}\approx B_\tau\approx n\Delta f$. 这样在完成 DFT 后, 从 PD 处理的角度分析, 目标最大时移 $\tau=\frac{1}{n\cdot\Delta f}$ 所产生的耦合频率范围 $\frac{\Delta f}{T_r}\cdot\frac{1}{n\cdot\Delta f}=\frac{1}{nT_r}$, 只是 DFT 不模糊测频区域 $\frac{1}{T_r}$ 的 $\frac{1}{n}$, DFT 处理仍留有很大的频率范围 $\left(\frac{N-1}{N}\frac{1}{\Delta f}\right)$ 可以用于测速. 如果能够通过多种处理方法尽量减小目标距离耦合频率 $\frac{\Delta f}{T_r}\frac{2R}{c}$ 的测量误差, 那么整个 DFT 处理结果就可以看成是一个 PRF 内的目标测频结果, 其中存在最大为 $\frac{1}{NT_r}$ 的测频误差; 这时的频率步进雷达就可以看成是一个测速无模糊的 PD 加上距离高分辨雷达.

4.2 HPRF 频率步进雷达的模糊和解模糊

HPRF 频率步进雷达存在两种模糊: 一是距离窗口内 $R_{\max}>\frac{cT_r}{2}$ 时产生的以 PRT 为周期的距离模糊; 二是高分辨模糊, 即频率步进回波进行 DFT 处理后, 高分辨率 $1/\Delta f$ 距离像在范围的模糊.

4.2.1 以 PRT 为周期的距离模糊及其解模糊

在 HPRF 模式下, 当 $R_{\max}\gg\frac{CT_r}{2}$ 时, 存在目标距离的 PRT 模糊. 对于一定的接收机带宽 $B_{IF}=n\Delta f$, 通过接收机后的目标 PRT 模糊数减小为 n. 采用如下的相位差法可以解剩余的 PRT 模糊.

根据式(14), 与本振时刻 t_0 相差 $p\,(p<n)$ 个 PRT 的目标回波在混频后的频差为 $p\Delta f$. 假设混频后的信号采样间隔为 T_s, 则此频差在相邻距离单元的采样上产生的相位差为:

$$\delta\phi=2\pi p\,\Delta fT_s \tag{15}$$

Δf 和 T_s 已知, 因此只要能够确定相位差 $\delta\phi$, 就可以确定目标所在 PRT 与本振时刻 t_0 之间的模糊数 p. 为了保证相位差无模糊, 要求约束相位差满足 $\delta\phi<2\pi$, 即:

$$p<\frac{1}{\Delta fT_s} \tag{16}$$

由于采样间隔满足 $T_s\leqslant\frac{1}{B_{IF}}\approx\frac{1}{n\Delta f}\leqslant\frac{1}{p\Delta f}$, 所以上式肯定得到满足. 采用这种方法的关键是如何获得相位差 $\delta\phi$. 文献[5]提出了利用同一目标在多个相邻距离单元的 DFT 结果相位差求解 $\delta\phi$ 的方法, 这种相位差解 PRT 模糊法的性能是信噪比的函数[5]. 采用这种方法解模糊后, 可以把目标距离限制在一个 PRT 内; 再利用采样点的位置信息, 可以进一步把目标时延的定位精度准确到 $1/\Delta f$.

4.2.2 距离高分辨模糊和频域波形分析法解模糊

采用相位差法解 PRT 模糊后, 由于目标速度未知, DFT 后的目标高分辨距离像仍然存在 $\frac{1}{\Delta f}$ 范围内的距离高分辨模糊. 这可以采用频域波形分析法解决. 频域波形分析法基于同一个目标回波在相邻若干采样点上的相对幅度和回波形状, 通过内插算法估计目标回波中心在 $\frac{1}{\Delta f}$ 内的位置, 从而精确测距[5].

频域波形分析法得到的测距结果距离分辨率与 DFT 频率分辨率相关, 为 $\frac{c}{2N\Delta f}$, 测距精度与噪声大小有关, 而且与所采用的具体波形分析方法和参数有关; 参考文献[5]称所介绍的美国 CAMBR 雷达可以达到 1/10 距离单元, 即 1.5 米的测距精度, 但是这个结论在文献[5]中没有仿真或实验验证[5].

