

文章编号: 1001- 2486(2010) 03- 0069- 06

运动平台下频率步进雷达杂波相消新方法*

王飞行, 贺思三, 陈建军, 付 强

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 相消处理是一种典型而又简单易行的杂波滤除方法。针对频率步进雷达, 提出一种新的杂波相消方法, 它利用同一距离单元上两帧回波脉冲所成的两幅高分辨距离像(HRRP)进行杂波相消。通过合理地选择帧间隔数, 该方法能够很好地保持目标 HRRP 特性。针对雷达平台运动所导致的两幅 HRRP 之间杂波移位和成分改变问题, 又提出了先利用杂波相关性进行杂波对齐后再相消的解决方法。仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 杂波相消; 频率步进雷达; 高分辨距离像; 运动平台

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A

A Novel Method of Clutter Cancellation for Mobile Stepped-frequency Radar

WANG Fei-xing, HE Si-san, CHEN Jian-jun, FU Qiang

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

Abstract: Cancellation processing is one kind of classical and feasible idea for the purpose of cancelling clutter. A novel method of clutter cancellation for stepped-frequency radar was proposed. Transmitting the basic stepped-frequency waveform, the radar achieves two high resolution range profiles (HRRP) that were produced by the Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT) of two frames of return pulses on a same range cell. The two HRRPs which the number of frame interval was chosen rationally were utilized to cancel the clutter, which can keep the HRRP property of a target. To resolve the problems of the clutter shift and the clutter component change induced by the radar platform movement, a strategy was also brought out. The clutter of two HRRPs was aligned by the clutter correlation and then was cancelled. The simulation results validate the correctness of the method.

Key words: clutter cancellation; stepped-frequency radar; high range resolution profile; mobile platform

在高分辨雷达应用系统中, 频率步进雷达以其分辨力高、系统复杂性低、成本低和易于工程实现等优点得到越来越广泛的应用^[1-3]。在杂波抑制方面, 频率步进雷达也具有独特的优势: 其接收机中频带通滤波器可以抑制折叠杂波回波^[4], 其高分辨能力可以大幅度提高信杂比, 其 HRRP 中无杂波区能为高速目标检测、跟踪和识别提供理想的无杂波干扰的区域^[5]。与脉冲多普勒雷达不同, 由于频率步进雷达在成像时存在“距离-多普勒”耦合, 静止杂波将在 HRRP 中占据一定的频谱范围。因此, 当目标低速运动时, 目标可能位于静止杂波区而无法被检测。

针对低速目标位于静止杂波区的情况, 本文提出一种新的频率步进雷达杂波相消方法。该方法利用同一距离单元上两帧回波脉冲所成的两幅 HRRP 进行杂波相消。经若干个相参处理间隔(CPI)后, 运动目标出现在两幅 HRRP 中的位置会不同。而由于杂波静止或慢速运动, 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, 静止杂波将被完全相消, 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。但当雷达平台运动时, 静止杂波将相对运动, 从而两帧 HRRP 之间杂波将出现移位, 而且杂波成分将改变。根据杂波相关性对杂波对齐后, 即可消去两帧 HRRP 中相同成分的杂波, 剩下的成分不同的杂波可用另一帧 HRRP 采用同样的方法进行对消。本文

* 收稿日期: 2009- 05- 04

基金项目: 国家部委重点基金资助项目(6140521)

作者简介: 王飞行(1979-), 男, 博士生。

首先介绍了频率步进雷达杂波相消的基本原理,接着分析了雷达平台运动的影响,并提出了相应的解决方法,最后用仿真对本文所提方法进行了验证。

1 频率步进雷达杂波相消基本原理

设频率步进信号的发射脉冲宽度为 τ , 脉冲重复间隔为 T_r , 载频起始频率为 f_0 , 频率步进间隔为 Δf , 频率步进点数为 N 。频率步进雷达某一帧的发射信号为:

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

点目标回波与本振混频后的视频信号为:

$$r(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}\left[\frac{t - nT_r - \tau/2 - 2R/c}{\tau}\right] \exp\left[-j2\pi(f_0 + n\Delta f)\frac{2R_0}{c} - j2\pi(f_0 + n\Delta f)\frac{2vt}{c}\right] \quad (2)$$

