

# 基于频率步进雷达时间-距离像的宽带微动特征提取

吴晓芳, 刘 阳, 王雪松, 卢焕章

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 在详细分析频率步进雷达旋转微动点目标回波特征和一维距离像特点后, 利用不同帧之间构成的慢时间-一维距离像组的相关性, 合成得到时间-距离像。对比分析了旋转微动目标的径向距离和距离像位置的变化规律, 进而提出了一种基于频率步进雷达时间-距离像的宽带旋转微动特征提取的新方法, 给出了旋转中心、旋转半径以及角速度等微动参数的理论表达式, 推导得出算法的理论精度。设计并成功开展了地基毫米波频率步进雷达对称旋转目标的外场试验, 验证了方法的有效性和精确性。该特征提取思想可扩展应用于振动、滚动等其他形式的微动特征提取, 推广应用于线性调频信号的高分辨体制雷达系统。

**关键词:** 频率步进雷达; 时间-距离像; 转动; 相关性; 特征提取; 误差分析

**中图分类号:** TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 07-1416-06

## Feature Extraction of Wide-Band Micro Motions Based on Stepped-Frequency Radar Time-Range Profiles

WU Xiao-fang, LIU Yang, WANG Xue-song and LU Huan-zhang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The echo of stepped-frequency pulse series for the point target with rotation, as well as the micro-motion's influence on one-dimensional range profile, is analyzed in detail. The time-range profile can be synthesized by utilizing slow-time correlations between frames. The varying laws of the range for the rotary point target and the target position in range profiles are contrastively analyzed. Based on this time-range profile, a novel feature extraction method of wideband micro motions is presented, and the theoretical expressions of micro-motion parameters, such as rotation center, rotation radius and angle velocity, are given. The theoretical precision of the micro-motion feature extraction method is deduced. Finally, to verify the results, the outfield experiments of two reflectors with symmetrical rotations are successfully designed and operated for the ground-based millimeter stepped-frequency radar. The idea can be extended to the feature extraction of multiple kinds of motions for stepped-frequency radar, such as vibration and tumbling, and can be adopted in other high resolution radar systems with linear frequency modulation signals.

**Key words:** stepped-frequency radar; time-range profile; rotation; correlation; feature extraction; error analysis

## 1 引言

随着实际战场环境的日益复杂以及各种目标特征控制技术的应用, 目标转动、振动和滚动等微动特性和微动特征提取方法日益受到关注, 逐渐成为研究的热点目标。微动对电磁波具有微多普勒调制、回波强度调制以及成像特征调制等作用, 雷达回波中的微动特征蕴含了目标的几何特征和运动特征, 研究微动特性是实现目标特征提取和分类识别的有效途径<sup>[1]</sup>。当前关于微动的研究主要包括分析目标非平稳运动的微多普勒信息, 提取微动特征, 进行目标的分类识别等。Victor C. Chen 详细阐述了微动点目标的微多普勒数学原理<sup>[2]</sup>, 时频分析

技术<sup>[3]</sup>、独立成分分析技术<sup>[4]</sup>、匹配傅立叶变换技术以及参数搜索技术<sup>[5]</sup>等在微多普勒信号处理领域得到了不同程度的应用。Marple<sup>[6]</sup>等人阐述了微时间、微距离、微频率及微动目标时间、空间及频率三维特征空间的概念, 将微多普勒、高分辨距离像和 SAR/ISAR 像与时间-频率像、时间-距离像以及距离-多普勒像对应, 极大地拓展了微动特性的研究思路。目前国内外对微动目标雷达特征提取的研究主要集中在点目标微多普勒特征提取<sup>[7]</sup>以及距离-多普勒图像<sup>[8,9]</sup>分析上, 基于时间-距离像的微动特性研究及高分辨距离像的微动特征提取方法少有公开报道。

毫米波系统因具有角度、多普勒高分辨等诸多优

收稿日期: 2008-02-18; 修回日期: 2009-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60672033); “十一五”武器装备预先研究项目(No. 513040305)

点,在工程实践中被广泛使用.频率步进脉冲串信号是一种距离高分辨波形,具有大时宽-带宽积.它根据目标特性的取样原理,发射载波频率均匀步进的多个脉冲,对这些脉冲回波进行相参脉冲压缩处理即得到合成的目标高分辨率距离像<sup>[10,11]</sup>.基于毫米波频率步进雷达系统来研究目标宽带微动特性及微动特征提取方法,不失为一个有价值的探索方向.文献[12]进行了毫米波调频步进信号照射下直升机振动特征的仿真实验,文献[13]开展了毫米波 SAR 的微动特性研究,毫米波系统在宽带微动特性的研究领域有着很大的潜力.

