

利用时域二维数据幅度加权的目标信号增强方法

贺 峰¹ 刘颀武² 朱国富³ 周智敏³

(1. 空军装备研究院雷达与电子对抗研究所, 北京 100085; 2. 中国人民解放军第 66011 部队, 北京 102600;
3. 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 穿墙雷达回波成分复杂, 往往同时存在着目标信号、噪声、杂波、RFI 干扰等各种成分。针对回波中目标信号与其他信号的分布特点, 提出一种利用时域二维数据进行幅度加权的目标信号增强方法并给出两种具体实现算法。该方法基于十字型滑动窗口处理思想, 利用每组滑窗对应的快、慢时间域二维数据计算加权系数, 并对快、慢时间域交叠处的回波数据进行幅度加权处理, 通过对全部回波数据的滑窗加权遍历, 提高目标信噪比和信杂比。理论分析和仿真结果表明, 当快时间域和慢时间域上的回波信号与杂波、噪声功率比之和高于 0dB 时, 所提方法仅需一到两次加权处理即可有效增强目标信号。将新方法应用于穿墙雷达实测数据中, 有效抑制了近距离处耦合干扰残余的不利影响, 增强了目标信号幅度, 有利于后续目标检测及特征提取。

关键词: 穿墙雷达; 幅度加权; 信号增强

中图分类号: TN95 文献标识码: A 文章编号: 1003-0530(2013)09-1148-09

A Target Echo Enhancement Method with Amplitude Weighting Strategy along Two-dimensional Time Domain Data

HE Feng¹ LIU Jie-wu² ZHU Guo-fu³ ZHOU Zhi-min³

(1. Radar and EW Institute, Air Force Armaments Academy, Beijing 100085, China;
2. Unit 66011 of PLA, Beijing 102600, China; 3. School of Electronic Science and Engineering,
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: There is not only target echo but also noise, clutter, and radio frequency interference (RFI) within through the wall radar echoes. A novel target echo enhancement method with amplitude weighting strategy along two-dimensional time domain data is proposed and two realization algorithms are carried out. Based on cross-shape sliding window processing, the method utilizes both fast and slow time domain echo within the sliding window to calculate weighted coefficients, and adjusts amplitude of overlap data between fast and slow time domain in order to improve the signal to noise ratio (SNR) and the signal to clutter ratio (SCR). Theoretical analysis and simulation results indicate that the method can enhance target echo effectively with just once or twice weighting processing when the sum of between echo signal to clutter and noise ratio (SCNR) in fast time domain and that in slow time domain is above 0dB. Experimental results indicate that the method can decrease residual coupling, enhance amplitude of target echo, and be helpful to target detection and signature extraction.

Key words: through the wall radar; amplitude weighting; echo enhancement

1 引言

穿墙雷达可为行动人员提供建筑物内或障碍

物后人的位置和运动状态, 或为搜救人员指示被废墟掩埋的幸存者的位置, 为解救人质或拯救受困者赢得宝贵时间, 因此在反恐救援、灾后搜救等方面

收稿日期: 2013-03-14; 修回日期: 2013-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(60972121); 高等学校博士学科点专项科研基金(20094307120004)

具有广泛的用途,近年来正受到学术界和工业部门的密切关注^[1]。穿墙雷达工作环境复杂,实际回波往往同时存在着目标信号、噪声、杂波、RFI 干扰等各种成分,增强目标信号、抑制其他信号是提高穿墙雷达目标检测性能的关键。常用目标信号增强方法主要有:信号积累法^[2]、脉冲对消法^[3]、高通滤波法^[4,5]、背景相消法^[6]、中值滤波法^[7]、时域幅度均衡法^[8]等。信号积累法(如相参脉冲积累^[2])在一定程度上可有效提高信噪比,但雷达与目标间的相对运动引起信号相参性下降、盲速对重复频率的特殊要求等限制了积累性能;脉冲对消、高通滤波和背景相消对固定杂波抑制效果较好,但对于时变杂波的抑制效果有限;中值滤波、时域幅度均衡对瞬时射频干扰(RFI)比较有效,但对沿慢时间域幅度稳定分布的干扰的抑制能力有限,对杂波、噪声等其他成分的抑制能力不足。上述信号增强处理方法在功能上相互间没有重合,雷达回波经过上述处理后,仍然可能存在较强的噪声、杂波和干扰信号成分,影响目标检测。另外,在近距离探测中,回波信号的幅度衰减较快,动态范围较大,严重影响目标检测性能。因此,经过传统目标信号增强处理后有必要进一步抑制剩余的其他信号成分、降低回波中目标信号动态范围、增强目标回波信号。

综合考虑上述情况,本文研究利用时域二维信息的目标信号增强方法。首先建立由平动和摆动构成的运动目标频率步进连续波(Stepped Frequency Continuous Wave, SFCW)雷达回波模型,其次基于回波中目标、杂波、噪声以及干扰信号的特点,提出一种利用时域二维数据进行幅度加权的目标信号增强方法,该方法预先设定十字型滑窗,利用滑窗内的快时间域数据和慢时间域数据计算加权系数,并对快、慢时间域数据交叠处的回波数据进行幅度加权处理,最后利用仿真实验和穿墙雷达实测数据处理结果验证了该方法的有效性和实用性。