其中目标距离 $R = R_0 + vt$, R_0 为初始距离, v 为速度。对 $r(t)$ 在 $t = nT_r$ 时刻采样并归一化, 可以得到:

$$r(n) = \exp\left[-j4\pi f_0 R_0/c - j4\pi n \Delta f R_0/c - j4\pi n f_0 v T_r/c - j4\pi n^2 \Delta f v T_r/c\right] \quad (3)$$

对采样信号 $r(n)$ 作 IDFT, 即可得到 HRRP。式(3)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 的目标峰值发散和信噪比降低, 但并不改变 HRRP 中的目标位置, 从而对杂波相消中帧间帧数选取的影响较小。为简化后续分析和表示, 暂不考虑它, 则 HRRP 近似为:

$$H(k) = \sum_{n=0}^{N-1} r(n) \exp(j2\pi kn/N) \\ = \exp\left[-j4\pi f_0 R_0/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - N\Delta f\frac{2R_0}{c} - Nf_d T_r\right]\right] \frac{\sin\left[\pi\left[k - 2N\Delta f R_0/c - Nf_d T_r\right]\right]}{\sin\left[\pi\left[k - 2N\Delta f R_0/c - Nf_d T_r\right]/N\right]} \quad (4)$$

其中目标的多普勒频移 $f_d = 2f_0 v/c$ 。根据式(4), 当

$$k - 2N\Delta f R_0/c - Nf_d T_r = lN \quad (5)$$

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

$$k_0 = \text{Round}\left[2N\Delta f R_0/c + Nf_d T_r\right] + lN \quad (6)$$

其中 $\text{Round}(\cdot)$ 表示取整运算, 且 $0 \leq k_0 < N$ 。根据式(6)可知, HRRP 中目标的精细距离分辨为 $\Delta r = c/2N\Delta f$, 且目标的位置由其距离和速度共同决定。因此当 $\tau\Delta f < 1$ 且目标高速运动时, 在 HRRP 中目标有可能跳出静止杂波区, 从而获得优良的目标检测、跟踪和识别性能, 故本文主要考虑目标位于杂波区的情况。

一般来说, 杂波是固定或慢速运动的, 在此, 我们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(4), 第 1 帧脉冲回波所成 HRRP 为:

$$H_1(k) = \exp\left[-j4\pi f_0 R_{a0}/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - N\Delta f\frac{2R_{a0}}{c} - Nf_d T_r\right]\right] \frac{\sin\left[\pi\left[k - 2N\Delta f R_{a0}/c - Nf_d T_r\right]\right]}{\sin\left[\pi\left[k - 2N\Delta f R_{a0}/c - Nf_d T_r\right]/N\right]} + \\ \exp\left[-j4\pi f_0 R_b/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - N\Delta f\frac{2R_b}{c}\right]\right] \frac{\sin\left[\pi\left[k - 2N\Delta f R_b/c\right]\right]}{\sin\left[\pi\left[k - 2N\Delta f R_b/c\right]/N\right]} \quad (7)$$

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:

$$H_{m+1}(k) = \exp\left\{-j4\pi f_0\left(R_{a0} + vmNT_r\right)/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - N\Delta f\frac{2\left(R_{a0} + vmNT_r\right)}{c} - Nf_d T_r\right]\right\} \cdot \\ \frac{\sin\left[\pi\left[k - 2N\Delta f\left(R_{a0} + vmNT_r\right)/c - Nf_d T_r\right]\right]}{\sin\left[\pi\left[k - 2N\Delta f\left(R_{a0} + vmNT_r\right)/c - Nf_d T_r\right]/N\right]} + \\ \exp\left[-j4\pi f_0 R_b/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - N\Delta f\frac{2R_b}{c}\right]\right] \frac{\sin\left[\pi\left[k - 2N\Delta f R_b/c\right]\right]}{\sin\left[\pi\left[k - 2N\Delta f R_b/c\right]/N\right]} \quad (8)$$