综合考虑以上情况,本文以毫米波频率步进脉冲体制雷达为基础,从时间-距离像角度研究旋转运动目标的高分辨距离像特征以及微动参数特征提取方法;利用相邻帧微动目标的高分辨距离像组间的慢时间相关性,合成时间-距离像,进而提出旋转微动目标的旋转中心、旋转半径及角速度等微动参数的提取方法,通过仿真实验和外场试验验证方法的可靠性和精确性.

## 2 微动目标回波模型

设毫米波频率步进雷达发射  $M$  帧、每帧  $N$  个脉冲串信号,脉冲宽度为  $\tau$ ,载频从  $f_0$  以  $f$  均匀步进,脉冲重复周期为  $T$ .理论上,将一帧回波脉冲串经脉压处理可得到高分辨距离像,帧内的时间可称为快时间;利用相邻帧距离像之间的时间相关性可提取目标宏观上的运动参数以及几何参数,帧间的时间可理解为慢时间.将以开始发射脉冲为原点的时间定义为  $t$  (即全时间),以每个发射脉冲的脉冲前沿为原点的时间定义为  $t_{m,n}$ ,则  $t = mNT + nT + t_{m,n}$ ,第  $m$  帧第  $n$  个发射脉冲为

$$s_t(m, n, t) = \text{rect}\left[\frac{t - mNT - nT - \tau/2}{\tau}\right] e^{j(2\pi f_0 t + \phi_{m,n})} \quad (1)$$

其中  $m = 1, 2, \dots, M, n = 0, \dots, N - 1, f_n = f_0 + n f, \phi_{m,n}$  为初始相位.

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & 0 < x < 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

距离为  $R$  的静止目标回波为

$$s_r(m, n, t) = A \cdot \text{rect}\left[\frac{t - mNT - nT - \tau/2 - 2R/c}{\tau}\right] \exp[j2\pi(f_0 + n f)(t - 2R/c) + \phi_{m,n}] \quad (2)$$

其中  $A$  为幅度,方便起见,认为在信号处理过程中其大小保持不变.

图 1 所示点目标沿旋转平面匀速转动,转动半径为定值  $r$ ,雷达到旋转中心所在直线与旋转平面的夹角为  $\theta$ ,雷达到旋转中心的距离为  $R_0, R_0 \gg r$ ,角速度为  $\omega$ ,以  $OA$  方向为起点,  $\phi_0$  为频率步进脉冲雷达探测时的初始相位,则雷达到目标的距离为

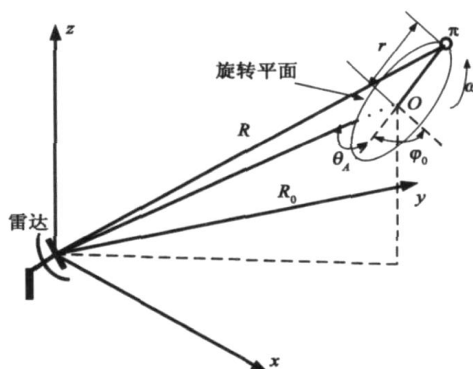


图1 旋转体运动几何关系图

$$R(m, n, t) = \sqrt{R_0^2 + r^2 + 2R_0 r \cos \theta \cos(\phi_0 + \omega t)} \quad (3)$$

因  $R_0 \gg r$ , 故式(3)可近似为

$$R(m, n, t) = R_0 + r \cos \theta \cos(\phi_0 + \omega t) \quad (4)$$

即目标的径向距离以旋转中心为中心,以  $r \cos \theta$  为振幅,以  $2\pi/\omega$  为周期,呈余弦规律变化.

