

文章编号: 1001-2486(2009)04-0052-06

高重频频率步进雷达强杂波抑制*

王飞行, 汤广富, 贺思三, 付强

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对高重频频率步进雷达, 提出了抑制强杂波的有效处理流程。在接收机前端控制中频带通滤波器的通带范围以减少进入后续处理的折叠杂波, 在信号处理机中针对目标运动速度的不同提出了两种方法: 通过波形参数设计及高分辨处理消除杂波对高速目标的影响; 利用两幅高分辨距离像(HRRP)进行杂波相消以抑制杂波对低速目标的干扰。该处理不需要改变基本的频率步进波形, 具有简单易行的优点。仿真和试验结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 高重频; 频率步进雷达; 折叠杂波; 杂波抑制

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A

Severe Clutter Suppression in High PRF Stepped-frequency Radar

WANG Fei-xing, TANG Guang-fu, HE Si-san, FU Qiang

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A processing flow is proposed to suppress the severe clutter in high pulse repetition frequency (PRF) stepped-frequency radar. Firstly, the folded clutter caused by high PRF is attenuated by the intermediate frequency (IF) band-pass filter in the receiver's foreside. Secondly, two methods are brought forward to reject the residual clutter for targets of different velocities in signal processing system. On condition of specific waveform parameters, high range resolution processing eliminates the effect of the clutter to high speed targets. Two high resolution range profiles (HRRP) are utilized to cancel the clutter for low speed targets. The current method of processing need not change the basic stepped-frequency waveform and has the advantages of simplicity and effectiveness. The simulation and experiment results validate the correctness of the method.

Key words: high pulse repetition frequency; stepped-frequency radar; folded clutter; clutter suppression

频率步进雷达是一种重要的距离高分辨率雷达^[1-2], 它能够精确地测量目标的距离, 并为目标的确认识别提供可靠保证。高重频频率步进雷达是指脉冲重复频率很高的频率步进雷达, 这种高重频特性能够加大信号的平均功率, 增大雷达的作用距离。高重频方式的另一个重要优势是能够为频率步进雷达提供无模糊测速能力^[3]。因此, 近年来高重频频率步进雷达受到了广泛的关注。然而目标的回波通常处于强杂波背景之下, 高重频频率步进雷达会出现距离模糊, 距离模糊又会引起杂波折叠^[4], 高强度的折叠杂波完全有可能淹没目标, 尤其是在复杂低空环境中小雷达截面积目标(如隐身飞机)。因此, 杂波抑制是高重频频率步进雷达中非常关键的部分, 它的性能直接影响到后续处理的效果。

目前国内外主要针对中、低重频频率步进雷达的杂波抑制方法进行研究, 它们的处理方法可分为两个步骤。首先限制进入雷达接收机的杂波量, 这可以通过减小有效脉冲宽度, 也就是增大信号带宽来实现。频率步进波形就是用窄带瞬时带宽来实现大有效带宽的一种形式, 距离分辨率提高 N 倍, 相应地其精细分辨单元内的杂波功率降低 N 倍^[1-2]。然后在信号处理机中针对目标运动速度的不同采用不同的方法: 文献[5-6]指出对频率步进雷达回波信号进行 DFT 高分辨处理时, 目标运动会导致目标峰值的距离移动, 这样可以将高速目标的回波峰值移动到杂波区以外(即无杂波区), 实现对高速目标的检测; 针对低速目标, 频率步进雷达发射 N 组脉冲, 每组包含两个载频相同的脉冲, 相邻两组的载频有一

* 收稿日期: 2009-03-09

基金项目: 国家部委重点基金资助项目

作者简介: 王飞行(1979-), 男, 博士生。

个固定的频率步进间隔,这样可先对同一组的两个脉冲回波进行一次相消处理滤除杂波,然后再进行成像处理,就可得到只含目标的HRRP^[7-8]。该杂波相消方法不仅要求改变常规的频率步进信号波形,而且所成HRRP的幅度有所减小,像的清晰程度受到影响。

高重频频率步进雷达由于其特殊性,因而杂波抑制处理流程在具体实现时也有所差别。它首先应该抑制高强度的折叠杂波,然后针对目标运动速度的不同,在信号处理机中采用不同的杂波抑制方法。