从式(7)和(8)不难看出, 两式右边第 2 项是完全相同的, 于是经过一次相消后, 得到:

$$\begin{aligned}
 H_{1,m+1}(k) &= H_1(k) - H_{m+1}(k) \\
 &= \exp\left[-j4\mathcal{F}_0 R_{a0}/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - N\Delta f\frac{2R_{a0}}{c} - Nf_d T_r\right]\right] \frac{\sin\left[\pi\left[k - 2N\Delta f R_{a0}/c - Nf_d T_r\right]/N\right]}{\sin\left[\pi\left[k - 2N\Delta f R_{a0}/c - Nf_d T_r\right]/N\right]} - \\
 &\quad \exp\left\{-j4\mathcal{F}_0\left(R_{a0} + vmNT_r\right)/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - N\Delta f\frac{2\left(R_{a0} + vmNT_r\right)}{c} - Nf_d T_r\right]\right\} \cdot \\
 &\quad \frac{\sin\left\{\pi\left[k - 2N\Delta f\left(R_{a0} + vmNT_r\right)/c - Nf_d T_r\right]\right\}}{\sin\left\{\pi\left[k - 2N\Delta f\left(R_{a0} + vmNT_r\right)/c - Nf_d T_r\right]/N\right\}} \quad (9)
 \end{aligned}$$

从式(9)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(6)的分析, 式(9)右边第1项所成目标峰值的位置为:

$$k_1 = \text{Round}\left(2N\Delta f R_{a0}/c + Nf_d T_r\right) + lN \quad (10)$$

式(9)右边第2项所成目标峰值的位置为:

$$k_2 = \text{Round}\left(2N\Delta f\left(R_{a0} + vmNT_r\right)/c + Nf_d T_r\right) + lN \quad (11)$$

从式(9)~(11)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。对于点目标, 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1个高分辨单元; 对于扩展目标, 位置移动量 $vmNT_r$ 必须大于目标长度 L 。考虑到(3)式右边指数中最后一项 $4\pi n^2 \Delta f v T_r / c$ 将导致 HRRP 峰值发散, 发散程度用高分辨单元表示为 $P = vNT_r / \Delta r$, 故要求:

$$vmNT_r > L + P\Delta r \quad (12)$$

根据式(12), 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。

2 平台运动的影响分析

第1节分析中假设雷达是静止不动的, 下面分析雷达运动情况下的杂波抑制性能。设雷达平台的运动速度为 v_R (为分析方便, 不妨假设 v_R 为视线方向速度, 且 $v_R > 0$), 运动点目标 a 与雷达的相对速度为 $v_a + v_R$, 静止点目标 b 与雷达的相对速度为 v_R 。类似于前面的分析, 第1帧脉冲回波所成 HRRP 为:

$$\begin{aligned}
 H_1(k) &= \exp\left[-j4\mathcal{F}_0 R_{a0}/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left(k - 2N\Delta f R_{a0}/c - Nf_d^a T_r\right)\right] \frac{\sin\left[\pi\left(k - 2N\Delta f R_{a0}/c - Nf_d^a T_r\right)\right]}{\sin\left[\pi\left(k - 2N\Delta f R_{a0}/c - Nf_d^a T_r\right)/N\right]} + \\
 &\quad \exp\left[-j4\mathcal{F}_0 R_{b0}/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left(k - 2N\Delta f R_{b0}/c - Nf_d^b T_r\right)\right] \frac{\sin\left[\pi\left(k - 2N\Delta f R_{b0}/c - Nf_d^b T_r\right)\right]}{\sin\left[\pi\left(k - 2N\Delta f R_{b0}/c - Nf_d^b T_r\right)/N\right]} \quad (13)
 \end{aligned}$$