2 运动目标雷达回波

通常认为目标整体雷达回波可由多个强散射点的回波构成^[9]。设目标整体沿直线运动,目标自

身做钟摆简谐振动,从而目标各散射点做平动和摆动构成的复杂运动,雷达与运动目标的几何关系如图 1 所示。 $O_s Q$ 为垂直于雷达坐标系 XOY 平面的支撑体, $O_s M$ 和 $O_s N$ 沿直线做平动的同时,围绕共同的顶点 O_s 以 $O_s Q$ 为对称轴做钟摆简谐振动,摆动方向相反,且与 $O_s Q$ 几乎在同一平面内,但不考虑摆动过程中碰撞、遮挡等问题(类似于运动人体目标躯干与四肢的结构)。雷达视线方向始终朝向目标摆动的对称轴 $O_s P$, P 为摆动顶点 O_s 在雷达坐标系 XOY 平面内的投影,称 $O_s P$ 与平动方向构成的平面为运动平面, $O_s P$ 与摆动方向构成的平面为摆动平面, $O_s P$ 与雷达视线方向构成的平面为雷达观测平面,运动平面与摆动平面共面(夹角为 0)。

初始时刻运动平面与雷达观测平面的夹角为 φ ,目标摆动顶点 O_s 与雷达水平距离为 R_0 , t 时刻目标整体平动距离为 $R(t)$,散射点 A 的摆动角 $\theta_i(t)$ 大小为 $\theta_i(t) = \theta_{\max} \sin(\omega t + \phi_i)$, θ_{\max} 为摆动角振幅, ω 为摆动角频率, ϕ_i 为摆动角初相,决定初始时刻摆动位置 $i = 1, 2, \dots, I$, I 为构成摆动结构的散射点数目。 t 时刻距顶点为 l_i 处的散射点目标 A 与雷达径向距离 $R_i(t)$ 为^[10]

$$R_i(t) \approx R_0 - R(t) \cos \varphi + l_i \cos \varphi \sin \theta_i(t) \quad (1)$$

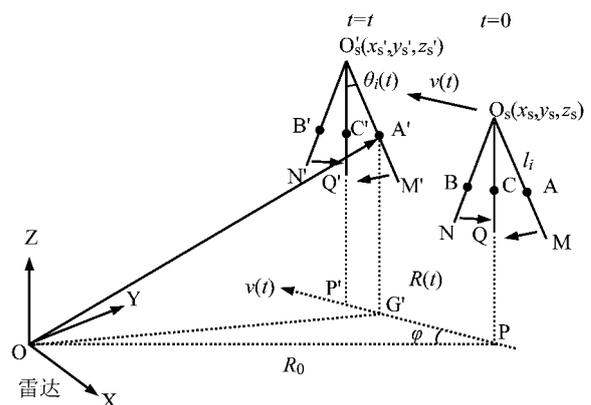


图 1 运动目标雷达观测坐标系
Fig. 1 Geometry of radar and a moving target

假设 SFCW 雷达单个频点的发射时宽为 T ,载频初始频率为 f_0 ,频率步进增量为 Δf ,频率步进数为 N ,采样间隔为 T ,则相对雷达径向距离为 $R_i(t)$ 处点目标零中频雷达回波可表示为^[10]

$$s_i(m, n) = \rho_i(m, n) \exp\{-j4p(f_0 + n\Delta f)(R_0 - R(m, n) \cos \varphi + l_i \cos \varphi \sin \theta_i(m, n)) / c\} \quad (2)$$

式中: $\rho_i(m, n)$ 为目标后向散射系数, $\theta_i(m, n) = \theta_i((m-1)NT + nT)$ 为 $\theta_i(t)$ 在 $(m-1)NT + nT$ 时刻的采样, $t_m = (m-1)NT$ 表示发射时刻, 称为慢时间, $t_n = nT$ 表示以发射时刻为起点的时间, 称为快时间, $m = 1, 2, 3, \dots, M$ 为采样帧数, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 表示第 m 帧内第 n 个调制周期。同理可得散射点 B 与散射点 C 的零中频雷达回波, 其中散射点 B 的雷达回波与散射点 A 的雷达回波形式相似, 而散射点 C 的雷达回波与目标摆动无关。对所有散射点目标回波求和, 即得到运动目标的雷达回波表达式, 如下式表示

$$\begin{aligned} s(m, n) &= \sum_{i=1}^I \rho_i(m, n) \cdot \exp\{-j4p(f_0 + n\Delta f)(R_0 - R(m, n) \cos \varphi + l_i \cos \varphi \sin \theta_i(m, n)) / c\} \\ &+ \sum_{j=1}^J \rho_j(m, n) \cdot \exp\{-j4p(f_0 + n\Delta f)(R_0 - R(m, n) \cos \varphi) / c\} \\ &+ \sum_{q=1}^Q \rho_q(m, n) \cdot \exp\{-j4p(f_0 + n\Delta f)R_q(m, n) / c\} + s_{\text{noi}}(m, n) + s_{\text{ran}}(m, n) \\ &= s_{\text{com}}(m, n) + s_{\text{tra}}(m, n) + s_{\text{gro}}(m, n) + s_{\text{noi}}(m, n) + s_{\text{ran}}(m, n) \quad (3) \end{aligned}$$