4.3 HPRF 频率步进雷达的处理流程

根据前面的分析, 频率步进雷达对于运动目标是具有距离高分辨能力的 PD 雷达, 它具有距离高分辨的效果. 如果采用 HPRF 的体制, 从 PD 的角度分析, 这种雷达体制可以同时获得距离高分辨和不模糊测速, 其问题是目标距离会造成 PD 的耦合频移. 通过系统参数设计使得 $B_{IF}\approx B_\tau\approx n\Delta f$, 并采用 4.2 的处理方法进行高分辨测距, 就可以同时获得高分辨测距和不模糊测

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

速. 图 1 是 HPRF 模式下 PD 频率步进雷达的处理流程:

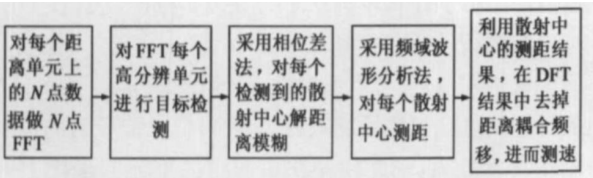

图1 PD 频率步进雷达在 HPRF 模式下的时频转换处理流程 ($\delta R=n\frac{cT_r}{2}$)

5 计算机仿真结果

以上分析结果采用计算机仿真进行了验证. 下面分两部分介绍仿真结果: 第一部分仿真结果验证了 HPRF PD 频率步进雷达能够同时实现不模糊测速和距离高分辨; 第二部分仿真结果验证了 HPRF PD 频率步进雷达能够利用解模糊方法实现高分辨测距.

5.1 HPRF PD 频率步进雷达无模糊测速和距离高分辨

5.1.1 步进频脉冲下 HPRF PD 雷达的距离高分辨

设置仿真系统参数为: $f_0=10$GHz, PRT = 20μs, 发射脉冲宽度 τ = 200ns, 脉冲频率步进阶梯为 $\Delta f=0.5$MHz, 频率步进脉冲个数 $N=256$, 中频放大器频谱形状为高斯, 1.5dB 带宽为 $B_{IF}=5$MHz, 采样频率为 $f_s=10$MHz. 在以上参数下, 雷达不模糊距离为 3000m, 不模糊速度为 ±750m/s, 距离分辨率为 $\Delta R=1.1719$m, 速度分辨率为 $\Delta v=2.9297$m/s.

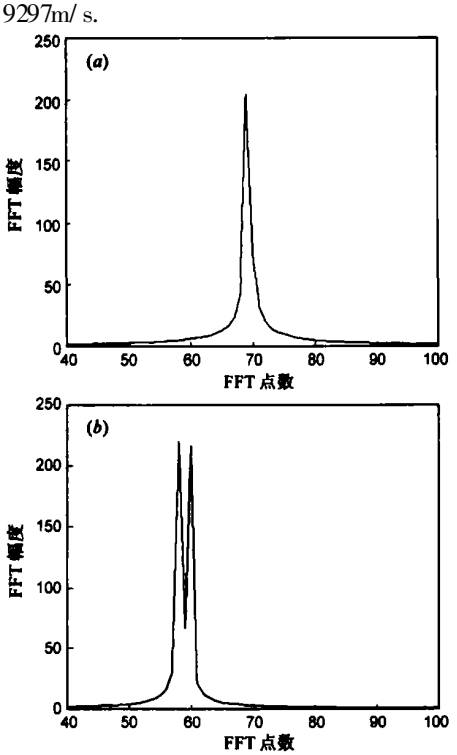

图 2 (a) 普通 PD 的 FFT 处理结果 (距离分辨率 ΔR=30m, v=200m/s); (b) 频率步进 PD 的 FFT 处理结果 (距离分辨率 ΔR=1.1719m, v=200m/s)

设有距离分别为 11m 和 13m 的两个目标散射中心, 速度为 200m/s(目标多普勒频移对应的的 FFT 点数理论值为 68.2667). 图 2 给出了普通 PD($\Delta f=0$) 和频率步进 PD 的 FFT 处理结果.

从仿真结果可以明显看出, 采用普通 PD 信号无法区分同一距离单元内相同速度、不同距离的多个散射中心, 而步进频率的脉冲信号则具有距离高分辨的效果.

此外, 通过理论分析, 两个散射中心的距离耦合频移所对应的 FFT 点数分别为 9.3867 点和 11.0933 点, 对比图 2(a)(谱峰位置在第 69 点) 和图 2(b)(谱峰位置在第 58 点和第 60 点) 可以看出, 图 2(b) 两个谱峰位置相对于图 2(a) 谱峰位置的移动正是两个散射中心的距离耦合频移产生的.

5.1.2 HPRF PD 频率步进雷达采用 $B_{IF}\approx B_\tau\approx n\Delta f$ 的参数设计, 能够兼容无模糊测速和距离高分辨

设有距离分别为 11m 和 41m 的两个目标(两个目标的距离差为 30m, 对应一个脉冲宽度 τ = 200ns, 即同一个采样点所能采到的两个目标间的最大距离), 目标速度 $v=200$m/s. 两个目标的最大值分别出现第 5 和第 7 个采样点上, 图 3 是第 6 个采样点上的 FFT 结果.

