

旋转目标距离像长度特性及微运动特征提取

马 梁,王 涛,冯德军,刘 进,王雪松

(国防科学技术大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘 要: 本文提出了利用旋转目标高分辨一维距离像的长度变化特性提取目标旋转半径和旋转速度等微运动特征的新方法.重点分析了旋转目标一维距离像的长度特性,指出当目标旋转时,微运动造成的一维像“虚假”长度和目标真实长度在雷达视线上的投影共同构成了目标的一维距离像.当目标匀速转动时,其一维距离像的长度变化服从正弦绝对值曲线,并根据这种变化特性,提出了两种提取旋转目标微运动特征的新方法.最后,设计了外场试验,通过实测数据证明了本文的观点和特征提取方法的有效性.

关键词: 旋转目标;微运动;一维距离像;特征提取

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 12-2273-07

The Characteristic of Range Profile and Micro-Motion Feature Extraction for Rotary Target

MA Liang, WANG Tao, FENG De-jun, LIU Jin, WANG Xue-song

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

Abstract: For rotary target, the method for extracting micro-motion feature by using the length of range profile is studied. Firstly, the characteristic of range profile for rotary target is analyzed. The length of range profile can be separated into two parts. One is the radial length of the target, and the other is the illusive length which is produced by rotation. Then, while target is rotating with a constant angular velocity, the length of range profile obeys the absolute value of sinusoid. The radius and the angular velocity can be estimated by using this variety of length. Finally, the results of feature extraction by utilizing the measured data practically in field are shown in figures, which validate the ideas.

Key words: rotary target; micro-motion; range profile; feature extraction

1 引言

刚性目标上各点围绕某点的转动或部件相对于物体上质心的机械振动、旋转等运动通常被称为微运动^[1].微运动在自然界普遍存在,如行人手和腿的摆动,桥梁和机翼的振动,电动机、直升机旋翼及军舰和装甲车上天线的转动以及导弹弹头的进动和自旋等等.微动特征与目标的形状、质量分布、受力状态和初始状态等因素密切相关,是目标的重要属性,可以作为目标特征提取与识别的重要特征.近年来,基于微多普勒分析的目标微运动特征提取和目标识别技术成为一个研究热点.

V. C. Chen 在他的一系列文章里比较全面地分析了刚体和非刚体目标的微运动特点和微运动特征提取方法^[1~5];T Sparr 等人利用美国海军的 APY-6 雷达获取的 SAR 数据提取了地面振动的角反射器的微运动特征,并

指出了傅立叶分析在微多普勒谱分析中的不足^[6];Geneker 等人详细分析了微多普勒分析技术在直升机类目标微运动特征提取和目标识别中的应用^[7].国外关于微运动方面的研究主要集中在基于目标微运动引起回波信号的变化进行信号分离和参数估计,而利用微运动引起目标高分辨图像特征的变化并据此进行特征提取的研究开展的较少.国内研究者利用微动目标的一维距离像序列提取出目标章动频率等微运动特征^[8~10],文中指出,微运动造成了目标与雷达视线夹角呈周期性变化,从而使得目标的径向长度发生周期性改变.但当目标转动时,旋转会使得目标一维像本身的结构发生改变,仅考虑径向投影的变化是不够的.

鉴于上述的情况,本文以包含两个对称散射点的旋转体为对象,从其宽带一维距离像的结构特点出发,研究了一维距离像长度变化规律和微动特征提取方法.做旋转运动的多数微运动部件都包含或可以简化为两个

收稿日期:2008-01-23;修回日期:2008-09-28

基金项目:国家自然科学基金(No. 60672033);国防科技大学优秀博士生创新资助项目(No. B070405)

对称散射点的旋转目标,如直升机的旋翼、弹头目标的尾部、军舰上天线的转动等等,通过本文的研究,可望对利用目标宽带回波进行微运动分析和特征提取提供一种新的思路和方法.本文第二节分析了旋转目标在步进频体制下的合成距离像结构特性,指出其一维距离像长度由两部分组成,一是目标真实长度在雷达径向上的投影,二是由于目标旋转造成的“虚假”长度,并且这种“虚假”长度大于目标的真实长度.当目标匀速转动时,其一维像长度变化服从正弦绝对值曲线;第三节利用目标长度变化特性,提出了两种提取目标旋转半径和旋转速度运动特征的新方法;第四节设计了外场测量试验,对外场实测数据利用本文提出的方法进行微运动分析和特征提取,取得了很好的效果.

