

微动目标合成距离像数学分析

陈行勇,刘永祥,姜卫东,郭桂蓉

(国防科技大学空间电子信息技术研究所,湖南长沙 410073)

摘 要: 首先给出了微动目标合成宽带信号回波的一般模型,利用矩阵理论和离散傅里叶变换理论分析了微动目标合成距离像的一般数学原理和多普勒效应,证明了传统的最大二次相位误差准则不能精确地表征运动对距离像的影响,提出了新的距离像畸变度量指标,并给出了关于新准则的几个有用的结论,对步进频率信号进行了具体分析,最后给出了仿真计算,证明了理论分析的结论。

关键词: 微动; 合成距离像; 步进频率信号; 多普勒效应; 离散傅里叶变换; 范数

中图分类号: TN9571.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 03-0585-05

Mathematics of Synthesizing Range Profile of Target with Micro-Motion

CHEN Hang-yong, LIU Yong-xiang, JIANG Wei-dong, GUO Gui-rong

(Institute of Space Electronics Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: General model is derived for the echo signal of a target with micro-motion when radar transmits synthetic wide-band signal. With matrix theory and DFT theory, the mathematic principle and Doppler effect are investigated for synthesizing range profile of a target with micro-motion, which demonstrates that the traditional maximum quadratic phase error criterion does not exactly represent the effect of motion on synthetic range profile. Therefore, a new criterion is proposed for measuring distortion of synthetic range profile. Several interesting conclusions about the criterion are derived. Stepped-frequency waveform is discussed and its simulation is presented, which confirms our analytic conclusions.

Key words: micro-motion; synthetic range profile; stepped-frequency signal; Doppler effect; discrete Fourier transform; norm

1 引言

常用的获取高分辨距离像的宽带脉冲串信号有步进频率信号、线形调频信号和调频步进信号等,前两种信号合成距离像原理已有许多文献进行了研究^[1~3]。在文献[4]中, H. Schimpf 等基于 MEMPHIS 毫米波雷达研究了调频步进雷达合成带宽提高分辨力的原理; Nadav Levanon^[5]研究了改进的调频步进波形抵消自相关函数旁瓣的技术,文献[6]研究了调频步进雷达合成扩展目标一维距离像原理,并分析了运动对距离像的影响。MIT 林肯实验室的 Daniel J. Rabideau 研究了非线性合成宽带波形^[7],指出新的波形具有更低的旁瓣,更高的增益和距离分辨力。

美国海军研究实验室的 Vctor C. Chen 将目标或目标部件除质心平动以外的振动、转动和加速运动等微小运动统称为微动^[8~10]。微动在自然界普遍存在,如人体的体动,行人手和腿的摆动,桥梁的振动,天线、电动机、

履带车履带和直升机旋翼的转动,弹道导弹弹头的颤动(振动、自旋和进动)。微动目标的雷达特征信号包含了目标独特的几何结构和运动特征,为雷达目标特征抽取和目标识别提供了新的途径。对于获取运动目标的高分辨距离像,运动产生的多普勒效应处理是关键,尤其是当目标具有非匀速运动和非刚体运动时,多普勒效应更加复杂。对于高分辨雷达目标,微动意味着目标各散射中心具有不同运动规律,存在复杂的时间、频率和距离耦合,必须建立一般的运动模型进行分析。

各种合成宽带高分辨雷达信号形式的信号处理和合成距离像原理应有共同的数学本质,因此建立合成距离像一般的数学模型非常重要,目前未见文献论述各种合成宽带高分辨雷达信号合成距离像的数学分析和一般原理。对于目标运动引起的合成距离像畸变,传统的度量指标是综合脉冲最大二次相位偏移,作者认为此指标没有考虑目标径向散射点分布以及畸变对参数的周期性,未能精确地描述多普勒效应对合成距离像的影响。