式中: $j = 1, 2, \dots, J$, J 为构成支撑结构的散射点数目, Q 为构成地物杂波散射点数目, $\rho_q(m, n)$ 为地物杂波散射点后向散射系数, $R_q(m, n)$ 为构成地物杂波的第 q 个散射点与雷达间的径向距离, 通常 $\rho_q(m, n)$ 和 $R_q(m, n)$ 均是变量。 $s_{\text{com}}(m, n)$ 和 $s_{\text{tra}}(m, n)$ 分别表示目标复杂运动部分雷达回波和目标平动部分雷达回波, $s_{\text{gro}}(m, n)$ 表示目标周围物体回波(即地物杂波), $s_{\text{noi}}(m, n)$ 为随机噪声信号, $s_{\text{ran}}(m, n)$ 为随机干扰信号。

对式(3)沿快时间方向进行离散傅立叶逆变换(Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT), 即可得到目标的一维距离像, 具体推导过程可参见文献[10, 11]。利用不同帧间一维距离像组的相干性, 可合成得到目标的时间-距离像。一般来说, 雷达目

标回波中存在着较强的杂波 $s_{\text{gro}}(m, n)$ 、噪声 $s_{\text{noi}}(m, n)$ 和干扰 $s_{\text{ran}}(m, n)$ 。这些成分会严重影响 $s_{\text{com}}(m, n)$ 和 $s_{\text{tra}}(m, n)$ 在图像中的质量, 为了提取目标运动特征, 需要先从雷达回波 $s(m, n)$ 中抑制 $s_{\text{gro}}(m, n)$ 、 $s_{\text{noi}}(m, n)$ 和 $s_{\text{ran}}(m, n)$, 提高信杂比(Signal-to-Clutter Ratio, SCR)、信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)和信干比(Signal-to-Interference Ratio, SIR)。

3 利用时域二维数据的幅度加权

3.1 算法基本原理

经过积累和杂波抑制处理的雷达目标回波, 信噪比、信杂比和信干比得到提高, 但是仍然存在较强的耦合、杂波、噪声剩余以及射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)等信号成分。一般来说, 耦合分布在距离雷达较近的区域(即有限的快时间区域)并且幅度沿慢时间域稳定分布, 杂波分布在整个探测距离内, 并且幅度沿慢时间域稳定分布, RFI随机分布在慢时间域内并且幅度沿快时间域稳定分布, 而噪声则分布于整个探测距离内, 并且幅度沿快、慢时间域内随机分布。文献[8]提出一种图像域幅度均衡的干扰抑制方法, 对 RFI 具有较好的抑制效果, 但该方法本质上仅仅是对快时间域数据进行了处理, 因而对耦合、杂波和噪声的抑制能力有限。文献[12]提出一种改进的杂波抑制方法, 对耦合、杂波和噪声具有较好的抑制效果, 但该方法本质上仅利用慢时间域的数据求取加权系数, 对 RFI 抑制能力有限。

本文基于十字型滑动窗口的思想, 提出一种利用时域二维数据进行幅度加权的信号增强新方法。将目标信号增强思路从一维(快时间域或慢时间域)扩展至二维(快时间域和慢时间域), 把图像域单个维度上的加权处理扩展为对图像域单个像素的加权处理, 从而抑制沿快时间域和沿慢时间域二维分布的非目标信号。该方法的原理框图如图2所示, 其中: $z(m, n)$ 为时域输入信号, $z'(m, n)$ 为时域输出信号, $Q(m, n)$ 为幅度加权系数, $Q_1(m, n)$ 为沿快时间方向的幅度加权系数, $Q_2(m, n)$ 为沿慢时间方向的幅度加权系数。

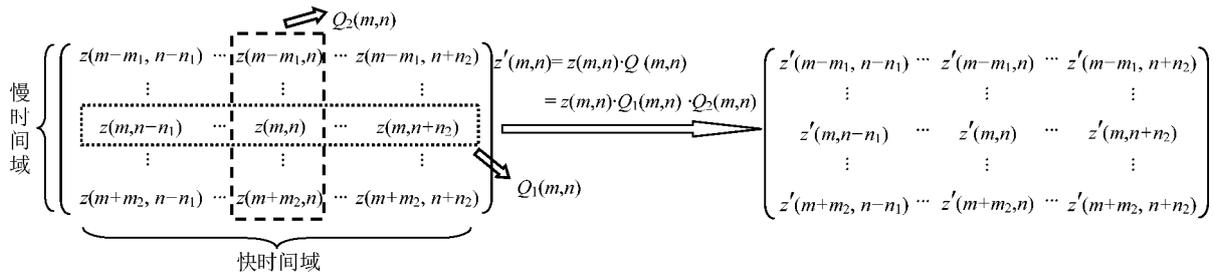


图 2 利用时域二维数据幅度加权的目标信号增强新方法的原理图

Fig. 2 Principle of target echo enhancement method with amplitude weighting strategy along two-dimensional time domain data