其中点目标 a 回波的多普勒频移 $f_d^a = 2f_0(v_a + v_R)/c$, 点目标 b 回波的多普勒频移 $f_d^b = 2f_0 v_R/c$ 。经 m 帧脉冲持续时间 mNT_r 后, 第 $m+1$ 帧脉冲回波所成 HRRP 为:

$$\begin{aligned}
 H_{m+1}(k) &= \exp\left\{-j4\mathcal{F}_0\left[R_{a0} + \left(v_a + v_R\right)mNT_r\right]/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - 2N\Delta f\left[R_{a0} + \left(v_a + v_R\right)mNT_r\right]/c - Nf_d^a T_r\right]\right\} \cdot \\
 &\quad \frac{\sin\left\{\pi\left[k - 2N\Delta f\left[R_{a0} + \left(v_a + v_R\right)mNT_r\right]/c - Nf_d^a T_r\right]\right\}}{\sin\left\{\pi\left[k - 2N\Delta f\left[R_{a0} + \left(v_a + v_R\right)mNT_r\right]/c - Nf_d^a T_r\right]/N\right\}} + \\
 &\quad \exp\left\{-j4\mathcal{F}_0\left(R_{b0} + v_R mNT_r\right)/c + j\frac{N-1}{N}\pi\left[k - 2N\Delta f\left(R_{b0} + v_R mNT_r\right)/c - Nf_d^b T_r\right]\right\} \cdot \\
 &\quad \frac{\sin\left\{\pi\left[k - 2N\Delta f\left(R_{b0} + v_R mNT_r\right)/c - Nf_d^b T_r\right]\right\}}{\sin\left\{\pi\left[k - 2N\Delta f\left(R_{b0} + v_R mNT_r\right)/c - Nf_d^b T_r\right]/N\right\}} \quad (14)
 \end{aligned}$$

式(13)和式(14)的第2项均为点目标 b 的信号, 它们在 $H_1(k)$ 和 $H_{m+1}(k)$ 中的幅度相同, 而位置差为:

$$l = v_R mNT_r / \Delta r \quad (15)$$

根据式(15), 当 $v_R mNT_r \geq \Delta r$ 时, $l \geq 1$, 这时 $H_1(k)$ 和 $H_{m+1}(k)$ 中点目标 b 的信号发生了相对移位。

雷达运动下杂波在不同帧 HRRP 中移位情况如图 1 所示。根据图 1, 雷达平台运动导致了不同帧 HRRP 中杂波发生相对移位, 移位量为 l 个高分辨单元。此外, 不同帧 HRRP 中杂波成分也发生了变化, 在第 $m+1$ 帧, 一小段杂波新进入了该采样单元, 它在 $H_{m+1}(k)$ 中占据杂波区前 l 个高分辨单元。因此, 直接将 $H_1(k)$ 和 $H_{m+1}(k)$ 相减并不能对消杂波信号。

3 平台运动下的改善方法

根据图 1, 为对消杂波信号, 须首先将两帧 HRRP 中杂波信号进行对齐, 然后再相消。对齐相消方法可用公式表示如下:

$$H_{1,m+1}(k) = H_1(k-l) \exp(j\Delta\varphi) - H_{m+1}(k) \quad (16)$$

其中 $\Delta\varphi$ 为雷达在 mNT_r 时间内运动所导致的 HRRP 相位变化:

$$\Delta\varphi = -4\pi f_0 v_{RM} NT_r / c \quad (17)$$

将式(13)~(15)和式(17)代入式(16)可得:

$$H_{1,m+1}(k) = \exp\left\{-j4\pi f_0 \left(R_{a0} + v_{RM} NT_r\right) / c + j \frac{N-1}{N} \pi \left[k - 2N \Delta f \left(R_{a0} + v_{RM} NT_r\right) / c - N f_d^a T_r\right]\right\} \cdot \frac{\sin\left\{\pi \left[k - 2N \Delta f \left(R_{a0} + v_{RM} NT_r\right) / c - N f_d^a T_r\right]\right\}}{\sin\left\{\pi \left[k - 2N \Delta f \left(R_{a0} + v_{RM} NT_r\right) / c - N f_d^a T_r\right] / N\right\}} - \exp\left\{-j4\pi f_0 \left[R_{a0} + \left(v_a + v_R\right) m NT_r\right] / c + j \frac{N-1}{N} \pi \left[k - 2N \Delta f \left[R_{a0} + \left(v_a + v_R\right) m NT_r\right] / c - N f_d^a T_r\right]\right\} \cdot \frac{\sin\left\{\pi \left[k - 2N \Delta f \left[R_{a0} + \left(v_a + v_R\right) m NT_r\right] / c - N f_d^a T_r\right]\right\}}{\sin\left\{\pi \left[k - 2N \Delta f \left[R_{a0} + \left(v_a + v_R\right) m NT_r\right] / c - N f_d^a T_r\right] / N\right\}} \quad (18)$$