针对合成距离像的信号模型、运动模型和畸变度量三大问题,本文首先给出了任意合成宽带信号对任意运动规律扩展目标的回波模型,利用矩阵分析和 DFT 理论分析了合成距离像的一般数学原理和多普勒效应,推导了合成距离像能量与目标散射点序列能量的关系,分析了传统的运动目标距离像畸变度量指标的缺陷,利用相对误差的概念,给出了新的度量指标,给出该指标的上下限,同时指出消除或降低多普勒效应引起的合成距离像畸变的一般途径,并针对最常用的步进频率信号进行了分析。

2 合成距离像的数学分析

目标的高分辨距离像是目标散射中心在雷达径向的投影,采用合成带宽信号获取高分辨距离像,其数学本质是将一维距离像视为一向量,若目标静止,求解线性方程组,若目标运动,求解非线性方程组,其信号处理本质是将一维距离像视为有限长点列,若目标静止,对其离散时间傅立叶变换在频域均匀采样,若目标运动,对其离散时间傅立叶变换在频域非均匀采样,利用 IDFT 计算冲激响应。

2.1 回波数学模型

设雷达发射的脉冲串信号的时域表达式为:

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect} \left[\frac{t - iT_r - \frac{T}{2}}{\frac{T}{2}} \right] e^{j2\pi [(f_0 + i f) t + f_i (t - iT_r)]} \quad (1)$$

其中 N 为子脉冲个数, T_r 为脉冲重复周期, $i \cdot f$ 为第 i 个脉冲的载频增量, f_0 为发射载频的基频分量, τ 为子脉冲宽度, $2 f_i(t)$ 为第 i 个子脉冲相位调制函数(图 1)。 $f_i(t) = 0$ 对应步进频率信号; $f_i(t) = (f/2) \cdot t$ 对应线性调频信号; $f_i(t) = (f/2) \cdot t^2$ 对应调频步进信号。

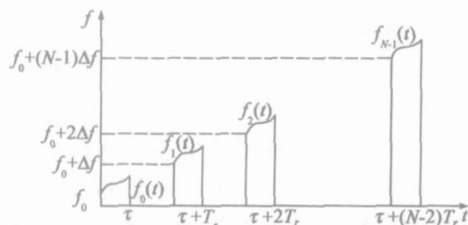


图 1 合成宽带信号的相位和频率调制

目标径向冲击响应分布即目标距离像点列记为 $h(n)$ ($n=0,1,2, \dots, N-1$), 相参合成距离像的原理就是由 $h(n)$ 的离散时间傅立叶变换恢复 $h(n)$ 。

设目标第 $n+1$ 个散射中心在径向相对雷达的运动规律为 $r_n(t)$, $r_n(t)$ 为第 $n+1$ 个散射中心 t 时刻相对于 $t=0$ 时刻的径向位移, 目标靠近雷达时 $r_n(t)$ 为正。 $t=0$ 时刻, 目标第 $n+1$ 个散射中心距雷达的距离为 $R_n = R_0 + n r$, i_n ($n=0,1, \dots, N-1, i=0,1, \dots, N$

- 1) 是第 $i+1$ 个脉冲雷达波照射第 n 个强散射中心的回波相对于照射到第 1 个强散射中心的延迟, 将第 i 个脉冲回波信号与相参本振信号 $e^{j2\pi (f_0 + i f) t}$ 混频输出为

$$u(t) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left[\frac{t - \frac{2(R_n - r_n(t))}{c} - iT_r - \frac{T}{2}}{\frac{T}{2}} \right] \cdot h(n) e^{j2\pi f_i \left(t - \frac{2(R_n - r_n(t))}{c} - iT_r \right)} e^{-j2\pi (f_0 + i f) \frac{2(R_n - r_n(t))}{c}}, & i T_r + \tau_0 - t \leq i T_r + \tau_i(N-1) + \tau \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 合成距离像原理

将式(2)的幅度因子归一化, 并在 $i T_r + \tau_{si}$ 时刻采样得

$$U[i] = u(i T_r + \tau_{si}) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{j2\pi f_i \left(\tau_{si} - \frac{2(R_n - r_n(i T_r + \tau_{si}))}{c} \right)} e^{-j2\pi (f_0 + i f) \frac{2(R_n - r_n(i T_r + \tau_{si}))}{c}} \quad (3)$$