上述方法的关键是计算幅度加权系数,理论上加权系数可有多种选取方法,本文从幅度和功率两个角度提出如下两种加权系数选取算法:

(1) 取 $Q_1(m, n)$ 和 $Q_2(m, n)$ 分别为待处理数据幅度与快时间域、慢时间域数据的平均幅度之比值,即

$$Q_1^a(m, n) = \frac{|z(m, n)|}{|z(m, n_0)|} \quad (4)$$

$$Q_2^a(m, n) = \frac{|z(m, n)|}{|z(m_0, n)|} \quad (5)$$

从而有:

$$Q^a(m, n) = \frac{|z(m, n)|^2}{|z(m, n_0)| \cdot |z(m_0, n)|} \quad (6)$$

式中: $|z(m, n_0)| = \frac{1}{n_1+n_2} \sum_{\substack{n_0 \in [n-n_1, n+n_2] \\ n_0 \neq n}} |z(m, n_0)|$

$|z(m_0, n)| = \frac{1}{m_1+m_2} \sum_{\substack{m_0 \in [m-m_1, m+m_2] \\ m_0 \neq m}} |z(m_0, n)|$

n_1, n_2, m_1, m_2 分别是沿快时间域和沿慢时间域的数据宽度控制变量,均为整数。

(2) 取 $Q_1(m, n)$ 和 $Q_2(m, n)$ 分别为待处理数据功率与快时间域、慢时间域数据的平均功率之比值,即

$$Q_1^p(m, n) = \frac{|z(m, n)|^2}{|z(m, n_0)|^2} \quad (7)$$

$$Q_2^p(m, n) = \frac{|z(m, n)|^2}{|z(m_0, n)|^2} \quad (8)$$

从而有:

$$Q^p(m, n) = \frac{|z(m, n)|^4}{|z(m, n_0)|^2 \cdot |z(m_0, n)|^2} \quad (9)$$

式中: $|z(m, n_0)|^2 = \frac{1}{n_1+n_2} \sum_{\substack{n_0 \in [n-n_1, n+n_2] \\ n_0 \neq n}} |z(m, n_0)|^2$

$|z(m_0, n)|^2 = \frac{1}{m_1+m_2} \sum_{\substack{m_0 \in [m-m_1, m+m_2] \\ m_0 \neq m}} |z(m_0, n)|^2$

一般来讲,快时间对应雷达探测距离,为了覆盖整个探测距离,快时间域数据是同时处理的,因此可选择 n_1 和 n_2 为 $n_1 = n-1, n_2 = N-n$;慢时间对应雷达重复周期,慢时间域数据是序贯处理的,若考虑信号处理的实时性,则可选择 m_1 和 m_2 为 $m_1 = m_0, m_2 = 0, m_0$ 为固定正整数,否则可选择 m_1 和 m_2 为 $m_1 = m-1, m_2 = M-m$ 。

3.2 算法适用性分析

为了增强当前数据幅度,加权系数需满足: $Q(m, n) > 1$,从而有

$$(Q^a(m, n))^2 = (Q_1^a(m, n))^2 \cdot (Q_2^a(m, n))^2 > 1,$$

$$Q^p(m, n) = Q_1^p(m, n) \cdot Q_2^p(m, n) > 1 \quad (10)$$

即

$$\frac{|z(m, n)|^2}{|z(m, n_0)|^2} \cdot \frac{|z(m, n)|^2}{|z(m_0, n)|^2} = \text{SCNR}_n^a \cdot \text{SCNR}_m^a > 1,$$

$$\frac{|z(m, n)|^2}{|z(m, n_0)|^2} \cdot \frac{|z(m, n)|^2}{|z(m_0, n)|^2} = \text{SCNR}_n^p \cdot \text{SCNR}_m^p > 1 \quad (11)$$

等价于

$$\text{SCNR}_n^a(\text{dB}) + \text{SCNR}_m^a(\text{dB}) > 0,$$

$$\text{SCNR}_n^p(\text{dB}) + \text{SCNR}_m^p(\text{dB}) > 0 \quad (12)$$

式中: SCNR 表示回波信号(不是目标信号)与杂波、噪声、干扰的功率比,简称为信杂噪比(Signal-to-Clutter and Noise Ratio, SCNR), SCNR_n 表示沿快时

间域的信杂噪比 $SCNR_m$ 表示沿慢时间域的信杂噪比,上标 a 表示从平均幅度的角度求杂波、噪声、干扰的平均功率,进而计算信杂噪比,上标 p 表示直接计算杂波、噪声、干扰的平均功率,进而计算信杂噪比。

式(11)表明:沿快时间域和沿慢时间域的信杂噪比的乘积确定了数据幅度加权值。一般来说,杂波、噪声以及干扰信号的功率分布比较平稳,目标信号的功率大小决定了当前回波功率的大小,所以加权系数随当前回波功率的改变而调整,当前回波中信号成分越强,即信杂噪比越高,加权系数越大。另一方面,为了达到信号增强的目的,回波的信杂噪比应满足式(11)和(12)的要求。