1 强杂波抑制处理流程

高重频频率步进雷达的回波信号与接收机中本振信号(相同频率步进)混频后近似为恒载频的脉冲串,且不同模糊距离间隔上回波脉冲串的载频互不相同,故在接收机前端控制中频带滤波器的通带范围可抑制距离处理间隔之外的折叠杂波。在高分辨处理中通过设置 $\Delta f T_r$ 为整数,可将距离处理间隔内的折叠杂波控制在相同的位置范围,以留出足够的无杂波区供高速目标检测。对位于杂波区的低速目标,经若干个相参处理间隔(CPI)后,它出现在两幅HRRP中的位置会不同。而静止或慢速运动的杂波在两幅HRRP中的位置、幅度和相位信息几乎完全相同。因此,将这两幅HRRP作相减运算,固定杂波将被完全相消,慢速杂波也将大幅度衰减,只有运动目标信息得以完整保留。杂波抑制处理流程如图1所示。

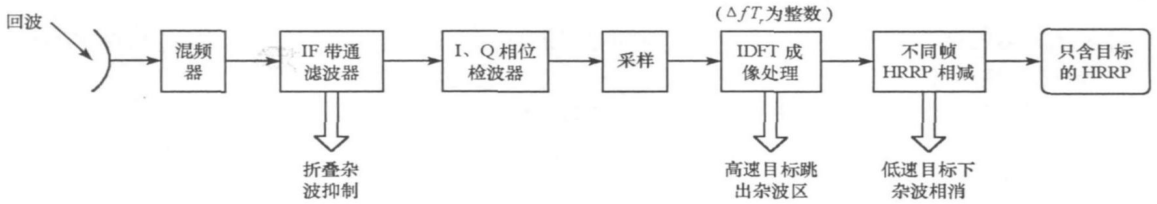


图1 高重频频率步进雷达杂波抑制处理流程

Fig. 1 The process flow of clutter suppression for HPRF-SF radar

1.1 折叠杂波抑制

高重频频率步进雷达发射信号为

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left[\frac{t - nT_r - \tau/2}{\tau} \right] \exp[-j2\pi(f_0 + n\Delta f)t] \quad (1)$$

其中, τ 为脉冲宽度, T_r 为脉冲重复间隔, f_0 为射频载频, Δf 为频率步进间隔, N 为频率步进点数。根据式(1), 距离为 R 的点目标回波为

$$\begin{aligned} r_1(t) &= A \cdot s(t - 2R/c) \\ &= A \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left[\frac{t - nT_r - \tau/2 - 2R/c}{\tau} \right] \exp[-j2\pi(f_0 + n\Delta f)(t - 2R/c)] \end{aligned} \quad (2)$$

其中, A 为回波幅度。

由于高重频频率步进雷达的不模糊距离($cT_r/2$)一般远小于最大作用距离, 因此容易产生距离模糊, 不妨设该目标位于第 I 个模糊距离间隔。令接收机的本振频率与第 I 个模糊距离间隔上的回波频率同步变化, 且相差一恒定的中频 f_1 , 则本振信号为

$$l(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left[\frac{t - nT_r - \left((I-1)T_r - T_r/2 \right)}{T_r} \right] \exp[-j2\pi(f_0 + f_1 + n\Delta f)t] \quad (3)$$

将回波信号与本振信号混频得

$$\begin{aligned} r_2(t) &= r_1^*(t) l(t) \\ &= A \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left[\frac{t - nT_r - \tau/2 - 2R/c}{\tau} \right] \cdot \exp \left\{ -j2\pi \left[f_1 t + (f_0 + n\Delta f) 2vt/c + (f_0 + n\Delta f) 2R_0/c \right] \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中假设目标匀速运动, 即 $R = R_0 + vt$, R_0 为 $t = 0$ 时目标的距离。根据式(4), 混频后目标回波脉冲的

载频为 $f_1 + (f_0 + n\Delta f)2v/c \approx f_1 + f_d$, 其中目标多普勒频移 $f_d = 2f_0v/c$, 约等号是考虑到 $n\Delta f \ll f_0$ 。

不妨设第 $I+M$ ($M > -I$) 个模糊距离间隔上的某个静止点杂波的距离为 R' , 该杂波回波与本振信号混频得

$$r'(t) = A \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left[\frac{t - nT_r - \sqrt{2} - 2R'/c}{\tau} \right] \cdot \exp \left\{ -j2\pi [f_1 t + M\Delta f t + (f_0 + n\Delta f) 2R'/c] \right\} \quad (5)$$