设波形参数满足临界紧约束条件, 即 $f = 1$, 将 $R_n = R_0 + n r$ 和 $r = c/2N f$ 代入上式得

$$U[i] = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j2\pi (in/N) + j\phi(i, n)} \quad (4)$$

其中

$$\phi(i, n) = 2 f_i \left[\tau_{si} - \frac{2(R_n - r_n(i T_r + \tau_{si}))}{c} \right] - 2\pi (f_0 + i f) \frac{2[R_0 - r_n(i T_r + \tau_{si})]}{c} - 2\pi f_0 \frac{2n r}{c} \quad (5)$$

$\phi(i, n)$ 为剩余相位因子, 令 $x = (h(0) \ h(1) \ \dots \ h(N-1))^T$, $a_{in} = e^{-j2\pi (in/N) + j\phi(i, n)}$ ($i=0,1, \dots, N-1; n=0,1, \dots, N-1$), $A = (a_{in})_{N \times N}$, $u = (U[0], U[1], \dots, U[N-1])^T$, 合成距离像为: $y = (h_1(0) \ h_1(1) \ \dots \ h_1(N-1))^T$, 则有

$$y = W^{-1} u = W^{-1} A x \quad (6)$$

其中

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & e^{(-j2\pi)/N} & \dots & e^{(-j2\pi)(N-1)/N} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 1 & e^{(-j2\pi)(N-1)/N} & \dots & e^{(-j2\pi)(N-1)^2/N} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\phi(i, n)$ 由调频函数、运动规律和采样时间决定, 其作用相单于对距离像点列的离散时间傅立叶变换在频域非均匀采样。对最简单的频率步进信号, 若目标静止, 则

$$\phi(i, n) = -2\pi (f_0 + i f) \frac{2R_0}{c} - 2\pi f_0 \frac{2n r}{c} \quad (8)$$

由于 $\phi(i, n)$ 为 i 的一次多项式, 由离散傅立叶变换理论可知合成距离像为真实距离像的循环移位^[11], 即

$$U[i] = W_N^{i0} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-\frac{j4\pi f_0 (R_0 + n r)}{c}} W_N^{in} = W_N^{i0} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} h_a(n)$$

$$\cdot W_N^{jn} \\ = W_N^{jp} \cdot H_a[i] = \text{DFT}[h_a[((n-p))_N]] \quad (9)$$

其中 $h_a(n) = h(n) e^{-j4 \frac{f_0(R_0+n \cdot r)}{c}}$, $W_N = e^{-j2\pi/N}$, $p = \lfloor N \cdot (2R_0 f/c - \lfloor 2R_0 f/c \rfloor) \rfloor$, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整运算, $h_a[((n-p))_N]$ 表示对 $h_a(n)$ 循环右移位 p 点, 对回波脉冲的采样点列 $U[i]$ 求 IDFT 后取模可得

$$|h[((n-p))_N]| = |h_a[((n-p))_N]| = |\text{IDFT}[U[i]]| \quad (10)$$

上式表明: 对一个扫频周期 N 个脉冲采样后求 IDFT 并取模可得目标冲击响应的幅值, 将其循环左移位 p 点即得真实距离像. 对于其它合成宽带信号, 当目标运动时 $\phi(i, n)$ 含有 i 和 n 的高次多项式以及 i 和 n 的交叉项, 此时 $\phi(i, n)$ 使得合成距离像产生畸变.

3 合成距离像畸变度量

3.1 合成距离像的畸变

合成距离像的畸变包括移位和变形, $\phi(i, n)$ 中不包含 i 的多项式对合成距离像幅度无影响; i 的一次多项式只使距离像移位, 若能恰当地选择波形参数和采样时刻, 使循环移位单元恰为 N 的整数倍, 则其对于距离像无影响. i 的高于一次多项式相位因子以及 i 和 n 的交叉相位因子的影响包括移位和变形. 由方阵范数和向量范数的相容性^[12]有

$$\|y\|_2 = \|W^{-1}A \cdot F \cdot x\|_2 = \frac{1}{\sqrt{N}} \|QA \cdot F \cdot x\|_2 \\ = \frac{1}{\sqrt{N}} \|A \cdot F \cdot x\|_2 = \sqrt{N} \|x\|_2 \quad (11)$$

其中酉矩阵 $Q = \sqrt{N}W^{-1}$, $\|\cdot\|_2$ 为向量的 2-范数, $\|\cdot\|_F$ 为矩阵的 F-范数 (Frobenius-norm)^[12]. 上式的第一个等式利用了方阵乘酉矩阵的 F-范数不变性, 式(11)说明, 合成距离像的能量不超过强散射点序列能量的 N 倍.