该旋转点目标对应的回波经混频处理后为

$$s(m, n, t) = A \cdot \text{rect}\left[\frac{t - mNT - nT - \tau/2 - 2R(m, n, t)/c}{\tau}\right] \exp[-j4\pi(f_0 + n f)R(m, n, t)/c] \quad (5)$$

## 3 微动特征提取算法

在紧约束 ( $f < 1$ ), 以及一个脉冲宽度  $\tau$  内采样一个点的条件下,如果采样时间取在  $t_s = (mN + n)T + t_0$ , 则采样信号为

$$s(m, n) = A e^{-j4\pi(f_0 + n f)R_0/c} \cos[\phi_0 + (mNT + nT + t_0)/c] = s_1(m, n) \cdot s_2(m, n) \cdot s_3(m, n) \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} s_1(m, n) = A \exp(-4\pi j R_0 f_0 / c) \\ s_2(m, n) = \exp(-4\pi j n f R_0 / c) \\ s_3(m, n) = \exp\{-4\pi j(f_0 + n f) r \cos \theta \cos[\phi_0 + (mNT + nT + t_0)/c]\} \end{cases} \quad (7)$$

$s_1(m, n)$  为常数项,反映目标的强度信息,  $s_2(m, n)$  为旋转中心脉冲压缩的有效项,  $s_3(m, n)$  为旋转微动调制项,反映了目标旋转微动对波形的调制特性.

### 3.1 旋转运动分析

记  $\phi_m = \phi_0 + m\omega T$ ,  $\phi_m$  为与慢时间相关的转角,在单帧脉冲串压缩成像处理过程中保持不变,下面重点分析旋转调制项  $s_3(m, n)$ .

$$s_3(m, n) = \exp\{-4\pi j(f_0 + n f) r \cos \theta [\cos(\phi_0 + \phi_m) \cos(nT) - \sin(\phi_0 + \phi_m) \sin(nT)]/c\} \quad (8)$$

在快时间内,当  $nT$  很小时,可将  $\cos(nT)$ 、 $\sin(nT)$  通过在零点泰勒级数展开进行近似.因  $n$  最大取值为  $N - 1$ ,不妨设定门限  $NT < 10^\circ$ ,取展开后的前

两项得

$$s_3(m, n) = \exp\{-4j(f_0 + n f) r \cos \cdot [\cos(\phi_0 + \phi_m)(1 - (nT)^2/2) - nT \sin(\phi_0 + \phi_m)]/c\} \quad (9)$$

$s_3(m, n)$  的相位为:

$$\phi(m, n) = \phi_1(m, n) + \phi_2(m, n) + \phi_3(m, n) + \phi_4(m, n) \begin{cases} \phi_1(m, n) = -4 f_0 r \cos \cos(\phi_0 + \phi_m)/c \\ \phi_2(m, n) = -4 r \cos n/c \\ \phi_3(m, n) = 4 r \cos n^2/c \\ \phi_4(m, n) = 2 f r \cos \cos(\phi_0 + \phi_m)(T)^2 n^3/c \end{cases} \quad (10)$$

对  $s(m, n)$  在频率步进域  $n$  进行  $N$  点的离散傅立叶变换 (IDFT) 处理得

$$S(k, m) = S^{(1)}(k, m) \odot S^{(2)}(k, m) \odot S^{(3)}(k, m) \quad (11)$$

其中  $k=0, 1, \dots, N-1$ ,  $S(k, m)$  表示目标第  $m$  帧脉冲串对应的一维距离像分布,

$$\begin{cases} S^{(1)}(k, m) = \text{IDFT}\{[s_1(m, n) \exp(j\phi_1(m, n))] \cdot [s_2(m, n) \exp(j\phi_2(m, n))]\} \\ S^{(2)}(k, m) = \text{IDFT}\{\exp[j\phi_3(k, m)]\} \\ S^{(3)}(k, m) = \text{IDFT}\{\exp[j\phi_4(k, m)]\} \end{cases} \quad (12)$$

$S^{(1)}(k, m)$  中,  $[s_1(m, n) \exp(j\phi_1(m, n))]$  与  $n$  无关, 反映幅度信息,  $[s_2(m, n) \exp(j\phi_2(m, n))]$  为旋转调制后脉冲压缩有效项, 可确定目标位置;  $S^{(2)}(k, m)$ 、 $S^{(3)}(k, m)$  为旋转运动引起的高次项, 可使波形发生扩展和变形。

### 3.2 微动特征提取

在快时间内角速度较小的情况下, 高次调制项对目标距离位置的影响很小, 往往可忽略不计, 故直接利用式(11)中的第一项来提取旋转运动参数。

$$S^{(1)}(k, m) = A_m \exp\left[-j(N-1)\left(\frac{2fR(m)}{c} - \frac{k}{N}\right)\right] \cdot \frac{\sin[N(2fR(m)/c - k/N)]}{\sin[2fR(m)/c - k/N]} \quad (13)$$