在图 3 的 FFT 结果中, 两个目标对应的谱峰间隔为 26 点, 在整个 256 点 FFT 输出中所占比例约为 1/10, 这与 4.1.4 的分析结果吻合: 目标最大时移所产生的耦合频率范围只占 DFT 不模糊测频空间的 $1/n$, DFT 处理仍留有很大的频率空间可以用于测速; 即 HPRF 频率步进雷达可以通过参数设计, 在获得距离高分辨的同时不模糊测速.

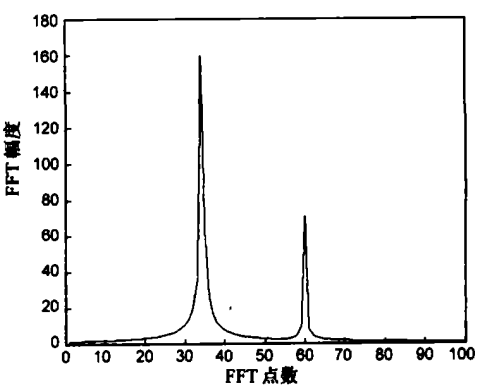

图 3 频率步进 PD 的 FFT 处理结果 (距离分辨率, v=200m/s, 对应谱峰位置分别为 34 和 60)

5.2 HPRF PD 频率步进雷达 PRT 距离模糊和高分辨模糊的求解

5.2.1 PRT 距离模糊和相位差解模糊的仿真

仍沿用 5.1 的系统参数设置, 接收信噪比为 −10dB. 目标参数设置为: 目标初始距离 7200m(PRT 模糊为 2), 速度 660m/s. 仿真程序的处理过程如下: 首先

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

模拟产生所有距离单元上的混频后回波信号, 然后对每个距离单元上的 N 个频率步进回波数据进行 FFT 处理和门限检测, 对于检测到的目标, 取出目标回波幅度最大的两个距离单元, 根据目标对应 FFT 单元的结果计算相位差, 并求解目标 PRT 模糊, 计算方法参照 4.2.1 的分析.

图 4 为目标运动到距离点 7196.6m 上时, 目标在多个采样点上的 FFT 输出, 回波幅度最大值出现在距离单元 13、FFT 单元 226. 经过计算, 在目标所在的第 226 个 FFT 单元上, 采样点 12 和 13 的相位差为 0.5690 弧度, 与 PRT 模糊数为 1 时的相邻距离单元相位差理论值 $2\pi\Delta f T_s = 0.3142$ 相比, 得到目标的距离模糊数为 2, 这与实际结果相吻合. 仿真结果说明相位差解 PRT 距离模糊的方法原理可行.

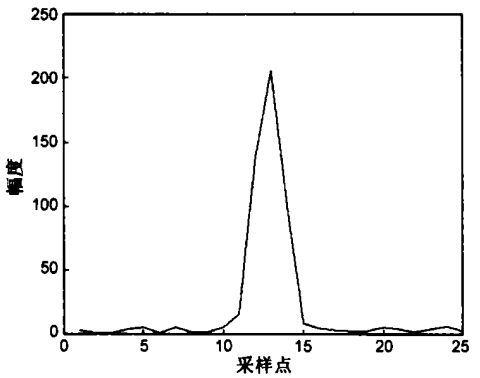

图 4　不同采样点的目标 FFT 输出幅度

相位差解模糊的性能与系统噪声大小相关, 并随信噪比的增加而改善. 对于跟踪雷达, 相位差解模糊性能可以利用目标航迹上不同频率步进周期的相位差解模糊结果, 通过数据处理的方法加以改善.

5.2.2　距离高分辨模糊和频域波形分析法解模糊的仿真

沿用 5.2.1 的系统参数设置, 并假设解 PRT 模糊结果正确. 仿真程序对于检测到的目标, 采用波形面积分析法[9]计算目标回波波形中心, 进而得到目标高分辨测距结果和测速结果. 仿真结束后, 仿真程序根据 Mont Carlo 仿真结果, 计算测距/测速标准差在每个信噪比下的变化范围.

设目标初始距离为 1200m(无 PRT 距离模糊), 速度 660m/s, 接收信噪比在 -28dB 和 -10dB 之间线性变化, 阶梯为 2dB. 图 5 和图 6 是连续 30 组步进频脉冲, 每个频率步进周期 40 次 Monte Carlo 仿真的结果.

图 5 是测距标准差变化范围随 SNR 的变化情况, 图 6 是测速标准差变化范围随 SNR 的变化情况. 在仿真中, 基于每个距离单元的 40 次 Monte Carlo 测距/测速仿真结果, 可以得到一个测距/测速标准差; 测距/测速标准差变化范围是根据所有距离单元测距/测速标准差的最大值与最小值之差计算出来的.