结论 1 合成距离像序列能量不超过强散射点序列能量的 N 倍.

3.2 畸变的最小二乘度量

对于步进频率信号匀速目标成像, 经典的度量距离像变形准则是综合脉冲最大二次相位偏移不超过 $\pi/2$, 相位补偿的速度临界值为:

$$v \cdot v_{\max} = \frac{c}{8(N-1)^2 f T_r} \quad (12)$$

此指标存在以下缺陷: (1) 没有考虑目标沿径向电磁散射强度分布, 对于径向散射中心分布曲线变化缓慢的运动目标, i 越大, $|U[i]|$ 越小, 二次相位偏移对 IDFT 影响越小, 故该指标偏于保守, 而对于径向散射中心分布曲线变化剧烈的目标, i 越大, $|U[i]|$ 越大, 二次

相位偏移对 IDFT 影响越大, 则该指标显不足; (2) 没有考虑目标沿径向向散射中心速度分布, 且对于散射中心速度一直匀速目标, 理论上目标运动产生的合成距离像畸变关于速度值近似具有周期性, 该指标并未反映这一性质.

定义 1 畸变的相对误差准则—畸变误差

假设根据速度估值, 通过恰当地选择波形参数和采样时刻, 一次相位项已经可以不考虑, 定义一种新的度量合成距离像畸变指标

$$= \left[\frac{\|y-x\|_2}{\|x\|_2} \right]^2 = \frac{x^H B^H B x}{x^H x} = \frac{x^H C x}{x^H x} \quad (13)$$

称为畸变误差, $B = I - W^{-1}A$, 厄米特矩阵 $C = B^H B$ 称为误差矩阵. 若距离像响应 x 为 C 的特征向量, 则为 C 的瑞利商^[13]. 设 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ 为 C 的特征值, $\lambda_{\max} = \max\{\lambda_i\}$, $\lambda_{\min} = \min\{\lambda_i\}$, 由 Rayleigh Ritz 定理^[13]

$$\lambda_{\min} \leq \frac{x^H C x}{x^H x} \leq \lambda_{\max} = \rho(C) \quad (14)$$

其中 $\rho(C)$ 为矩阵 C 的谱半径. 由此可知: 畸变误差 不超过误差矩阵的谱半径. 当且仅当 x 为 C 的对应 λ_i 的特征向量, $\frac{x^H C x}{x^H x} = \lambda_i$ 成立. 对任意距离像点列 x , 若要

$\frac{x^H C x}{x^H x} \leq \epsilon$, 则必有 $B = I - W^{-1}A = O$, 即 $A = (W^{-1})^{-1} = W$. 因此, 要获得任意目标真实的距离像, 必须将对脉冲串的物理非均匀采样转变为对 $h(n)$ 的离散时间傅立叶变换的名义均匀采样, 其数学本质使 A 逼近傅立叶变换矩阵 W , 从而使 $\frac{x^H C x}{x^H x}$ 趋近于零. 依据 t_{is} 的取值可将降低合成距离像畸变的技术分为两种: (1) 相位补偿技术, 即 T_r 和 t_{is} 取恒定值, 对 u 乘以一个矩阵; (2) 变采样技术, 即通过选择每个子脉冲的 T_r 和 t_{is} 的取值来使 A 趋近 w .