2 旋转目标宽带距离像特性分析

假设刚性目标由两个散射点 A 、 B 组成, $AB = 2r$, O 为 A 、 B 中心. 目标绕 O 点匀速转动, 转速为 ω . 雷达位于旋转平面内, 距旋转中心 O 的距离为 R_0 , 雷达和 O 点的连线与目标之间的初始夹角为 ϕ_0 , 如图 1 所示.

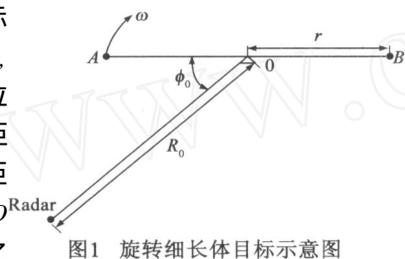


图1 旋转细长体目标示意图

设雷达发射步进频率脉冲信号, 一个周期的信号可以表示为:^[11,12]

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-iT_r}{T_r}\right) \exp(j2\pi(f_0 + i\Delta f)t) \quad (1)$$

其中, N 为子脉冲个数, T_r 为子脉冲重复周期, $i \cdot \Delta f$ 为第 i 个子脉冲的载频增量, f_0 为发射载频的基频分量, T_r 为子脉冲宽度.

散射点 A 的第 i 个子脉冲回波信号经混频后的输出信号为:

$$s_a(t) = A_0 \text{rect}\left(\frac{t - \frac{2R_i}{c} - iT_r}{T_r}\right) \exp\left[-j2\pi(f_0 + i\Delta f)\frac{2R_i}{c}\right] \quad (2)$$

其中 A_0 为散射点 A 的回波幅度, R_i 为第 i 个子脉冲到达 A 点时, 散射点 A 距雷达的距离. 假设在一个子脉冲持续时间内, R_i 保持不变, 对式(2)采样, 则可以得到

$$S_a(k) = A_0 \exp\left[-j2\pi(f_0 + k\Delta f)\frac{2R_k}{c}\right], \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

当目标静止时, 对 $S(k)$ 做 IDFT 处理后即可得目标的一维距离像.^[13,14]

当散射点 A 做匀速圆周运动时, 根据图 1, 容易得到:

$$R_k = R_0 - r \cos(\phi_0 + k\phi_s) \quad (4)$$

其中 ϕ_s 为一个子脉冲重复周期内, A 转过的角度, 则 $k\phi_s$ 表示第 k 个子脉冲照射时, A 点相对于初始位置 ϕ_0 转过的角度. 记 $\phi_k \triangleq \phi_0 + k\phi_s$, 将式(4)代入(3)后化简可得:

$$S_a(k) = A_0 \exp\left[-j2\pi\left(f_0 \frac{2R_0}{c} + k \frac{B}{N} \frac{2R_0}{c} - f_0 \frac{2r \cos \phi_k}{c} - k \frac{B}{N} \frac{2r \cos \phi_k}{c}\right)\right] \quad (5)$$

其中 $B = N \cdot \Delta f$ 为步进频率信号带宽, 对式(5)做 IDFT 即得到散射点 A 的一维距离像. 记式(5)的相位因子为

$$a = 2\pi\left[-f_0 \frac{2R_0}{c} - k \frac{B}{N} \frac{2R_0}{c} + f_0 \frac{2r \cos \phi_k}{c} + k \frac{B}{N} \frac{2r \cos \phi_k}{c}\right] \quad (6)$$