经上述处理后,增强了目标处信号,减弱了非目标处信号,有利于后续目标检测与特征提取。下面利用仿真算例和穿墙雷达实测数据处理结果来进一步分析上述处理的影响。

4 实验分析

4.1 仿真实验

假设探测区域为自由空间,目标为散射点目标,目标回波存在着固定散射点杂波、噪声和 RFI,采用 SFCW 雷达回波模型,具体仿真参数如下: $R_0 = 20\text{ m}$, $J = 1$, $z_c = z_s / 2$, $\rho_j = 1$, $R_q = \{R_0 - 7.5\text{ m}, R_0 - 5\text{ m}, R_0 - 2.5\text{ m}, R_0, R_0 + 2.5\text{ m}\}$,原始回波中目标相对于上述固定散射点的信杂比 SCR 分别为 $SCR = \{-30\text{ dB}, -25\text{ dB}, -20\text{ dB}, -15\text{ dB}, -10\text{ dB}\}$,在观测时间内,存在着沿慢时间域随机分布的 RFI,信干比 SIR 为 0 dB ,其余参数与文献[10]给出的仿真参数相同,回波中含有加性复高斯白噪声,原始回波的信噪比 SNR 为 -20 dB 。某次仿真得到的运动目标的时间-距离像如图3所示,其中图3(a)为原始回波时间-距离像,图3(b)为自适应背景相消^[10](Adaptive Background Subtraction, ABS)处理结果,图3(c)~图3(f)分别为本文方法的一次和二次加权处理结果。

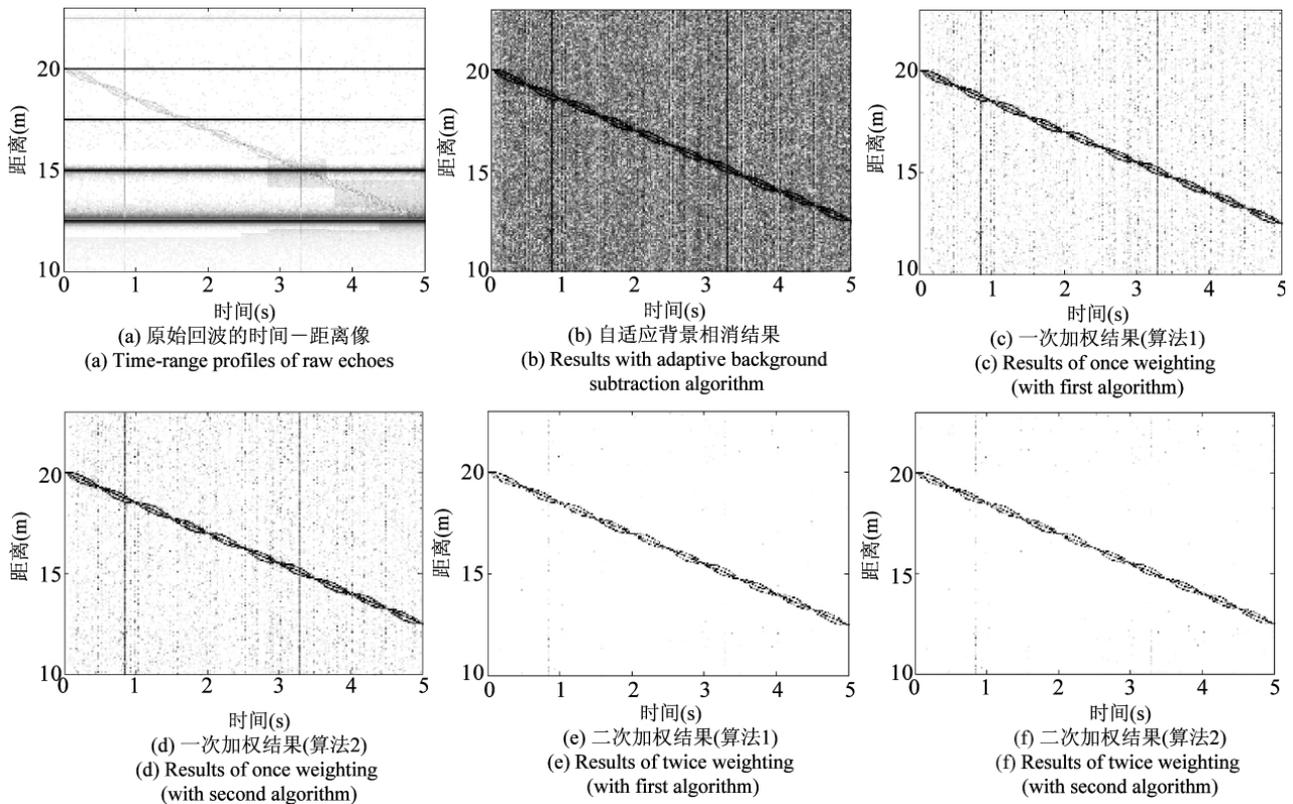


图3 运动目标的时间-距离像(仿真数据)

Fig. 3 Time-range profiles of the moving target (simulated)