根据式(5), 第 $I+M$ 个模糊距离间隔上杂波的回波脉冲载频恒为 $f_1 + M\Delta f$ 。

对高重频频率步进雷达, 各个模糊距离间隔上的杂波回波将和目标回波一起进入接收机, 从而折叠杂波干扰严重。为抑制折叠杂波, 可让回波信号通过一个中频带通滤波器^[9-10], 滤波器的中心频率为 f_1 , 通带宽度为

$$BW = K\Delta f \quad (6)$$

为分析简便, 不妨假设 K 为整数。根据式(5)和式(6), 若杂波位于距离区间 $[(I - \lfloor K/2 \rfloor)cT_r/2, (I + \lfloor K/2 \rfloor)cT_r/2]$ (其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整) 之外, 其回波脉冲的载频将处于带通滤波器的通带 $[f_1 - K\Delta f/2, f_1 + K\Delta f/2]$ 之外, 从而它们将被滤波器所削弱。为保证目标回波信号通过滤波器时衰减尽可能小, 要求:

$$K\Delta f \geq 1/\tau \quad (7)$$

$$|f_d| < f_1/2 = K\Delta f/2 \quad (8)$$

式(7)要求滤波器的通带宽度应不小于矩形脉冲本身的等效频谱宽度, 式(8)表明运动目标回波通过滤波器时的幅度衰减受多普勒频移的影响很小。

为使频率步进雷达所成 HRRP 不产生折叠, 要求

$$\tau\Delta f \leq 1 \quad (9)$$

结合(7)、(9)两式, 有

$$K \geq 1 \quad (10)$$

$$BW \geq \Delta f \quad (11)$$

若设置 $K=1$, 即 $BW = \Delta f$, 则滤波器可以削弱所有的折叠杂波回波, 只允许目标所在模糊距离间隔上的杂波回波较好地通过。一方面, 这时雷达的距离覆盖范围仅为一个模糊距离间隔; 另一方面, 由于这时 $\tau\Delta f = 1$, 该段杂波将占满整幅 HRRP, 从而目标始终会受到杂波干扰。为扩大雷达的距离覆盖范围, 也为在 HRRP 中设置无杂波区以更好地检测、跟踪和识别运动目标, 要求:

$$\tau\Delta f < 1 \quad (12)$$

$$K > 1 \quad (13)$$

式(13)表明, 距离区间 $[(I - \lfloor K/2 \rfloor)cT_r/2, (I + \lfloor K/2 \rfloor)cT_r/2]$ 之内仍存在 K 段折叠杂波, 它们的回波会通过滤波器, 从而将在后续处理中继续与目标信号竞争。

1.2 高速目标下杂波抑制

将通过中频带通滤波器后的回波信号 $r_2(t)$ 变频为视频后得

$$r_3(t) = A \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left[\frac{t - nT_r - \sqrt{2} - 2R/c}{\tau} \right] \cdot \exp \left\{ -j2\pi [(f_0 + n\Delta f) 2vt/c + (f_0 + n\Delta f) 2R/c] \right\} \quad (14)$$

对 $r_3(t)$ 在 $t = nT_r$ 时刻采样并归一化, 可以得到

$$r_3(n) = \exp \left\{ -j4\pi f_0 R_0/c - j4\pi n\Delta f R_0/c - j4\pi f_0 v T_r/c - j4\pi n^2 \Delta f v T_r/c \right\} \quad (15)$$

对采样信号 $r_3(n)$ 作 IDFT, 即可得到 HRRP。式(15)右边指数中最后一项 $4\pi n^2 \Delta f v T_r/c$ 为 n^2 项, 它将引起 HRRP 的峰值展宽(能量发散)和信噪比降低, 为简化后续分析和表示, 暂不考虑, 则 HRRP 近似为

$$H(k) = \sum_{n=0}^{N-1} r_3(n) \exp(j2\pi kn/N) \\ = \exp \left[-j4\pi f_0 R_0/c + j\frac{N-1}{N} \pi \left[k - N\Delta f \frac{2R_0}{c} - Nf_0 v T_r \right] \right] \frac{\sin \left[\pi \left[k - 2N\Delta f R_0/c - Nf_0 v T_r \right] \right]}{\sin \left[\pi \left[k - 2N\Delta f R_0/c - Nf_0 v T_r \right] / N \right]} \quad (16)$$