其中, 由于目标旋转而引起相位因子发生的变化记为

$$\begin{aligned} &= 2\pi\left[f_0 \frac{2r \cos \phi_k}{c} + k \frac{B}{N} \frac{2r \cos \phi_k}{c}\right] \\ &= \frac{4\pi r}{c} \left[f_0 + k \frac{B}{N}\right] \cos(\phi_0 + k\phi_s) \\ &= \frac{4\pi r}{c} \left[f_0 + k \frac{B}{N}\right] [\cos(\phi_0) \cos(k\phi_s) - \sin(\phi_0) \sin(k\phi_s)] \end{aligned} \quad (7)$$

当目标转速不大时, 对式(7)在 $k\phi_s = 0$ 处做泰勒展开, 只取前两项, 则式(7)可变为:

$$\begin{aligned} &= \frac{4\pi r}{c} \left[f_0 + k \frac{B}{N}\right] [\cos(\phi_0) (1 - (k\phi_s)^2/2) - \sin(\phi_0) (k\phi_s)] \\ &= \frac{4\pi r}{c} \left\{ f_0 \cos(\phi_0) + \left[\frac{B}{N} \cos(\phi_0) - f_0 \sin(\phi_0) \right] k - \left[f_0 \frac{\phi_s^2}{2} + \frac{B}{N} \sin(\phi_0) \phi_s \right] k^2 - \frac{B}{N} \frac{\phi_s^2}{2} k^3 \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6), 并令 $a = 2\pi\left(\frac{(0)}{a} + \frac{(1)}{a} \cdot k + \frac{(2)}{a} \cdot k^2 + \frac{(3)}{a} \cdot k^3\right)$, $\frac{(0)}{a}$ 、 $\frac{(1)}{a}$ 、 $\frac{(2)}{a}$ 、 $\frac{(3)}{a}$ 分别称为常数项、一次相位因子、二次相位因子和三次相位因子, 则

$$\begin{cases} \frac{(0)}{a} = -f_0 \frac{2R_0}{c} + f_0 \cos(\phi_0) \frac{2r}{c} \\ \frac{(1)}{a} = -\frac{B}{N} \frac{2R_0}{c} + \left[\frac{B}{N} \cos(\phi_0) - f_0 \sin(\phi_0) \phi_s \right] \frac{2r}{c} \\ \frac{(2)}{a} = -\left[f_0 \frac{\phi_s^2}{2} + \frac{B}{N} \sin(\phi_0) \phi_s \right] \frac{2r}{c} \\ \frac{(3)}{a} = -\frac{B}{N} \frac{\phi_s^2}{2} \frac{2r}{c} \end{cases} \quad (9)$$

常数项 $\frac{(0)}{a}$, 不包含频域因子 k , 对散射点 A 的一维像的位置和幅度无影响, 对式(5)求 IDFT 后取模可消除常数项的影响.

一次相位因子 $(1)_a$ 决定了 A 点一维像的位置,对式 (5) 求 IDFT 后,由 $(1)_a$ 的表达式可以得到 A 点一维像的位置:

$$L_a = \left(\left(\left[\frac{R_0}{\Delta R} + \frac{2r}{c} (f_0 N \phi_s \sin(\phi_0) - B \cos(\phi_0)) \right] \right) \right)_N \quad (10)$$

其中, L_a 表示取整运算, $()_N$ 表示以 N 为模

二次相位因子和三次相位因子的作用相当于频移非等间隔采样,使得对 (5) 求 IDFT 后, A 点一维像发生展宽和分裂. 当目标旋转半径不大 (不超过 1 米), 旋转速度较小 (发射 N 个子脉冲期间转动角度不超过 15 度) 时, 这两项对距离像长度的提取影响不大, 可以暂不考虑.