如图 3(a) 所示,原始回波经 IDFT 得到一维距离像进而合成时间-距离像的过程中,会有信号相参处理增益 提高了 SNR,但 SCR 和 SIR 保持不变,强杂波以及 RFI 的存在严重污染了时间-距离像,难以从时间-距离像分辨目标的存在;如图 3(b) 所示,自适应背景相消对固定杂波有较好的抑制效果,但对随机噪声和 RFI 的抑制能力有限,时间-距离像仍然受到严重污染;如图 3(c) ~ 图 3(f) 所示,经一次加权处理后,噪声受到有效抑制,剩余噪声随机分布于图像中,时间-距离像得到明显改善;而经过二次加权处理后,RFI 也受到明显抑制,目标信号成分得到明显加强。

取第 100 帧(对应于图中的 2.048 s)数据进行对比分析,如图 4 所示,图中给出的是目标所在区域内高分辨距离像,为了便于比较,不同处理算法所得结果均进行了幅度归一化处理。由图 4 可知,加权处理有效提高了信杂噪比,增强了目标信息。经过积累、杂波抑制和加权等处理后距离像中的目标信号及噪声、杂波及干扰成分迭加在一起,难以分别计算 SNR、SCR 和 SIR。为定量分析加权处理对目标信号的影响,定义峰值信杂噪比(Peak of Signal-to-Clutter and Noise Ratio, PSCNR)为目标信号峰值功率与其他成分信号平均功率之比。对图中所示结果计算 PSCNR,结果见表 1。一方面,经过 1 次加权和 2 次加权处理后,PSCNR 分别提高了 22 dB 和 53 dB 左右,另一方面,两种加权算法的处理结果几乎一致,因此,两种加权算法均能够有效提高信杂噪比,有助于后续目标检测与特征提取处理。

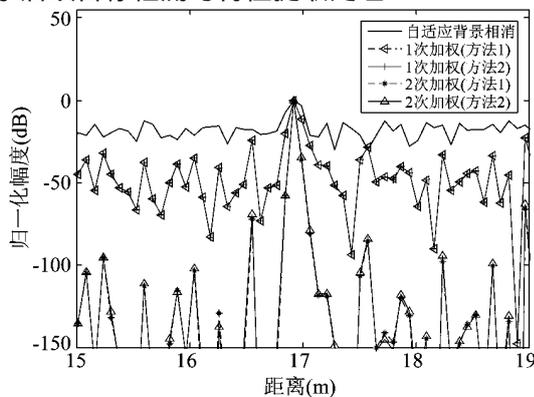


图 4 目标的高分辨距离像(第 100 帧仿真数据)

Fig. 4 The high resolution range profiles of the target (the 100th frame of simulated data)

表 1 各种算法处理后数据的 PSCNR(仿真实验结果)

Tab. 1 PSCNRs of data with different processing algorithms(simulated)

处理 方法	自适应 背景相消	1 次加权 (算法 1)	1 次加权 (算法 2)	2 次加权 (算法 1)	2 次加权 (算法 2)
PSCNR/dB	15.64	37.26	37.73	68.96	67.10

4.2 实测数据处理

仿真实验验证了利用时域二维数据的幅度加权方法的有效性,下面将该方法应用于实测数据中,检验其实用性。采用国防科技大学研制的超宽带穿墙雷达系统,该系统发射冲激脉冲信号,信号中心频率为 750 MHz, -3dB 带宽亦为 750 MHz,信号波形如图 5 所示,该系统的其他组成可见文献[10]。雷达对某工厂仓库内的运动人体目标进行探测,仓库的墙壁为砖混结构,厚度约为 0.30 m,人体目标径向雷达匀速往复走动。

值得指出,本文方法虽然是基于 SFCW 信号模型得到的,但是 SFCW 信号经 IDFT 得到的一维距离像和冲激信号时域回波具有相同的物理意义,即均是对目标的时域响应,因此本文方法可直接应用于冲激脉冲信号回波数据处理。某批穿墙雷达人体目标探测数据的处理结果如图 6 所示,其中图 6(a) 是自适应背景相消的结果,图 6(b) 和图 6(c) 是采用本文提出的二维幅度加权法对图 6(a) 所示结果分别进行一次和二次处理的结果。由仿真实验结果可知,两种实现算法的处理结果基本相同,因此仅给出了算法 2 的处理结果。图 6(a) 所示结果表明,目标的时间-距离像呈折线变化,折线斜率绝对值近似相同,方向分段变化,反映了目标径向雷达匀速往复运动的规律,与实际目标运动状态相符;在距离雷达 2 m 以内的区域存在较强的杂波剩余,应为幅度和时延均有时变性的耦合波未被完全抑制的结果,较强的杂波剩余降低了目标信杂噪比;另外,由于超宽带信号在发射和接收过程中会发生波形展宽等形变,降低了分辨率,因此人体目标图像明显地表现为单散射点的时间-距离像特性。图 6(b) 所示结果表明,加权处理后,近距离处强杂波剩余受到有效抑制,目标信息在图像中得到

明显增强,且幅度分布较为均匀,较远距离处出现一些杂波与噪声,随机分布于图像中,对目标的时间-距离像产生一定的干扰。经图6(c)所示的二次加权处理后,目标信息得到进一步增强,较远距离处的杂波与噪声受到进一步抑制。