根据式(16),当

$$k - 2N \Delta f R_0 / c - N f_d T_r = lN \quad (17)$$

时(l 为整数), $|H(k)|$ 达到最大, HRRP 出现峰值。不妨设峰值所在的高分辨单元数为 k_0 , 则有

$$k_0 = \text{Round}\left(2N \Delta f R_0 / c + N f_d T_r\right) + lN \quad (18)$$

其中, Round 表示按四舍五入法取整运算, 且 l 的取值使得 $0 \leq k_0 < N$ 。根据式(18)可知, HRRP 中目标的精细距离分辨率为 $\Delta r = c/2N \Delta f$ 。由于脉冲宽度为 τ , 故宽度为 $c\tau/2$ 的静止杂波区所占高分辨单元数为 $N\tau \Delta f$ 。式(18)也表明, HRRP 中目标的位置不仅由目标的距离决定, 其速度也使得目标位置发生移动。因此当 $\tau \Delta f < 1$, 且目标高速运动时, 目标有可能跳出静止杂波区, 从而避免杂波干扰。为保证任意距离上的目标均能跳出静止杂波区, 所需最小速度为:

$$v_{\min} = c\tau \Delta f / 2f_0 \quad (19)$$

由 1.1 节的分析可知, 距离区间 $\left[\left(I - \lfloor K/2 \rfloor\right) cT_r/2, \left(I + \lfloor K/2 \rfloor\right) cT_r/2\right]$ 内的杂波回波仍会通过滤波器, 因此对回波信号的每一次采样都会包含这 K 个模糊距离间隔内 $c\tau/2$ 范围的杂波信息, 从而所成 HRRP 也总共包含 K 段折叠杂波。为保证高重频频率步进雷达具有优良的运动目标检测、跟踪和识别性能, 要求高速目标在 HRRP 中位于无杂波区, 为此, 必须控制所有折叠杂波在距离像上的总分布范围。这 K 段杂波在距离上的间距均为 $cT_r/2$, HRRP 的不模糊长度为 $c/2 \Delta f$ 。若 $\left(cT_r/2\right) / \left(c/2 \Delta f\right)$ 为整数(即 $\Delta f T_r$ 为整数), 则各段杂波在 HRRP 中将占据相同的位置范围, 总高分辨单元数仍为 $N\tau \Delta f$, 从而就能保证目标在 $v > v_{\min}$ 时跳出杂波区。

1.3 低速目标下杂波相消

根据 1.2 节的分析可知, 低速目标($v < v_{\min}$)可能位于 HRRP 中杂波区, 从而受到杂波的干扰。一般来说, 杂波是固定或慢速运动的, 在此, 用固定目标代替杂波进行分析。假设运动点目标为 a , 固定点目标为 b , 点目标 a 与雷达之间的径向速度为 v 。根据式(16), 第 1 帧脉冲回波所成 HRRP 为

$$H_1(k) = \exp\left[-j4\pi f_0 R_{a0}/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - N \Delta f \frac{2R_{a0}}{c} - N f_d T_r\right]\right] \frac{\sin\left[\pi\left(k - 2N \Delta f R_{a0}/c - N f_d T_r\right)/N\right]}{\sin\left[\pi\left(k - 2N \Delta f R_{a0}/c - N f_d T_r\right)/N\right]} \\ + \exp\left[-j4\pi f_0 R_b/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - N \Delta f \frac{2R_b}{c}\right]\right] \frac{\sin\left[\pi\left(k - 2N \Delta f R_b/c\right)/N\right]}{\sin\left[\pi\left(k - 2N \Delta f R_b/c\right)/N\right]} \quad (20)$$