从式(18)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被完全消去。由于杂波内部各点相对雷达的运动是一致的, 即移位量是相同的, 因此两帧 HRRP 中 b 信号被对齐意味着所有静止杂波信号同时被对齐, 从而两帧 HRRP 中相同成分的杂波(占据 $N\Delta f - l$ 个高分辨单元)均被消去。为继续对消 $H_{1,m+1}(k)$ 中剩余的杂波(杂波区中前 l 个高分辨单元的杂波未被对消), 可采取同样的方法用 $H_{2m+1}(k)$ 与 $H_{1,m+1}(k)$ 进行对消。式(18)中右边两项对应不同帧周期的运动目标回波信号。为使两个运动目标回波信号相减仍能保留目标完整信息, 要求这两个目标峰值位于不同的高分辨单元。类似于前面的分析, 同样要求满足式(12)的条件, 其中 $v = v_a$, $P = \left(v_a + v_R\right) NT_r / \Delta r$ 。

该方法在具体实现时, 雷达平台的运动速度 v_R 不是精确已知的。根据式(17), 较小的 v_R 误差将导致大的 $\Delta\varphi$ 误差。因此, 不能将式(17)计算得到的 $\Delta\varphi$ 值用于式(16)进行相位补偿。为估计 $\Delta\varphi$, 可先将 $H_1(k)$ 和 $H_{m+1}(k)$ 中相同成分的杂波信号对齐, 然后测量杂波信号在这两帧 HRRP 之间的相位差。考虑到噪声对杂波相位的影响, 只测量杂波峰值信号的相位差 $\Delta\varphi_i$ (i 表示峰值个数), 然后对各 $\Delta\varphi_i$ 值求平均, 该平均值 $\overline{\Delta\varphi_i}$ 作为 $\Delta\varphi$ 的估计值。目标信号或者目标和杂波的混合信号也会在 HRRP 中出现峰值, 它们对应的相位差 $\Delta\varphi_i$ 一般偏离 $\overline{\Delta\varphi_i}$ 值较远, 因而容易区分。 $\Delta\varphi_i$ 值也有可能和 $\overline{\Delta\varphi_i}$ 值较近, 但将这些 $\Delta\varphi_i$ 值计算在 $\overline{\Delta\varphi_i}$ 之内, 不会大幅改变 $\overline{\Delta\varphi_i}$ 值。

同样, 根据式(15), 已知的雷达速度 v'_R 不精确也会使得 l 值计算不准。假设 v'_R 的最大可能误差为 δ_R , 则真实移位量 l 的可能范围为 $\left[\left(v'_R - \delta_R\right) m NT_r / \Delta r, \left(v'_R + \delta_R\right) m NT_r / \Delta r\right]$ 。该范围通常很小, 可根据两帧 HRRP 之间杂波相关性对移位量 l 进行搜索, 使得杂波对齐效果达到最佳。另一方面, 在具体实现式(16)的处理时, 要求移位量 l 为整数值。而根据式(15)的计算结果, l 可能为非整数值, 取整运算

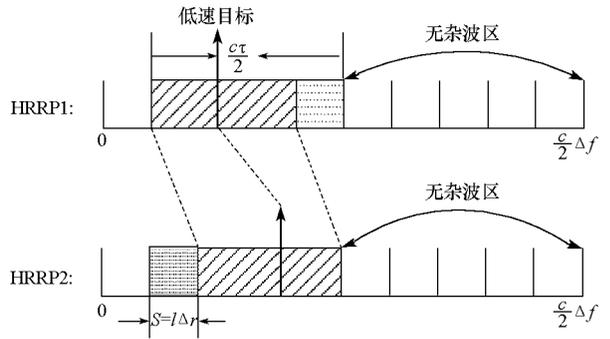


图 1 雷达运动下不同帧 HRRP 中杂波移位
Fig. 1 Clutter shift between different HRRPs in condition of radar movement