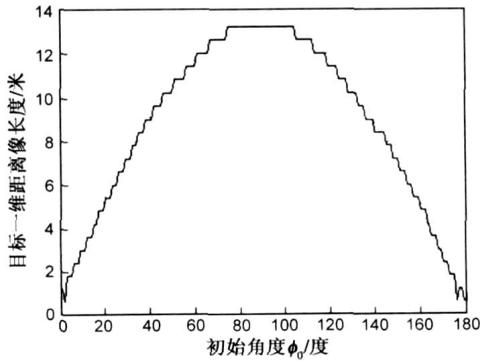
对散射点 B 而言, 式变为:

$$R_{kB} = R_0 - r \cos(\phi_0 + k\phi_s) = R_0 + r \cos(\phi_0 + k\phi_s) \quad (11)$$

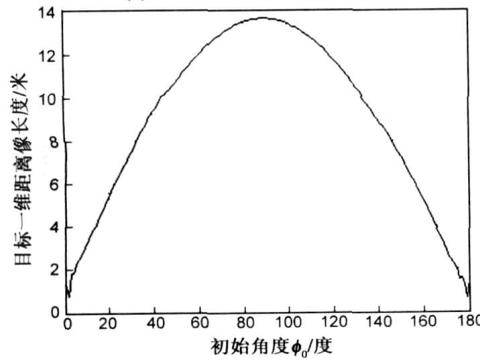
同上面的计算方法, 容易得到散射点 B 的一维距离像位置为:

$$L_b = \left(\left(\left[\frac{R_0}{\Delta R} - \frac{2r}{c} (f_0 N \phi_s \sin(\phi_0) - B \cos(\phi_0)) \right] \right) \right)_N \quad (12)$$

根据式 (10)、(12), 含有两个对称散射点的旋转体宽带一维距离像的长度可表示为:



(a) $N=1024$ 时一维距离像长度



(b) 10倍补零后一维距离像长度

图2 旋转目标一维距离像长度随初始角度变化曲线

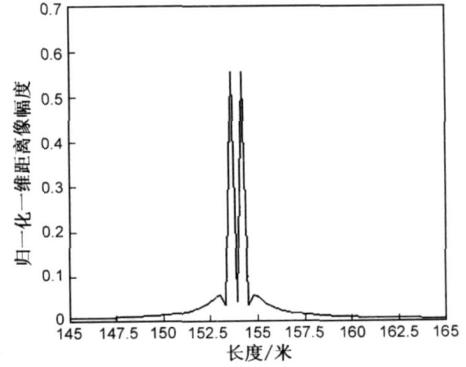
$$L_{int} = 2 \left[\left| \frac{2r}{c} (f_0 N \phi_s \sin(\phi_0) - B \cos(\phi_0)) \right| \right] \cdot \Delta R \quad (13)$$

其中, $R = c/2B$ 为宽带分辨率.

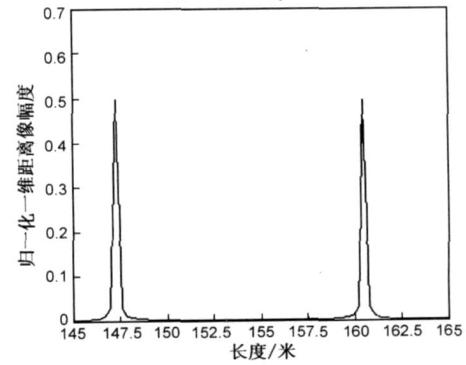
由式 (13) 可以看出, 旋转体的一维距离像长度由两部分组成, 一部分是目标自身的真实长度在雷达视线方向的投影, 可以表示为 $L_r = 2 \lfloor 2rB \cos(\phi_0) / c \rfloor$, 另一部分是由于旋转产生的“虚假”长度, 可以表示为: $L = 2 \lfloor 2r f_0 N \phi_s \sin(\phi_0) / c \rfloor$. 下面通过仿真试验具体说明由于目标旋转造成的一维距离像长度变化.

仿真参数设置如下: 步进频率雷达工作频率 $f_0 = 37.5$ GHz, 子脉冲的载频增量 $f = 0.5$ MHz, 每组子脉冲个数 $N = 1024$, 脉冲重复频率 PRF = 50 kHz. 目标旋转半径 $r = 0.5$ m, 在 N 个子脉冲内, 目标匀速转过角度 $\phi_N = N \phi_s = 10^\circ$ 此时, 目标角速度约为 8.72 rad/s.