选取目标处于雷达近端时某帧(对应1 s)数据和目标处于雷达远端时某帧(对应10 s)数据进行分析,各种方法处理后数据的PSCNR见表2。由表中结果可以看出,ABS处理后,不同距离处数据的PSCNR差异明显,目标处于雷达近端时数据的PSCNR要高于目标处于雷达远端时数据的PSCNR,体现了实测数据中目标信号较宽的动态范围,另外,数据的PSCNR数值偏小,不利于后续处理。经过两次加权处理后,数据的PSCNR均有较大幅度的提高,

目标处于雷达近、远端时数据的PSCNR分别改善了17.58 dB和23.26 dB,因此加权处理明显改善了实测数据中目标在时间-距离像的信杂噪比,尤其是有效抑制了近距离处耦合干扰的不利影响,为目标检测与特征提取提供了有力保证。

表2 各种算法处理后数据的PSCNR(实测数据处理结果)
Tab.2 PSCNRs of data with different processing algorithms (experimental)

处理方法	自适应背景相消	1次加权(算法2)	2次加权(算法2)
目标处于雷达近端时数据的PSCNR/dB	14.88	23.36	32.46
目标处于雷达远端时数据的PSCNR/dB	4.54	21.76	27.80

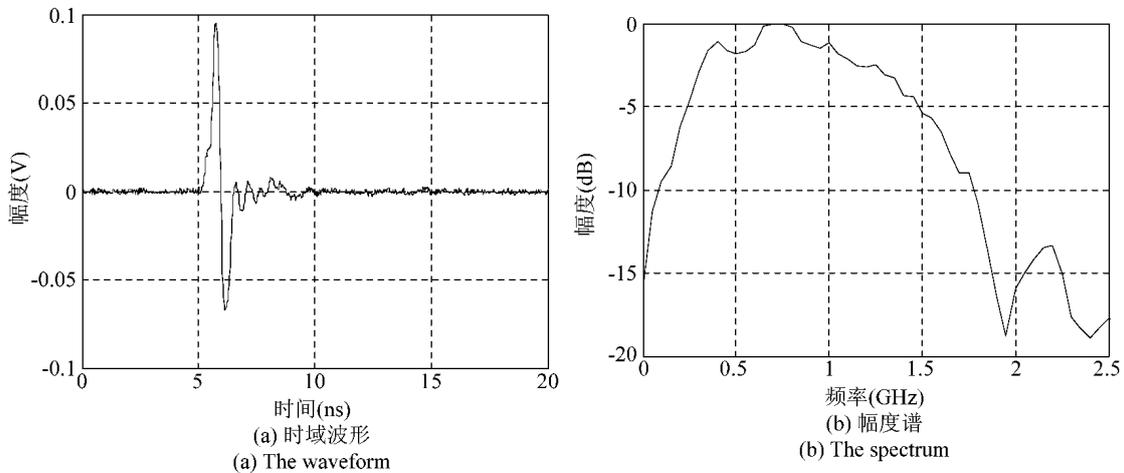


图5 冲激脉冲时域波形及其频谱

Fig.5 The waveform and spectrum of impulse

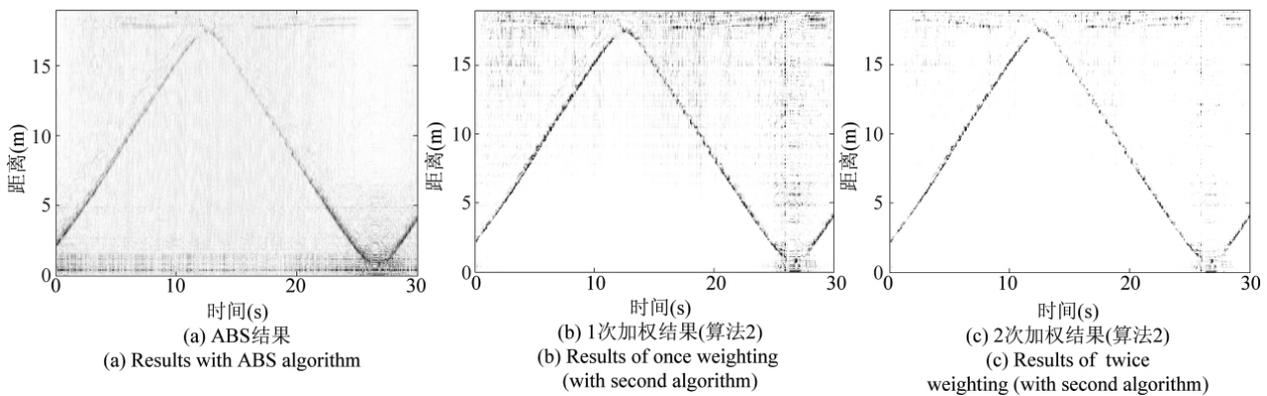


图6 运动目标的时间-距离像(实测数据)

Fig.6 Time-range profiles of the moving target (experimental)