对于相位补偿技术, 设相位补偿矩阵为 S , 若经过相位补偿后距离像畸变完全消除, 则要求 $y = W^{-1}S A x = x$, 即

$$W^{-1}S A = I \quad (15)$$

由上式得:

$$S = W A^{-1} \quad (16)$$

由上式可知, 当雷达距离分辨率一定时, 目标径向尺寸越大, 所占分辨单元越多, 相位补偿矩阵维数越大, 相位补偿方法计算量越大. 由此可知, 相位补偿技术主要适应于小目标.

进一步分析可得畸变误差更精确的界限, 由方阵范数和向量范数的相容性^[12]得

$$\|y-x\|_2 = \frac{1}{\sqrt{N}} \|Q(W-A)\|_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{N}} \|Q(W-A)\|_F \|x\|_2 \\ = \frac{1}{\sqrt{N}} \|(W-A)\|_F \|x\|_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{N}} (\|W\|_F \\ + \|A\|_F) \|x\|_2 = 2 \sqrt{N} \|x\|_2 \quad (17)$$

上式的第二个等式同样利用了方阵乘酉矩阵的 F-范数

不变性,由上式显然可得: $4N$.

结论 2 畸变误差满足: $4N$.

3.3 步进频率信号合成距离像畸变分析

一般情况下,成像时间较短,各散射点运动规律可近似为匀速运动,可假设 $r(t) = vt$. 发射信号为步进频率信号,均匀采样,令 $\phi(i, n) = -2(\frac{(0)}{i} + \frac{(1)}{i} \cdot i + \frac{(2)}{i} \cdot i^2)$, $\frac{(0)}{i}$ 、 $\frac{(1)}{i}$ 和 $\frac{(2)}{i}$ 分别称为常数项、一次相位因子和二次相位因子,则

$$\frac{(0)}{i} = \frac{2f_0(R_0 - vt_s + n - r)}{c} \quad (18)$$

$$\frac{(1)}{i} = \frac{2(-fR_0 - f_0vT_r - fvt_s)}{c} \quad (19)$$

$$\frac{(2)}{i} = \frac{-2v \cdot fT_r}{c} \quad (20)$$

常数项 $\frac{(0)}{i}$ 不包含频域因子 i ,相当于对 $h(n)$ 的相位加权,对 $h(n)$ 的位置和幅度无影响,对采样点列 $U[i]$ 求 IDFT 后取模可消除其对一维距离像的影响. 一次相位因子 $\frac{(1)}{i}$ 的作用相当于频域移位采样,使回波脉冲采样求 IDFT 后得到的 $h(n)$ 循环移位,对一维距离像形状无影响. 令 $\frac{(1)}{i} = kN(k - Z)$, 可得

$$t_s = \frac{2fR_0 - 2f_0T_r - kNc}{2fv}, \quad t_s \in [0,] \quad (21)$$

上式表明,恰当地选择采样时刻可使移位为 N 的整数倍,消除一次相位因子影响. 选取 $f_0 = Mc/r, M \ll N$, 则 $h(n) \exp(-j2 \frac{(0)}{i}) = h(n) \exp[-j4 f_0(R_0 - vt_s)/c]$ ($n=0, 1, \dots, N-1$), 因此对采样点列 $U[i]$ 乘以相位因子 $\exp[j4 f_0(R_0 - vt_s)/c]$ 可消除常数项影响,令

$$P = \text{diag}(1, e^{-j2 \frac{(2)}{i}}, \dots, e^{-j2 \frac{(2)}{N-1}(N-1)^2})$$

则

$$A = PW \quad (22)$$

$$B = I - W^{-1}PW = W^{-1}(I - P)W = W^{-1}P_1W \quad (23)$$

$$C = \frac{1}{N}W^{-1}P_1^H P_1W \quad (24)$$

其中 $P_1 = I - P$, B 与 P_1 相似,其特征值为 $1 - e^{-j2 \frac{(2)}{i}}$ ($i=0, 1, \dots, N-1$), 故厄米特矩阵 C 的特征值为

$$i = \frac{1}{N} |1 - e^{-j2 \frac{(2)}{i}}|^2 = \frac{4}{N} \sin^2 \left[\frac{2v \cdot fT_r}{c} i \right] \quad (25)$$

由上式显然可得 $0 \leq i \leq 4/N$, 当 $N \rightarrow \infty$ 时, $i \rightarrow 0$, 这表明雷达分辨率无限高时,合成距离像无畸变.