其中

$$A_m = \frac{A}{N} \exp\left[\frac{-4j f_0 (R_0 + r \cos \cos(\phi_0 + \phi_m))}{c}\right] \\ R(m) = R_0 + r \cos \cdot \sqrt{(f_0 T/f)^2 + 1} \cos(\phi_0 + \phi_m), \\ = \tan(f_0 T/f)$$

因  $|S^{(1)}(k, m)|$  在  $\frac{2fR(m)}{c} - \frac{k}{N} = l_m$  时取得峰值, 则  $|S(k, m)|$  也在  $\frac{2fR(m)}{c} - \frac{k}{N} = l_m$  时取得峰值, 其中  $l_m$

为整数, 由此可得目标的位置  $R(m)$  为

$$R(m) = R_0 + r \cos \sqrt{(f_0 T/f)^2 + 1} \cos(\phi_m + \phi_0 + \phi) = l_m L + L(m) \quad (14)$$

其中  $L = c/(2f)$  为不模糊距离,  $L(m) = k_r$  为距离像中的相对距离,  $r = c/(2Nf)$  为距离像分辨率,  $l_m$  是产生距离像模糊的主要原因, 可根据限定关系式(15)确定模糊值  $l_m$  进行解模糊, 以求取目标真实距离, 这里不再赘述。

$$t_s c/2 < R(m) < \left(t_s + \right) c/2 \quad (15)$$

由式(14)可清晰地看到, 随着慢时间的推移, 旋转运动目标在距离像中的位置以旋转中心  $R_0$  为中心, 以  $r \cos \sqrt{(f_0 T/f)^2 + 1}$  为振幅呈余弦规律变化; 当转角变化  $\phi_m = NT$   $m=2$  时, 所经过的慢时间即为距离像峰值位置变化的周期, 其中  $m$  为  $\phi_m = 2$  时对应的慢时刻数目, 或称跨过的帧数。和第2节关于目标空间径向距离变化规律的讨论进行对比, 可发现目标实际径向距离和距离像中目标位置均随旋转微动呈余弦规律变化; 中心均为实际旋转中心  $R_0$ ; 变化周期相同; 而振幅出现差异, 后者较前者多了  $\sqrt{(f_0 T/f)^2 + 1}$  因子的调制。随角速度的不同, 距离像中目标位置呈非线性变化, 当角速度为零时两者振幅相同; 随着角速度的增大, 后者的振幅逐渐变大。故有结论: 距离像目标位置余弦变化的中心即为目标旋转中心, 变化周期即为目标旋转周期, 变化的幅度和实际目标旋转半径满足一定的关系。据此可提取旋转微动特征参数如下:

$$= \frac{2}{mNT} \quad (16)$$

设第  $m_1$  帧距离像中, 目标位于最大距离处, 即  $\cos(\phi_{m_1} + \phi_0 + \phi) = 1$ ; 设第  $m_2$  帧距离像中, 目标位于最小距离处, 即  $\cos(\phi_{m_2} + \phi_0 + \phi) = -1$ , 可得旋转中心和旋转半径为

$$R_0 = \frac{R(m_1) + R(m_2)}{2} \quad (17)$$

$$r = \frac{R(m_1) - R(m_2)}{2 \cos \sqrt{(f_0 T/f)^2 + 1}} \quad (18)$$

由式(18)可看出要估计旋转半径, 首先需要通过其他测角途径来获取夹角, 另外还需先估计出角速度, 再和合成图像中得到的  $R(m_1)$ 、 $R(m_2)$  一起, 来估计实际的旋转半径。

### 4 算法的理论精度

首先分析一下用泰勒级数展开做近似带来的误差, 因  $nT < 10^\circ$ , 故三角函数近似误差为

$$\begin{aligned} |\cos(nT)| &< (NT)^4/4! < 4 \times 10^{-5} \\ |\sin(nT)| &< (NT)^3/3! < 9 \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (19)$$