5 结束语

在近距离雷达目标探测中,强杂波、噪声以及干扰信号降低了目标的信杂噪比,限制了目标检测及特征提取性能。本文分析了现有信号增强方法的不足,提出了利用慢时间域和快时间域二维信息进行幅度加权的信号增强方法,可有效消除沿慢时间域幅度稳定分布的强杂波剩余、沿快时间域幅度稳定分布的随机干扰和沿快、慢时间域幅度随机分布的噪声的影响。仿真实验验证了方法的有效性,将所提出的方法应用于穿墙雷达人体目标探测数据中,有效抑制了近距离处耦合干扰剩余的不利影响,增强了目标信号幅度,经过二次加权处理,即可获得具有较高信杂噪比的图像,为后续目标检测处理提供了良好基础。

值得指出,利用时域二维数据幅度加权方法要求回波信号在慢时间域和快时间域的信杂噪比之积大于1,亦即回波信号在两个维度上的信杂噪比之和大于0dB,因此该方法适合于进行初步积累和杂波抑制处理后再对信号进行处理。若目标信号非常微弱(如距离较远处的雷达回波),在任何维度上信杂噪比均不占据优势,则该方法将无法有效增强信号。如何增强微弱信号、提高雷达探测距离,是雷达信号处理的重要课题之一,需要深入研究和探索。

参考文献

- [1] Farwell M, Ross J, Luttrell R, et al. Sense through the wall system development and design considerations [J]. *Journal of the Franklin Institute*. 2008, 345(6): 570-591.
- [2] Skolnik M I. Introduction to RADAR Systems [M]. Third Edition. Singapore: McGraw-Hill Higher Education, 2001: 45-49, 112-125, 291-295.
- [3] 罗迎,张群,封同安,等. 强杂波下含旋转部件的目标成像及微多普勒提取[J]. *系统工程与电子技术*. 2009, 31(2): 261-264.
Luo Y, Zhang Q, Feng T A, et al. Imaging and micro-Doppler extraction of targets with rotating parts in strong ground clutter [J]. *Systems Engineering and Electronics*. 2009, 31(2): 261-264. (in Chinese)
- [4] Nag S, Barnes M. A moving target detection filter for an ultra-wideband radar [C]. *Proceedings of the 2003 IEEE Radar Conference*, 2003: 147-153.
- [5] Chen V C. Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions [J]. *IET Signal Processing*. 2008, 2(3): 291-300.
- [6] Piccardi M. Background subtraction techniques: a review [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2004: 3099-3104.
- [7] 李禹,粟毅,黄春琳,等. 冲激雷达接收中的随机射频干扰抑制方法[J]. *电子与信息学报*. 2004, 26(5): 733-738.
Li Y, Su Y, Huang C L, et al. Random RFI Suppression in Impulse Radar [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*. 2004, 26(5): 733-738. (in Chinese)
- [8] 牟妙辉. UWB 穿墙生命探测雷达波形设计和干扰抑制方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
Mou M H. Study on the waveform design and interference suppression for the UWB through-the-wall life-detecting radar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [9] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 229-281.
Huang P K, Yin H C, Xu X J. Radar Target Characteristic [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 229-281. (in Chinese)
- [10] 贺峰. 宽带/超宽带雷达运动人体目标检测与特征提取技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
He F. Researches on key techniques of wide band/ultra-wide band radar detection and signature extraction of locomotor human targets [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [11] 贺峰,朱国富,黄晓涛,等. 基于SFCW雷达时间-距离像的摆动目标微动特征提取[J]. *信号处理*. 2011, 27(2): 161-167.
He F, Zhu G F, Huang X T, et al. Micro-Motion Signature Extraction of Vibrating Targets based on Stepped Frequency Continuous Wave Radar Time-Range Profiles [J]. *Signal Processing*. 2011, 27(2): 161-167. (in Chinese)
- [12] 刘颀武. 穿墙雷达信息处理及实现技术[D]. 长沙:

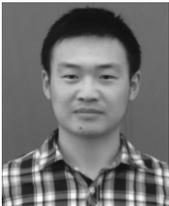
国防科学技术大学, 2011.

Liu J W. Through-the-wall radar signal processing techniques and its implementation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

作者简介



贺峰 男, 1981年生, 吉林蛟河人, 毕业于国防科学技术大学, 获工学博士学位, 现为空军装备研究院雷达与电子对抗研究所工程师, 主要从事雷达信号处理、雷达指挥控制自动化等领域的研究与论证工作。E-mail: hfcn2008@126.com



刘颢武 男, 1987年生, 湖南攸县人, 毕业于国防科学技术大学, 获工学硕士学位, 现为中国人民解放军第66011部队助理工程师, 主要研究方向为雷达信号处理。E-mail: lieu.jayvee@gmail.com



朱国富 男, 1972年生, 河南开封人, 博士, 硕士生导师, 国防科学技术大学电子科学与工程学院副教授, 主要从事SAR信号处理、GMTI信号处理等领域的研究工作。E-mail: zhuguofu@sina.com



周智敏 男, 1957年生, 河北易县人, 博士, 博士生导师, 国防科学技术大学电子科学与工程学院教授, 中国电子学会高级会员, IEEE会员, 主要从事现代雷达系统设计、实时信号处理等领域的研究工作, 获国家科技进步二等奖1项, 军队科技进步奖多项。