结论 3 步进频率信号合成距离像的畸变误差满足: $0 \leq i \leq 4/N$.

由式 (25), 若要求 $\max i = 2/N$, 且 $2v \cdot fT_r \cdot (N-1)^2/c^2 \leq 2$, 则可得: $v \leq c/[8(N-1)^2 fT_r]$. 即综合脉冲最大二次相位偏差准则可由相对误差准则导出.

实际回波包含杂波,同时考虑目标速度微小变化和采样损失, C 的谱半径可由幂乘法 (Power Method) [13] 估计,若通过

估计目标速度计算得到 C 的估值 \hat{C} , 则估计 C 的谱半径 $\hat{\lambda}_{\max}$ 的幂乘法为

(1) $k=0$, 给 $x_k = x_0$ 赋初值,并设定门限 a ;

(2) $y_{k+1} = \hat{C}x_k, x_{k+1} = y_{k+1}^H / y_{k+1}$;

(3) $x_{k+1} = y_{k+1} / \|y_{k+1}\|$;

(4) 若 $|x_{k+1} - x_k| / \|x_{k+1}\| \leq a$, 则 $\hat{\lambda}_{\max} = y_{k+1}^H y_{k+1}$, 否则, $k = k+1$, 返回 (2).

选择畸变误差门限 th , 若 $\hat{\lambda}_{\max} < th$, 则多普勒效应引起的合成距离像的畸变可以忍受, 否则, 若 P 的估值为 \hat{P} , 则补偿后的合成距离像为 $y = |W^{-1} P_{\text{com}} u|$, $P_{\text{com}} = \hat{P}^{-1}$ 为相位补偿对角阵.

4 仿真计算和结果分析

4.1 系统模拟

设匀速运动刚体目标模型为: 目标 A 由顺序相距 $7r, 2r$ 和 $14r$ 的四个强散射点构成, 散射强度沿径向剧烈变化, 归一化散射强度之比为 $1:10:5:8$, 目标 B 由顺序相距 r 的 N 个等散射强度的散射点构成, 且散射强度归一化, 它代表散射强度沿径向缓慢变化. $t=0$ 时刻两个目标的第一个强散射点距离雷达的径向距离 R_0 为 2km . 雷达发射的步进频率信号参数和信号处理参数为: 发射频率 $f_0 = 10\text{GHz}$, $\tau = 125\text{ns}$, $f = 8\text{MHz}$, $N = 32$, $T_r = 1.5\mu\text{s}$, $r = c/(2N \cdot f) = 0.59\text{m}$, t_s 满足式 (21).

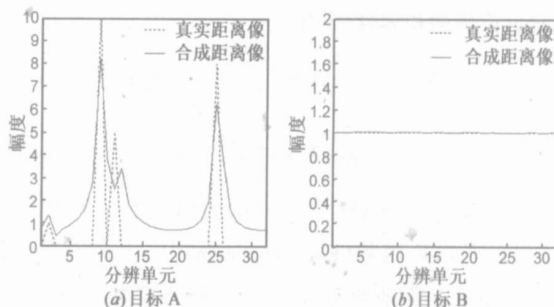


图 2 不同强散射点分布的距离像畸变对比 ($v=50\text{m/s}$)

4.2 仿真结果及分析

不考虑杂波影响和采样幅度损失, 图 2 示出了运动速度相同, 目标 A 和目标 B 的合成距离像. 显然可见, 运动速度相同, 目标 A 的合成距离像失真严重, 而目标 B 几乎没有失真, 这证明了综合脉冲最大二次相位偏

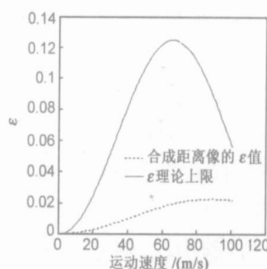


图 3 目标 A 合成距离像畸变误差

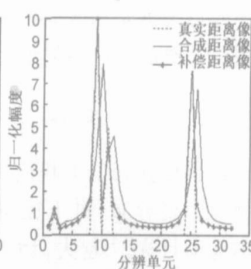


图 4 合成距离像的运动补偿 ($v=100\text{m/s}$)