两者均小于 1‰ 故近似误差可忽略不计。

再分析该微动特征提取算法的理论误差。算法误差产生的主要原因在于进行离散傅立叶变换时  $k$  需取整,由式(14)可推出距离  $R(m)$  的理论误差为

$$[R(m)] = (k) \cdot r \quad (20)$$

由式(16)~(18)可推出角速度、旋转中心、旋转半径的理论误差分别为

$$(\omega) = \frac{2}{(m)NT} < \left| \frac{2}{m(m-1)NT} \right| \quad (21)$$

$$(R_0) = \frac{[R(m_1)] + [R(m_2)]}{2} \cdot r \quad (22)$$

$$(r) = \frac{[R(m_1)] - [R(m_2)]}{2\cos \sqrt{(f_0 - T/f)^2 + 1}} \quad (23)$$

当转角变化  $2\pi$  时,距离像跨过的帧数越多,角速度的误差往往越小;分辨率越高,旋转中心的估计误差往往越小;分辨率越高,角速度越大,旋转半径的估计误差往往越小。

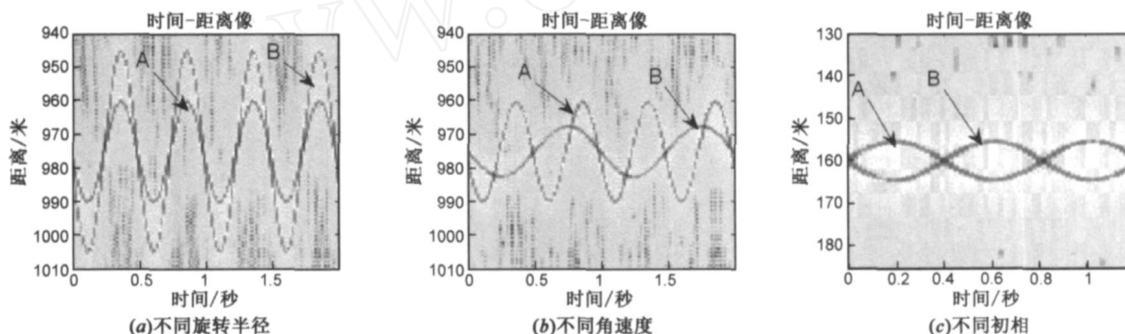


图2 不同参数下旋转运动目标时间-距离像

为进一步证实研究结果,设计仿真实验 2。参数设置如下:  $SNR = 40\text{dB}$ ,  $N = 1024$ ,  $f = 0.5\text{MHz}$ ,  $PRF = 50\text{KHz}$ ,  $f_0 = 37.5\text{GHz}$ ,  $R_0 = 160\text{m}$ ,  $\theta = 9^\circ$ 。两点目标(A、B)对称旋转(即旋转时初始相位相差  $180^\circ$ ),旋转半径均为  $r = 0.4\text{m}$ ,角速度均为  $\omega = 1.2\text{rad/s}$ ,散射强度相等,观测时间为 1.2 秒。图(c)为对应的仿真结果,设计开展的外场试验参数与仿真实验 2 类似,具体情况如下。

## 5.2 实测数据分析

为了验证理论分析和仿真实验,设计进行了对称旋转运动两点目标的毫米波频率步进雷达外场试验。

### 5.2.1 外场试验

图 3(a) 为实验场地和旋转体, (b) 为场景几何关系,雷达固定布置于高度为  $H = 27\text{m}$  的平台上,带有两个四象限角反射器的转臂在水平面内匀速转动,两转臂均为  $r$ 。具体参数为:雷达波长  $\lambda = 8\text{mm}$ 、 $f = 0.5\text{MHz}$ 、 $N = 1024$ 、 $\Delta t = 100\text{ns}$ 、 $T = 20\mu\text{s}$ 、 $\omega = 2\text{rad/s}$ 、 $r = 0.4\text{m}$ ,旋转体高度  $h = 0.3\text{m}$ 。