图 2(a) 所示为一维距离像长度随初始夹角 ϕ_0 的变化曲线. 目标真实长度为 1 米, 但由于目标做旋转运动, 造成一维像长度严重偏离目标的真实长度. 当初始夹角越接近 0 度或 180 度, 旋转体的径向速度越小, 此时对一维距离像造成的影响也就越小, 其长度越接近目标的真实长度, 图 3(a) 给出了初始夹角为 180 度时, 目标的归一化一维距离像. 当初始夹角为 90 度时, 旋转体的径向速度最大, 此时, 由于旋转产生的“虚假”长度也就最大, 图 3(b) 给出了初始夹角为 90 度时, 目标的归



(a) 初始夹角 $\phi_0=180^\circ$



(b) 初始夹角 $\phi_0=90^\circ$

图3 旋转目标的一维距离像

一化一维距离像. 比较图 3(a) 和图 3(b) 可以看出, 由于目标做旋转运动, 造成散射点 A、B 的像分别向两侧移动, 从而使得提取出的目标长度远远大于其真实长度.

观察图 2(a) 可以看出, 一维像长度曲线呈锯齿状, 这是由于目标一维像是通过对式(5) 做 IDFT 后得到的, 而 IDFT 的离散性, 造成目标长度按照宽带分辨率的限制阶跃性变化, 式(13) 中的取整符号也反映出了该问题. 对式(5) 所表示的采样序列进行 10 倍补零运算, 得到一个点数为 10240 的新序列, 利用新序列做 IDFT 后提取目标的长度特征, 可以得到如图 2(b) 所示的曲线, 容易看出, 通过对序列 10 倍补零, 基本上消除了这种阶跃性变化, 式可以改写为:

$$L = \frac{4r}{c} |(f_0 N \phi_s \sin(\phi_0) - B \cos(\phi_0))| R \quad (14)$$

图 4 给出了雷达对旋转目标连续照射 1 秒(50 组脉冲) 时, 目标一维距离像随时间变化的情况. 图 4(a) 为 A、B 两点一维像在距离单元上的分布随时间变化的曲线, 图 4(b) 为目标一维距离像长度随时间变化曲线. 可以看出其长度变化规律近似服从正弦绝对值曲线, 这也和式(13)、(14) 给出的结果相吻合.

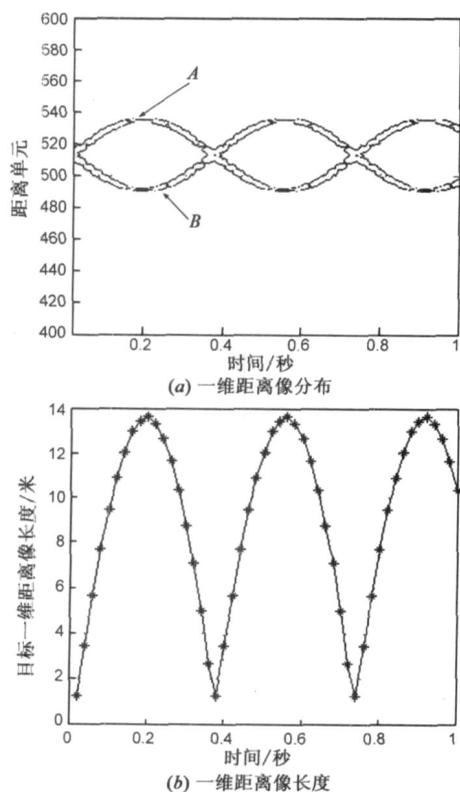


图4 旋转目标一维距离像随时间变化曲线

3 基于宽带距离像的微小特征提取

根据第二部分的分析, 在得到目标距离像长度的基础上, 提取旋转半径 r 和旋转速度 s 两个特征.