将使两帧 HRRP 中杂波不能精确对齐(最大对齐误差为 0.5 个高分辨单元), 从而杂波相消的性能将下降。为此, 需要对采样信号作补零 IDFT 成像处理, 使得每个杂波峰值在 HRRP 中占据较多的距离单元, 以利于两帧 HRRP 中杂波的精确对齐。补零点数为 $9N$, 则每个点杂波峰值占据 10 个距离单元(等于 1 个高分辨单元), 这样杂波对齐误差最大仅为 0.5 个距离单元, 即 0.05 个高分辨单元。

对齐相消法的具体实现步骤总结如下:

(1) 根据式(12)的要求, 确定所需的最小帧间隔数 m ;

(2) 根据帧间隔数 m 、已知的雷达速度 v'_R 、最大可能误差 δ_R 和 IDFT 成像处理的补零倍数 I , 确定真实移位置 l 的可能范围 $[(I+1)(v'_R - \delta_R)mNT_r/\Delta r, (I+1)(v'_R + \delta_R)mNT_r/\Delta r]$;

(3) 在 l 可能的整数值范围内根据 $H_1(k-l)$ 与 $H_{m+1}(k)$ 之间杂波相关性进行搜索, 使得两帧 HRRP 中杂波对齐效果达到最佳, 并得到真实移位置 l 的整数值 t ;

(4) 去掉 $H_1(k-t)$ 杂波区中后 t 个距离单元内的杂波, 测量 $H_1(k-t)$ 与 $H_{m+1}(k)$ 之间相同成分杂波峰值信号的相位差 $\Delta\varphi_i$, 并计算各 $\Delta\varphi_i$ 的平均值 $\overline{\Delta\varphi}$;

(5) 将 $H_1(k-t) \exp(j\overline{\Delta\varphi})$ 与 $H_{m+1}(k)$ 进行相减, 得到最佳杂波对消结果 $H_{1,m+1}(k)$;

(6) 采取同样的步骤, 用 $H_{2m+1}(k+t) \exp(-j\overline{\Delta\varphi})$ 与 $H_{1,m+1}(k)$ 相减, 消去 $H_{1,m+1}(k)$ 中剩余的杂波。若 $t \leq N\tau\Delta f(I+1)/2$, $H_{1,m+1}(k)$ 中杂波被对消完毕; 否则继续用第 $3m+1$ 帧 HRRP 与之对消, 直到 $H_{1,m+1}(k)$ 中杂波全部被对消。

4 仿真

静止平台下杂波相消原理的实验验证见文献[6]。运动平台下杂波相消仿真试验中雷达波形参数为: $f_0 = 40\text{GHz}$, $f_r = 200\text{kHz}$, $\Delta f = 1\text{MHz}$, $N = 512$, $\tau = 100\mu\text{s}$ 。雷达真实速度 $v_R = 97\text{m/s}$, 已知雷达速度 $v'_R = 100\text{m/s}$, 且最大可能误差 $\delta_R = 5\text{m/s}$ 。假设杂波静止, 运动点目标与雷达的初始距离为 $R_0 = 610\text{m}$, 速度为 $v_a = 30\text{m/s}$ 。根据式(12), 若要求保留所有速度大于 20m/s 的低速点目标完整信息, 要求帧间隔数 $m \geq 12$ 。为使杂波对齐误差不超过 0.05 个高分辨单元, IDFT 成像处理时补零倍数 I 取为 9。根据第二步的计算结果, 真实移位置 l 的范围为 $[99.615, 110.1]$, 即 l 可能取整数 100, 101, ..., 110。

图 2、3 分别给出了第 1 帧和第 13 帧回波信号同一采样时刻 ($t_s = (4.2 + 5n)\mu\text{s}$) 所成的两幅 HRRP, 其中峰值 CNR 取为 40dB。由于目标低速运动, 两幅图中该目标均没有跳出杂波区(位于第 700~1700 个距离单元), 完全被强杂波所淹没, 从而不能从任一 HRRP 中检测到该点目标。图 2、3 中杂波之间不仅发生了移位, 而且杂波成分发生了改变: 第 1 帧 HRRP 单独拥有最右边 3 个杂波峰值, 而第 13 帧 HRRP 单独拥有最左边 3 个杂波峰值。因此, 这两帧 HRRP 直接相减不能相消杂波。