其中, R_{a0}, f_d 分别为点目标 a 的初始距离和多普勒频移, R_b 为固定点目标 b 的距离。经 m 帧脉冲持续时间 mNT_r 后, 第 $m+1$ 帧脉冲回波所成 HRRP 为

$$H_{m+1}(k) = \exp\left\{-j4\pi f_0 \left(R_{a0} + vmNT_r\right)/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - N \Delta f \frac{2\left(R_{a0} + vmNT_r\right)}{c} - N f_d T_r\right]\right\} \\ \cdot \frac{\sin\left\{\pi\left[k - 2N \Delta f \left(R_{a0} + vmNT_r\right)/c - N f_d T_r\right]\right\}}{\sin\left\{\pi\left[k - 2N \Delta f \left(R_{a0} + vmNT_r\right)/c - N f_d T_r\right]/N\right\}} \\ + \exp\left[-j4\pi f_0 R_b/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - N \Delta f \frac{2R_b}{c}\right]\right] \frac{\sin\left[\pi\left(k - 2N \Delta f R_b/c\right)/N\right]}{\sin\left[\pi\left(k - 2N \Delta f R_b/c\right)/N\right]} \quad (21)$$

从式(20)和式(21)不难看出, 两式右边第二项是完全相同的, 于是经过一次相消后, 我们得到

$$H_{1,m+1}(k) = H_1(k) - H_{m+1}(k) \\ = \exp\left[-j4\pi f_0 R_{a0}/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - N \Delta f \frac{2R_{a0}}{c} - N f_d T_r\right]\right] \frac{\sin\left[\pi\left(k - 2N \Delta f R_{a0}/c - N f_d T_r\right)/N\right]}{\sin\left[\pi\left(k - 2N \Delta f R_{a0}/c - N f_d T_r\right)/N\right]} \\ - \exp\left\{-j4\pi f_0 \left(R_{a0} + vmNT_r\right)/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - N \Delta f \frac{2\left(R_{a0} + vmNT_r\right)}{c} - N f_d T_r\right]\right\} \\ \cdot \frac{\sin\left\{\pi\left[k - 2N \Delta f \left(R_{a0} + vmNT_r\right)/c - N f_d T_r\right]\right\}}{\sin\left\{\pi\left[k - 2N \Delta f \left(R_{a0} + vmNT_r\right)/c - N f_d T_r\right]/N\right\}} \quad (22)$$

从式(22)可以看出, 经过以上处理, 作为杂波的固定点目标回波信号已经完全消去, 剩下的是不同帧周期的运动目标回波信号相减后的部分输出。这里为保证 $H_1(k)$ 和 $H_{m+1}(k)$ 对应同一距离单元, 要

求这两帧回波脉冲的采样时刻相对于发射脉冲的起始时刻相同。类似于式(18)的分析,式(22)右边第1项所成目标峰值的位置为

$$k_1 = \text{Round}\left[2N \Delta f R_{a0} / c + N f_d T_r\right] + lN \quad (23)$$

式(22)右边第2项所成目标峰值的位置为

$$k_2 = \text{Round}\left[2N \Delta f \left(R_{a0} + vmNT_r\right) / c + N f_d T_r\right] + lN \quad (24)$$

从式(22)~(24)不难看出,为保留目标完整信息,必须要求这两个目标峰值位于不同的高分辨单元。对于扩展目标而言,运动目标经 m 帧脉冲持续时间 mNT_r 后,其位置移动量 $vmNT_r$ 必须大于目标长度 L 。考虑到式(15)右边指数中最后一项 $4\pi n^2 \Delta f v T_r / c$ 将导致 HRRP 峰值展宽,展宽程度用高分辨单元表示为 $P = vNT_r / \Delta r$,故要求

$$vmNT_r > L + P \Delta r \quad (25)$$

根据式(25),只要选择足够大的帧间隔数 m ,该杂波相消方法就可以应付大扩展目标低速运动的情况,但 m 的增大也意味着信号处理的耗时变长。值得注意的是,正是由于 $H_1(k)$ 和 $H_{m+1}(k)$ 上目标的位置不同,相消处理将导致 $H_{1,m+1}(k)$ 上出现目标重影,即杂波相消后的 HRRP 上出现两个一样的目标。为避免发生目标数目的误判,并确定目标在 HRRP 上的真实位置,必须消除目标重影,根据多帧 HRRP 可以进行目标重影消除。