方法 1

在一维像长度变化的一个周期内选取相邻的三组长度特征 d_1 、 d_2 、 d_3 , 不失一般性, 假定在使式(14) 绝对值内符号取正的周期内选取这三组长度特征. 根据式(14), 并记 $\phi_N = N\phi_s$ 可以得到方程组:

$$\begin{cases} \frac{4r}{c} (f_0 \phi_N \sin(\phi_0) - B \cos(\phi_0)) = \frac{d_1}{R} \\ \frac{4r}{c} (f_0 \phi_N \sin(\phi_0 + \phi_N) - B \cos(\phi_0 + \phi_N)) = \frac{d_2}{R} \\ \frac{4r}{c} (f_0 \phi_N \sin(\phi_0 + 2\phi_N) - B \cos(\phi_0 + 2\phi_N)) = \frac{d_3}{R} \end{cases} \quad (15)$$

对方程组(15) 进行化简:

$$\begin{cases} \sqrt{f_0^2 \phi_N^2 + B^2} \sin(\phi_0 - \phi_N) = \frac{d_1 c}{4r R} \\ \sqrt{f_0^2 \phi_N^2 + B^2} \sin(\phi_0 + \phi_N) = \frac{d_2 c}{4r R} \\ \sqrt{f_0^2 \phi_N^2 + B^2} \sin(\phi_0 + 2\phi_N) = \frac{d_3 c}{4r R} \end{cases} \quad (16)$$

其中 $\sin(\phi_0 - \phi_N) = B / \sqrt{f_0^2 \phi_N^2 + B^2}$, $\cos(\phi_0 - \phi_N) = f_0 \phi_N / \sqrt{f_0^2 \phi_N^2 + B^2}$. 将方程组(16) 中第二、三个等式与第一个等式相除, 并记 $\phi = \phi_0 - \phi_N$, $k_1 = d_2 / d_1$, $k_2 = d_3 / d_1$:

$$\begin{cases} \frac{\sin(\phi + \phi_N)}{\sin(\phi)} = k_1 \\ \frac{\sin(\phi + 2\phi_N)}{\sin(\phi)} = k_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{ctg}(\phi) \sin(\phi_N) + \cos(\phi) = k_1 \\ \text{ctg}(\phi) \sin(2\phi_N) + \cos(2\phi) = k_2 \end{cases} \quad (17)$$

根据方程组(17) 容易解出

$$\begin{cases} \cos(\phi_N) = \frac{k_2 + 1}{2k_1} = \frac{d_1 + d_3}{2d_2} \\ \sin(\phi) = \frac{d_1 \sqrt{4d_2^2 - (d_1 + d_3)^2}}{2d_2 \sqrt{d_2^2 - d_1 d_3}} \end{cases} \quad (18)$$

将(18) 带回方程组(15), 即可解得旋转半径 r .

综上, 目标的旋转角速度 s 和旋转半径 r 可以表示为:

$$\begin{cases} s = \text{acos} \left(\frac{d_1 + d_3}{2d_2} \right) \cdot \frac{\text{PRF}}{N} \\ r = \frac{cd_2 \sqrt{d_2^2 - d_1 d_3}}{2R \sqrt{f_0^2 \phi_N^2 + B^2} \sqrt{4d_2^2 - (d_1 + d_2)^2}} \end{cases} \quad (19)$$

其中, PRF 为步进频雷达的脉冲重复频率.

方法 2

根据式(14), 连续照射下, 第幅一维距离像的长度为:

$$\begin{aligned} D(i) &= \frac{4r}{c} |f_0 N \phi_s \sin(\phi_0) - B \cos(\phi_0)| \cdot R \\ &= \frac{4r R}{c} \sqrt{f_0^2 \phi_N^2 + B^2} |\sin(\phi_0 + i\phi_N)| \\ &, i = 0, 1, 2, \dots, M-1 \end{aligned} \quad (20)$$

对这 M 个长度数据做 DFT,即可求得 ϕ_N :

$$\phi_N = \frac{m_{\max}}{M} \quad (21)$$

其中, m_{\max} 指的是 DFT 后,最大正频率所对应的单元数.之后旋转半径 r 的可参考方法 1 求得.

4 毫米波宽带雷达导引头测量试验及结果分析

为了验证上述理论分析的结果,设计了一个简单的

旋转体目标,旋转体中心位置固定,在两端各安装一个四象限二面角作为强散射点,两个散射点的旋转半径相同记为 $r=0.4$ 米.如图 5 (b) 所示.利用某型号频率步进体制的毫米波雷达导引头,在外场条件下对该旋转体的回波特性进行了测量.图 5 (a) 所示为外场试验的测量环境.