移度量合成距离像畸变存在缺陷.图 3 示出了目标 A 的合成距离像畸变误差与运动速度的关系,证明了合成距离像畸变上限的理论分析和畸变对速度等参数近似具有周期性.使用本文方法运动补偿降低畸变,图 4 示出了相位补偿后的目标 A 的合成距离像,其速度为 100m/s,速度估值为 80m/s.

5 结束语

本文研究了合成宽带信号获取微动目标距离像原理及其多普勒效应的一般问题,在以后的研究中重点研究从数字信号处理角度对整个成像过程的建模分析,另一个重要的研究方向是设计自适应的高分辨雷达的复合波形参数和采样率,以降低变速运动目标合成距离像多普勒效应.

参考文献:

- [1] Wehner D R. High Resolution Radar [M]. Boston, MA: Atech House, 1995. 197 - 238.
- [2] Mun K L. Stepped Frequency Imaging Radar Simulation [R]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, March 2000. AD-A379137.
- [3] Abraham P. High Radar Range Resolution with the Step Frequency Waveform [R]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, June 1994. AD-A284611.
- [4] Schimpf H, Wahlen A. High range resolution by means of synthetic bandwidth generated by frequency-stepped chirps [J]. IEE Electronics Letters, 2003, 39(18): 1346 - 1348.
- [5] Levanon N, Mozeson E. Nullifying ACF grating lobes in stepped-frequency train of LFM pulses [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(2): 694 - 703.
- [6] 陈行勇,魏玺章,等.调频步进雷达扩展目标高分辨距离像分析.电子学报,2005,33(9):1599 - 1602.
Chen H Y, Wei X Z, et al. Analysis of achieving high resolution profile of extended target for stepped chirp radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1599 - 1602. (in Chinese)
- [7] Rabideau D J. Nonlinear synthetic wideband waveforms [A]. Proceedings of International Conference on Radar [C]. Edinburgh, UK: IEEE Press, October 2002. 21 - 219.
- [8] Chen V C, Li F Y, Ho S S. Micro-Doppler effect in radar phenomenon, model and simulation study [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 1 - 21.
- [9] Chen V C. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics: A review [A]. Proceedings of SPIE on Independent Component Analyses, Wavelets, and Neural Networks [C]. Orlando, USA: SPIE, Apr 2003, 5102: 240 - 249.
- [10] Chen V C, Li F. Analysis of micro-Doppler signatures [J]. IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(4): 271 - 276.
- [11] Oppenheim A V, Schaffer R W. Discrete-Time Signal Processing [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc, 2000. 426 - 479.
- [12] Meyer C D. Matrix Analysis and Applied Linear Algebra [M]. Philadelphia, PA: SIAM, 2000. 279 - 293.
- [13] 张贤达. 信号处理中的线性代数 [M]. 北京: 科学出版社, 1997. 43 - 47.

作者简介:



陈行勇 男,1978年10月出生于江西萍乡,现为国防科技大学电子科学与工程学院博士生,已在《IEEE Transactions on Signal Processing》、《IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters》、《电子学报》和《自然科学进展》等国内外杂志发表和录用论文15篇,研究方向:雷达成像、雷达特征提取和自动目标识别.

E-mail: nudt_atr_chy@163.com



刘永祥 男,1976年10月出生于河北省唐山,现为国防科技大学空间电子技术研究所副教授,在《自然科学进展》、《电子与信息学报》以及国际学术会议上发表论文15篇,其中SCI检索2篇,EI检索2篇.曾获国际大学生数学建模竞赛一等奖和全国大学生数学建模竞赛一等奖.2003年获军队科技进步一等奖一项,目前一项科研成果正在申报国家科技进步二等奖,2004年获国家科技进步二等奖.研究方向:信息融合、雷达特征提取和自动目标识别. E-mail: lyx_bible@sina.com.cn