将第 1 帧 HRRP 中杂波移位以与第 13 帧 HRRP 中杂波对齐, 图 4 为 $H_1(k-100)$ 与 $H_{13}(k)$ 的杂波对齐效果, 图 5 为 $H_1(k-102)$ 与 $H_{13}(k)$ 的杂波对齐效果。根据图 4 可知, $H_1(k-100)$ 与 $H_{13}(k)$ 之间绝大部分杂波的峰值位置相差 2 个距离单元。根据图 5 可知, $H_1(k-102)$ 与 $H_{13}(k)$ 之间绝大部分杂波峰值被精确对齐, 少数没有被对齐的峰值可能为目标信号。因此, $H_1(k-102)$ 与 $H_{13}(k)$ 的杂波对齐效果更好。同样, 分别比较 $H_1(k-101)$ 、 $H_1(k-103)$.. $H_1(k-110)$ 与 $H_{13}(k)$ 的杂波对齐效果, 可以发现 $H_1(k-102)$ 与 $H_{13}(k)$ 的杂波对齐效果最好, 故认为 $t = 102$ 。将雷达真实速度代入式(15)进行计算得 $l_{12} = 10.17$, 补零后 $l_{12} = 101.7$, 这表明搜索得到的结果正确。

$H_1(k-102)$ 与 $H_{13}(k)$ 共有的杂波位于第 800~1700 个距离单元, 这两幅 HRRP 之间该杂波区的相位差如图 6 所示。图 6 中大部分峰值的相位差位于区间 $[130.34^\circ, 144.85^\circ]$, 即波动较小。根据前面分

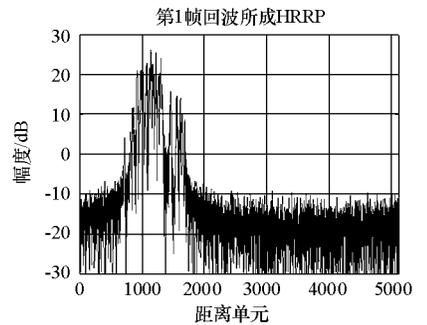


图 2 第 1 帧回波所成 HRRP
Fig. 2 The first frame of HRRP

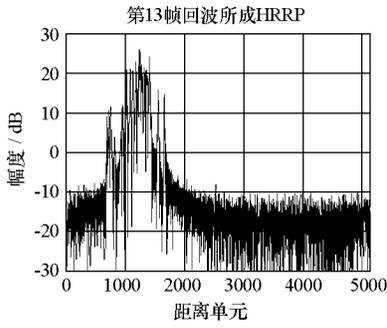


图3 第13帧回波所成HRRP
Fig. 3 The 13th frame of HRRP

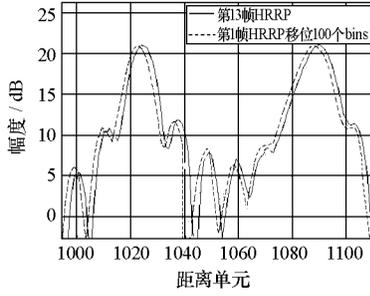


图4 $H_1(k-100)$ 与 $H_{13}(k)$ 的对齐效果
Fig. 4 The aligning effect of $H_1(k-100)$ and $H_{13}(k)$

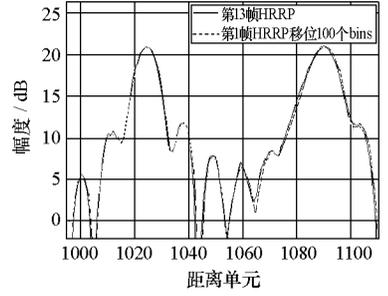


图5 $H_1(k-102)$ 与 $H_{13}(k)$ 的对齐效果
Fig. 5 The aligning effect of $H_1(k-102)$ and $H_{13}(k)$