2 仿真和试验结果

出示几个仿真和试验结果来验证本文所提方法的有效性,其中仿真参数选择如下: $f_0 = 10\text{GHz}$, $f_r = 200\text{kHz}$, $\Delta f = 1\text{MHz}$, $N = 512$, $\tau = 100\text{ns}$, $f_1 = 200\text{MHz}$, $R_0 = 10\ 360\text{m}$, $v = 600\text{m/s}$ 。由所选仿真参数可知,高重频频率步进雷达的模糊距离间隔长为 750m ,目标位于第14个模糊距离间隔。假设静止杂波处处存在,且服从均匀分布。

若需要抑制距离区间 $[6000\text{m}, 15\ 000\text{m}]$ 之外的折叠杂波,则要求 $K \leq 12$ 。又式(7)要求 $K \geq 10$,为达到对回波匹配滤波时的最佳性能,可取 $K = 10$, $BW = 10\text{MHz}$ 。中频带通滤波器抑制折叠杂波的性能如图2所示,其中假设第14段杂波的回波幅度为1。从图2可看出,第14段杂波回波在带通滤波器输出端的幅度接近1,这说明第14段杂波回波几乎能无衰减地通过滤波器。性能曲线表明,一个总的趋势是折叠杂波距离目标越远,滤波器对它们的抑制效果越好,并且近程的强折叠杂波也能够得到较好的抑制。第8~13段折叠杂波的回波幅度均高于1,这是近程的折叠杂波回波幅度很高的缘故。

图3为高速目标和折叠杂波所成的HRRP,其中采样时刻取为 $t_s = 4.1\mu\text{s} + nT_r = (4.1 + 5n)\mu\text{s}$ 。从图3可看出,由于 $\Delta f T_r = 5$,为整数,通过滤波器后的10段折叠杂波在HRRP中占据相同的位置范围。它们在前51个高分辨单元内矢量叠加,具有较高的幅度。由于目标速度 $v > v_{\min} = 300\text{m/s}$,从而高速目标跳出了杂波区,它位于第157个高分辨单元附近。

为验证1.3节提出的低速目标下杂波相消方法,试验中频率步进雷达的波形参数取为: $f_0 = 34\text{GHz}$, $\Delta f = 0.5\text{MHz}$, $N = 1024$, $\tau = 100\text{ns}$, $f_r = 50\text{kHz}$ 。测试目标为双角反射器,它由两个角反射体构成,用一根杠杆连接,杆中心水平固定在旋转电机上,结构如图4所示,杠杆长 $l = 0.8\text{m}$,双角反射器旋转频率 $f = 1.8\text{Hz}$ 。雷达放在 22m 的高台上,双角反射器放在地面上,与雷达的视线距离约 150m 。

图5和图6给出了双角反射器旋转实验中相邻两帧同一采样时刻所成的两幅HRRP。可看出,由旋转电机和土壤共同构成的杂波位于HRRP中第480~580个高分辨单元(100ns宽的矩形回波脉冲在接收机中被展宽了),出现在第518个高分辨单元的最强峰值对应旋转电机。由于双角反射器低速运动(最大速度仅为 $\pi l = 4.5\text{m/s}$),故没有跳出杂波区,完全被强杂波掩盖,从而不能从HRRP中检测到该目标。图7为上面两幅HRRP进行杂波相消后的结果。从图7可看出,低速目标下的杂波相消方法取得了很好的效果,杂波相消后的HRRP只剩下目标和噪声。