## 5 实验分析

本节从仿真实验和外场试验两方面进行验证。

### 5.1 仿真实验

参数设置如下<sup>[14]</sup>:  $SNR = 40\text{dB}$ ,  $N = 512$ ,  $f = 1\text{MHz}$ ,  $PRF = 30\text{KHz}$ ,  $f_0 = 35\text{GHz}$ ,  $\theta_0 = 0$ ,  $\omega = 0$ 。图 2(a) 为双点(A、B)同角速度、不同旋转半径旋转运动目标的时间-距离像图,  $\omega_A = \omega_B = 2\text{rad/s}$ ,  $r_A = 1\text{m}$ ,  $r_B = 2\text{m}$ ,两散射点强度相同,旋转中心相同( $R_0 = 975\text{m}$ ),观测时间为 2 秒;图 2(b) 为双点(A、B)同旋转半径,不同角速度旋转运动目标的时间-距离像图,  $\omega_A = 2\text{rad/s}$ ,  $\omega_B = 1\text{rad/s}$ ,  $r_A = r_B = 1\text{m}$ ,其它参数如(a)。从中可见目标在距离像中的位置呈余弦规律变化,变化周期和旋转周期相同,变化中心和旋转中心相同,振幅和旋转半径成正比(见图(a));当角速度变化时,距离像的变化周期和振幅都跟着变化(见图(b))。因两图中 A 点的运动规律相同,以 A 为例分析振幅变动情况,可发现其振幅约为  $15\text{m}$ ,这与理论值  $r_A \cos \sqrt{(f_0 - \omega_A T/f)^2 + 1} = 14.7\text{m}$  基本吻合。仿真结果验证了前面理论分析的正确性。

在此实验参数和场景下,进行多组不同位置( $R_0$  不同)的实际测量,测量时间包括 1.2s、0.6s 两组情况。经杂波对消处理后成像结果如图 4、图 5。图 4(a) 为观测时间为 1.2 秒时第 13 帧一维距离像,图(b) 为合成的时间-距离像,图(a) 相当于沿图(b) 所示剖面线剖得的一维像截面图。图 5 类似,从中可看出,实测数据的成像结果和仿真实验 2 相当,且振幅大小和旋转周期都与文中的理论分析吻合。

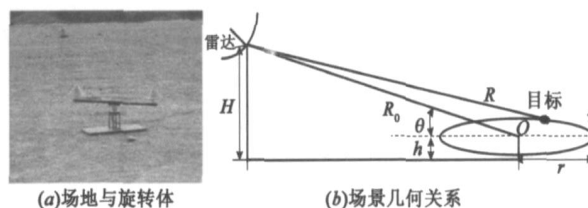


图3 外场测量图

### 5.2.2 微动特征提取

对双点(A、B)对称旋转情况,其位置为

$$R_A(m) = R_0 + r_A \cos \sqrt{(f_0 - \omega_A T/f)^2 + 1} \cos(\phi_{mA} + \theta_0 + \omega_A t)$$

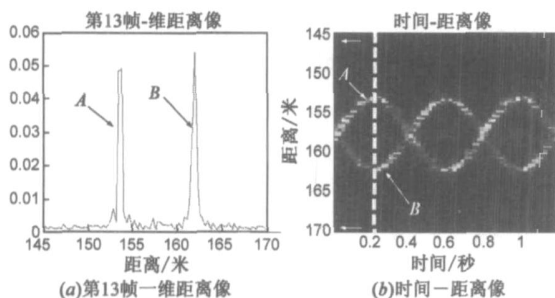


图4 观测时间为1.2秒的实测数据成像

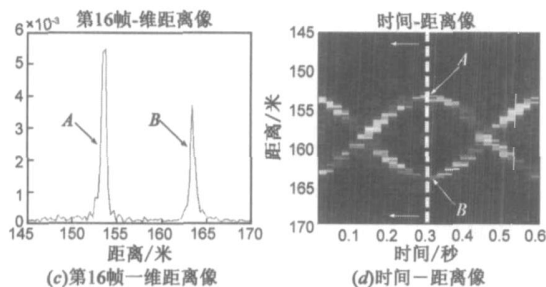


图5 观测时间为0.6秒的实测数据成像

$$R_B(m) = R_0 + r_B \cos \sqrt{(f_0 T/f)^2 + 1} \cos(\phi_{nB} + \phi_B + \dots) \quad (24)$$

由 3.2 节可求取相应的微动参数,具体到本实验,

$r_A = r_B = r$ ,  $\phi_A = \phi_B = \phi$ , 旋转半径求解式可另外表示为

$$\hat{r} = \frac{\max[R_A(m)] - \min[R_B(m)]}{2 \cos \sqrt{(f_0 T/f)^2 + 1}} \quad (25)$$

$\hat{\omega}$  为估计的角速度,  $\hat{R}_0$  为估计的旋转中心,  $\hat{r}$  为估计的旋转半径大小, 提取的微动参数值如表 1 所示。