析,可以认为这些峰值对应杂波信号。位于第1300~1380个距离单元内少数几个峰值的相位差波动很大,根据前面分析,认为它们对应目标信号。其它距离单元内也有些点的相位差波动较大,它们是HRRP中低幅度点,可认为没有信号。对各杂波峰值的相位差 $\Delta\varphi_i$ 求平均,得相差平均值 $\overline{\Delta\varphi_i} = 138.4^\circ$ 。

去掉 $H_1(k-102)$ 杂波区中最右边3个杂波峰值,并将 $H_1(k-102) \exp(j\pi 138.4/180)$ 与 $H_{13}(k)$ 相减,结果如图7所示。根据图7, $H_{13}(k)$ 中第800~1700个距离单元内的杂波均被相消。采取同样的步骤,用 $H_2(k+102) \exp(-j\pi 138.4/180)$ 与 $H_{13}(k)$ 相减即可消去 $H_{13}(k)$ 中剩余的杂波,结果如图8所示。根据图8, $H_{13}(k)$ 中杂波全部被对消,只剩下目标和噪声。

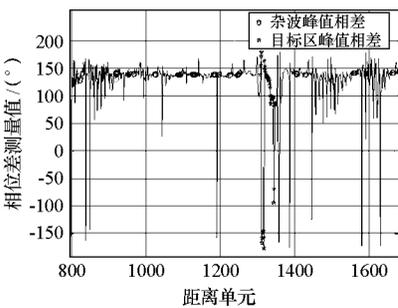


图6 两帧HRRP间杂波区的相位差
Fig. 6 Clutter phase difference between two HRRPs

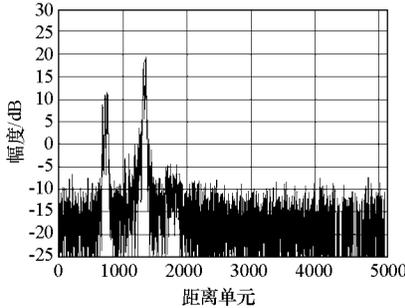


图7 第一步杂波相消结果
Fig. 7 Clutter cancellation effect after the first step

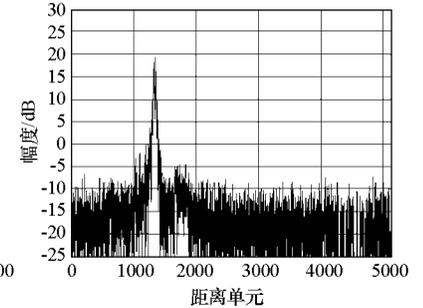


图8 第二步杂波相消结果
Fig. 8 Clutter cancellation effect after the second step

5 结论

理论分析和试验结果表明,本文提出的杂波相消方法能够有效抑制频率步进雷达HRRP中静止杂波,而且能够很好地保持静止杂波区中低速目标的HRRP特性,从而频率步进雷达具备了应付强杂波环境下各种不同速度目标的能力。在机载或弹载频率步进雷达对车辆、坦克和舰船的检测和识别等方面,该杂波相消方法具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] Wehner D R. High Resolution Radar[M] 2nd ed. Artech House, 1995.
 [2] Berizzi F, Mantorella M, Bernabo M. A Range Profiling Technique for Synthetic Wideband Radar [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2008, 2 (5): 334- 350.
 [3] Schimpf H, Wahlen A. High Range Resolution by Means of Synthetic Bandwidth Generated by Frequency-stepped Chirps [J]. IEE Electronics Letters Online, 2003, 39(18): 1- 2.
 [4] Gill G S. Step Frequency High PRF Waveform Design [D]. California: Naval Postgraduate School Monterey, 1996.
 [5] Gill G.S. Step Frequency Waveform Design and Processing for Detection of Moving Targets in Clutter [C]// IEEE National Radar Conference, 1995: 573- 578.
 [6] 王飞行, 贺思三, 付强. 静止平台下频率步进雷达杂波相消新方法[J]. 信号处理, 2009, 25(8A): 595- 598.