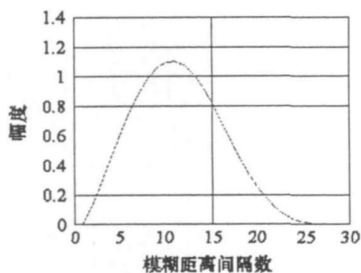


图2 滤波器抑制折叠杂波的性能
Fig. 2 Clutter suppression performance

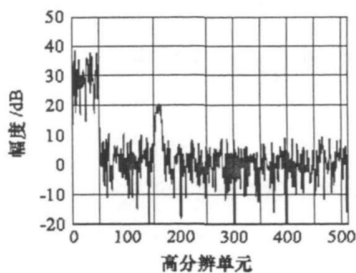


图3 ΔfT_r 为整数下的HRRP
Fig. 3 HRRP of ΔfT_r being integer

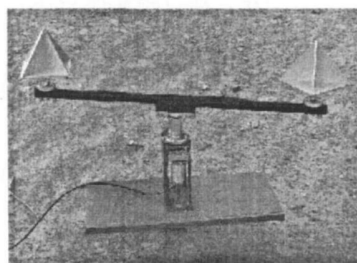


图4 双角反射器目标
Fig. 4 The corner reflector target

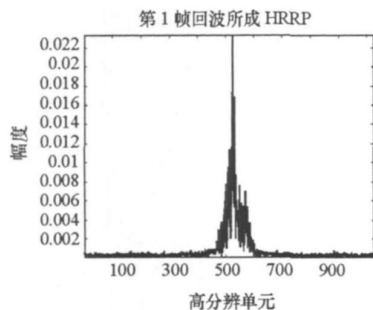


图5 第1帧回波所成 HRRP
Fig. 5 The first frame of HRRP

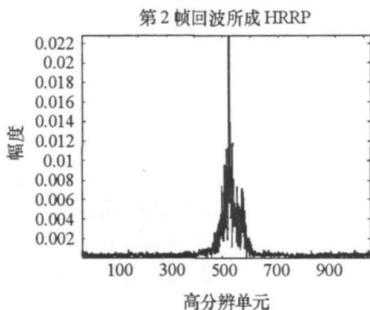


图6 第2帧回波所成 HRRP
Fig. 6 The second frame of HRRP

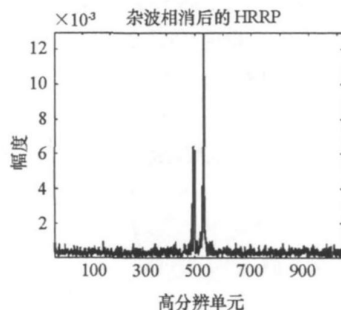


图7 杂波相消后的 HRRP
Fig. 7 The HRRP after clutter cancellation

3 结论

强杂波干扰是制约高重频频率步进雷达性能的重要因素, 本文提出了抑制强杂波的有效处理流程。理论分析和试验结果表明: 折叠杂波抑制方法不仅简单易行, 而且对近距离的强折叠杂波也有好的抑制效果; 高速目标下杂波抑制方法能为高速目标检测、跟踪和识别提供理想的无杂波干扰的区域; 低速目标下杂波相消方法不仅简单有效, 而且相比于其他方法能够很好地保持目标 HRRP 特性。该杂波抑制处理流程是在雷达平台静止的情况下进行分析的, 它同样适用于平台运动的情况, 尤其适用于雷达在强杂波环境下同时对坦克、飞机等各类目标的检测和识别。

参考文献:

- [1] Wehner D R. High Resolution Radar[M]. 2nd ed. Artech House, 1995.
- [2] Paulose A. High Radar Range Resolution with the Step Frequency Waveform[R]. AD- A284 611, 1994: 17.
- [3] Wang F X, Zhu Y F. Method of Resolving the Range Ambiguity for High PRF Stepped-frequency Radar[C]//IEEE National Radar Conference, 2006: 641- 644.
- [4] Baumgartner M C. Nonlinear Suppression of Range-ambiguous Clutter for Outdoor Radar Measurement Facilities[D]. Master's Thesis, Air Force Institute of Technology, Wright-patterson Air Force Base, Ohio, March 2006.
- [5] Gill G S. Simultaneous Pulse Compression and Doppler Processing with Step Frequency Waveform[J]. Electronics Letters, 1996, 32 (23): 2178- 2179.
- [6] Gill G S. Step Frequency Waveform Design and Processing for Detection of Moving Targets in Clutter[C]//IEEE National Radar Conference, 1995: 573- 578.
- [7] Zhang Q, Yeo T S, Du G. ISAR Imaging in Strong Ground Clutter by Using a New Stepped-frequency Signal Format [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2003, 41(5): 948- 952.
- [8] Zhang Q, Yeo T S, Du G. ISAR Imaging in Strong Ground Clutter by Using a New Stepped-frequency Signal Model[C]//IEEE National Radar Conference, 2002: 2753- 2755.
- [9] Myers H, Moore R, Butler W, et al. Common Aperture Multiband Radar (CAMBER) [J]. SPIE, 1986: 2845: 2- 13.
- [10] Myers H, Moore R, Butler W, et al. Common Aperture Multiband Radar (CAMBER) [C]//IEEE National Radar Conference, 1997: 143- 148.