### 5.2.3 结果分析

实验中, 旋转体角速度受外场风速、旋转体电机启动时间等诸多因素影响, 难以保持完全恒定, 每组实验都需记录下实际的角速度, 如表 1 的第 2 行; 又不同组实验是基于对旋转体在横向上每隔 0.5m 移动一次完成的, 故旋转中心的径向距离也不是恒定值。只有旋转半径  $r$  恒定不变, 这里用旋转半径的估计精度以及记录角速度和估计角速度的对比来衡量该微动参数提取算法的性能。

表 1 微动参数值表

| 序号                     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (rad/s)                | 1.36  | 1.33  | 1.26  | 1.28  | 1.35  | 1.30  | 1.37  | 1.37  | 1.40  | 1.47  | 1.35  | 1.30  | 1.47  |
| $\hat{\omega}$ (rad/s) | 1.38  | 1.36  | 1.27  | 1.25  | 1.33  | 1.31  | 1.36  | 1.32  | 1.38  | 1.44  | 1.33  | 1.27  | 1.44  |
| $\hat{R}_0$ (m)        | 157.9 | 157.9 | 157.8 | 157.9 | 158.2 | 158.5 | 158.2 | 158.5 | 158.5 | 158.2 | 158.5 | 158.9 | 158.8 |
| $\hat{r}$ (m)          | 0.39  | 0.37  | 0.41  | 0.40  | 0.38  | 0.38  | 0.37  | 0.38  | 0.37  | 0.37  | 0.40  | 0.41  | 0.37  |

## 6 总结

从旋转运动点目标的几何模型入手, 分析了其频率步进脉冲串回波特性, 通过分析脉冲串高分辨距离像随帧时间的变化特性, 建立了统一的目标时间-距离

### (1) 旋转半径估计精度分析

由误差理论的算术平均值原理和最小二乘原理可得, 用实测数据的算术平均值作为测量结果最接近真值。K 次观测时旋转半径估计值的平均值为  $\bar{r}$

$$\bar{r} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \hat{r}_i = 0.3846\text{m} \quad (26)$$

旋转半径的算术平均值的标准误差 用 Bessel 公式求得:

$$= \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (\hat{r}_i - \bar{r})^2} = 0.0157\text{m} \quad (27)$$

根据 3 准则剔除粗差, 则所有估计得到的旋转半径的剩余误差均小于 3, 也即数据列无粗差, 从而得到旋转半径

$$\bar{r} \pm 3 = 0.3846 \pm 0.0471\text{m} \quad (28)$$

旋转半径的真实值为 0.4m, 则可得估计误差为  $E_r = (0.3846 - 0.4)/0.4 \times 100\% = -3.8\%$ 。

产生误差的原因包括: 由系统参数决定的系统误差, 因实验雷达的距离向分辨率为  $r_r = 0.3\text{m}$ , 根据式 (22) 可知由系统分辨率带来的旋转半径最大误差可达 0.0265m, 即 6.62%; 估计旋转半径时需用到估计的角速度, 角速度估计误差会给旋转半径估计值带来一定的累积误差。这里得到的旋转半径估计值的误差在理论范围之内, 结果是合理的。

### (2) 角速度估计精度分析

因各组实验角速度不完全相同, 即真值不固定, 故传统的误差分析理论不再适用。为了对数据组的整体估计性能进行衡量, 以各次估计误差均值来衡量角速度估计的总体性能。

$$E = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K E_i = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{(\hat{\omega}_i - \omega_i)}{\omega_i} \times 100\% = -0.72\% \quad (29)$$

角速度误差受数据帧的时长以及微动引起的图像扩展等因素影响, 实验中误差不足 1%。由旋转半径和角速度的估计精度分析均可看出, 文中提出的微动参数提取算法正确、精确。

关系表达式, 用多帧高分辨距离像合成了时间-距离像, 从中可清晰看出目标位置随帧时间的变化关系。从振幅、变化中心、角速度等方面对比分析了时间-距离像中目标位置与目标实际位置的余弦变化规律, 从而进一步提取出点目标旋转运动的旋转中心、旋转半径及角