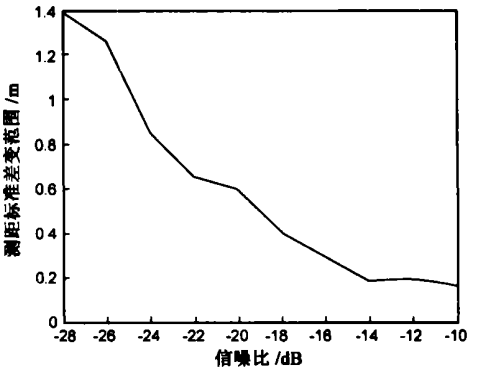

图 5　测距标准差变化范围

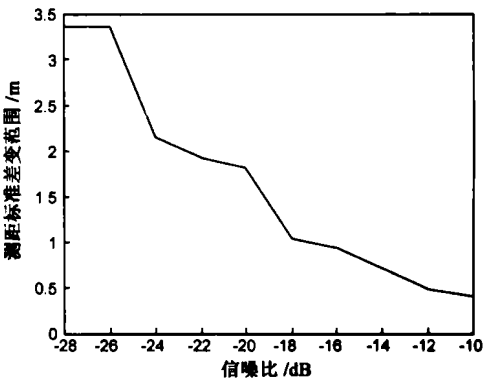

图 6　测速标准差变化范围

从仿真结果可以看出: 频域波形分析法能够完成高分辨测距, 其测距精度随信噪比的增加而提高. 在仿真系统的参数设置下, 相对于普通 PD 雷达的距离精度 $c\tau/2$, 频域波形分析法的测距精度在不同的信噪比下有约 2~17 倍的提高; 测速精度与测距精度相关, 在不同的信噪比下可达到 5~42m/s.

6　结论

本文针对频率步进雷达在运动目标环境下的应用问题, 研究了一种能够在高脉冲重复频率(HPRF)模式下同时获得不模糊的测速性能和距离高分辨性能的 PD 步进频雷达处理方法, 分析了这种方法的原理, 给出了 HPRF PD 频率步进雷达的系统参数设计原则和特殊信号处理方案. 分析和仿真结果表明, 该方法兼具 HPRF PD 雷达和频率步进雷达的的优点, 能够同时获得目标的不模糊速度和距离高分辨一维像, 可以用于多种新体制雷达领域.

参考文献:

[1] 龙腾, 李眈, 吴琼之. 频率步进雷达参数设计与目标抽取算法[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(6): 26-31.
Long Teng, Li Dan, Wu Qiongzhi. Design methods for step frequency waveform and the target pick up algorithm[J]. Systems

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Engineering and Electronics, 2001, 23(6): 26- 31. (in Chinese)

[2] 龙腾. 频率步进雷达信号的多普勒性能分析[J]. 现代雷达, 1996, 2: 31- 37.
Long Teng. Doppler Performance analysis of frequency stepped radar signal[J]. Modern Radar, 1996, 2: 31- 37. (in Chinese)

[3] 雷文. 高分辨率雷达信号处理算法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2001.
Lei Wen. High Resolution Radar Signal Processing Algorithms [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2001. (in Chinese)

[4] G S Gill. Step frequency waveform design and processing for detection of moving targets in clutter[A]. Proceedings International Radar Conference[C]. Alexandria, VA, USA: IEEE, 1995. 573- 578.

[5] H Myers, R Moore, W Butler, et al. Common aperture multiband radar(CAMBR)[A]. Proceedings of the SPIE- The International Society for Optical Engineering[C]. Denver, CO, USA: SPIE- Int Soc Opt Eng, 1996, 2845: 2- 13.

[6] H Myers, R Moore, W Butler, et al. Common adaptive multiband radar(CAMBR)[A]. Proceedings of the 1997 IEEE National Radar Conference[C]. New York, USA: IEEE, 1997, 143 - 148.

[7] 远海鹏. 频率步进雷达信号处理研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2004.
Yuan Haipeng. Frequency Stepped Radar Signal Processing [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2004. (in Chinese)

[8] 高梅国. 雷达波形分析数字动目标跟踪的理论和应用[D]. 北京: 北京理工大学, 1993.
Gao Meiguo. Theory and Application of Digital Moving target Tracking with Radar Waveform Analysis[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, Beijing China, 1993. (in Chinese)

作者简介:

任丽香 女, 1971 年 9 月出生于河南省焦作市, 1996 年于北京理工大学电子工程系获得工学硕士学位, 2006 年于北京理工大学获得工学博士学位. 现为北京理工电子学雷达技术研究所讲师, 主要研究方向: 雷达信号仿真、距离高分辨率雷达. E-mail: lixiangr@bit.edu.cn

龙 腾 男, 1968 年 1 月出生于福建省福州市, 1995 年于北京理工大学获得工学博士学位, 现为北京理工大学教授、博士生导师. 主要研究方向: 雷达系统、数字信号处理.
E-mail: longteng@bit.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net