速度等微动特征,并详细分析了微动特征提取的理论精度。

结果表明:旋转半径、旋转中心的精度和距离像分辨率成正比,角速度和脉冲重复周期成反比;当转角变化 $2^\circ$ 时,距离像跨过的帧数越多,角速度的误差往往越小;距离分辨率越高,旋转中心的估计误差往往越小;距离分辨率越高,角速度越大,旋转半径的估计误差往往越小。设计开展了地基毫米波频率步进雷达对称旋转运动点目标的外场试验,结合仿真实验和外场实测数据进行了详细完善的分析论证,外场实测数据的分析结果与理论分析完全吻合。文中的微动特征提取思想不仅适用于旋转运动,对匀速运动、滚动等情况也适用;线性调频脉冲串信号具有类似于频率步进脉冲串信号的快时间、慢时间特性,故本特征提取思想也可推广应用于线性调频信号的高分辨体制雷达(如合成孔径雷达)系统。

#### 参考文献:

- [1] 庄钊文. 目标微动特性研究进展[J]. 电子学报. 2007, 35(3): 520 - 525.  
Zhuang Zhao-wen, LIU Yong-xiang, LI Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion [J]. Acta Electronica Sinica. 2007, 35(3): 520 - 525.
- [2] 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): 2 - 21.
- [3] Chen V C, Ling H. Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis [M]. Boston: Artech House, 2002.
- [4] Barlett M S, Movellan J R, Sejnowski T J. Face recognition by independent component analysis [J]. IEEE Transactions on Neural Network. 2002, 13(6): 1450 - 1464.
- [5] Wong S K, Riseborough E, Duff G. An analysis of ISAR image distortion based on the phase modulation effect [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing. 2006, Article ID: 83727.
- [6] S Lawrence Marple Jr. Sharpening techniques for sensor feature enhancement[OL]. 2005, [http://www.vista.ncsu.edu/workshop/presentations/Marple/Marple\\_afsr05.ppt](http://www.vista.ncsu.edu/workshop/presentations/Marple/Marple_afsr05.ppt).
- [7] V C Chen, F Li, S S Ho, H Wechsler. Analysis of micro-Doppler signatures [A]. IEE Proc. Radar Sonar Navigation [C]. 2003, 150(4): 271 - 276.
- [8] Chen V C, Qian S. Joint time-frequency transform for radar range-Doppler imaging [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems. 1998, 34(2): 486 - 499.
- [9] Sparr T, Krane B. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR[A]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation [C]. Aug. 2003, 150(4): 277 - 283.
- [10] Wehner D R. High Resolution Radar (2nd) [M]. Boston: Artech House, 1995.
- [11] 陈行勇, 魏玺章, 黎湘等. 调频步进雷达扩展目标高分辨距离像分析[J]. 电子学报. 2005, 33(9): 1599 - 1602.  
Chen Hang-yong, Wei Xi-zhang, Li Xiang, Guo Gui-rong. Analysis of achieving high resolution profile of extended target for stepped chirp radar [J]. Acta Electronica Sinica. 2005, 33(9): 1599 - 1602.
- [12] Yeo T S, Zhang Q. Some simulation results on millimeter wave chirp stepped-frequency signal with helicopter vibration [A]. IEEE Proc Geosci Remote Sensing Symp [C]. Seoul, Korea, 2005.
- [13] M R Ugg, E Meier, D N Uesch. Vibration and rotation in millimeter-wave SAR [J]. IEEE Trans on GRS, 2007, 45(2): 293 - 304.
- [14] Bassem R Mahafza, Atef Z Elsherbeni. MATLAB Simulations for Radar Systems Design [M]. CRC Press LLC, 2000 N. W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida. 2004.

#### 作者简介:



吴晓芳 女, 1983 年出生于安徽亳州, 2004 年获清华大学学士学位, 现为国防科技大学电子科学与工程学院博士生, 主要从事雷达成像处理、SAR 对抗技术等领域的研究。  
E-mail: wuxiaofang83@gmail.com



刘 阳 男, 1979 年出生于湖南长沙, 现为国防科技大学电子科学与工程学院博士生, 主要从事 SAR 对抗技术领域的研究。  
E-mail: liuyang@nudt.edu.cn



王雪松 男, 1972 年出生于内蒙古包头, 工学博士, 国防科学技术大学教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, IEEE 会员, “三通”分会委员。发表国内外学术论文 100 余篇, 进入 SCI、EI、ISTP 检索 60 余篇, 出版专著 6 部, 教材 1 部。主要从事弹道导弹、飞航导弹攻防对抗技术、雷达目标识别和新体制雷达技术等领域的研究工作。  
E-mail: wxs1019@vip.sina.com