图5 外场测量实验场景

表 1 毫米波雷达导引头参数

体制	波长	工作频率	子脉冲宽度	子脉冲载频增量	每组子脉冲个数	信号带宽	脉冲重复频率
步进频	8mm	37.5GHz	100ns	0.5MHz	1024	512MHz	50kHz

外场试验中,毫米波雷达导引头的具体参数如表 1 所示.将旋转体置于测量场地的不同位置,进行多次测

量,每次测量的时间大约为 1 秒,每次测量时,旋转体的转速略有不同.图 5 (c) 给出了测量时目标和雷达之间的几何关系示意图,图中的圆点代表了目标摆放的不同位置,一共对 6 个位置进行了测量.

图 6 为某次外场测量数据的处理结果.图 6 (a) 为旋转目标两端的两个角反射体一维像在距离单元上的

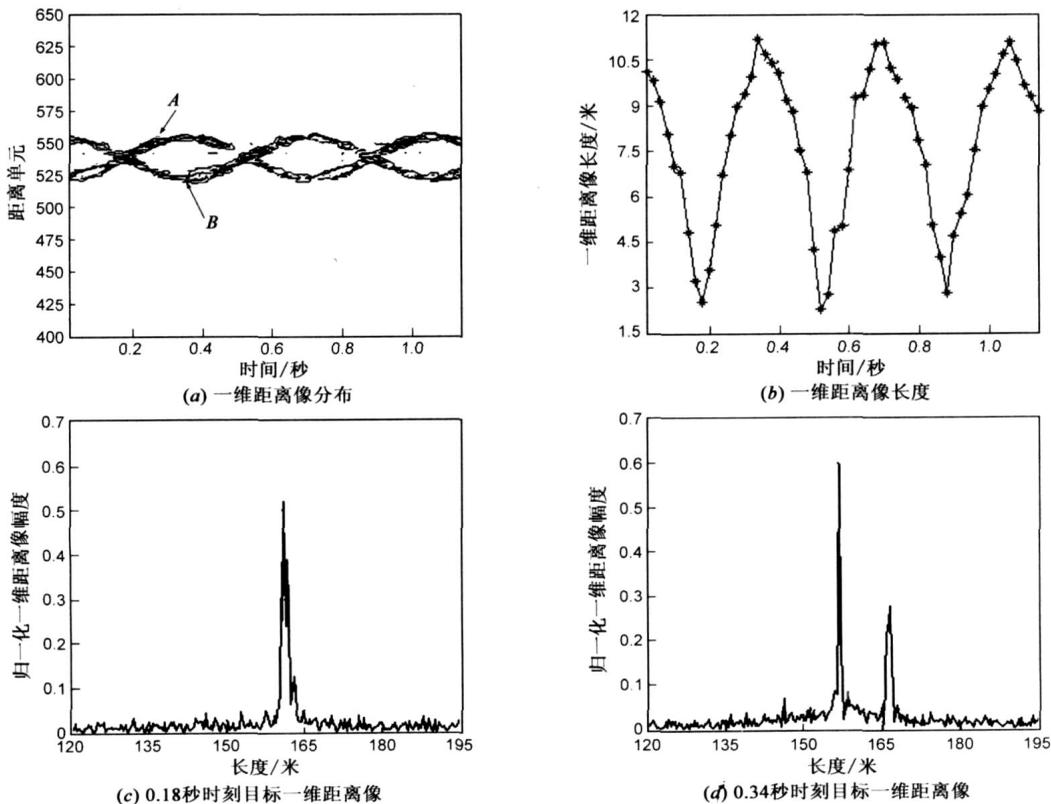


图6 外场实测数据处理结果

分布随时间变化的曲线,图 6(b)为根据外场数据提取的目标一维距离像长度随时间变化的曲线。可以看出,其长度变化近似服从正弦绝对值的变化规律,这和第二部分的理论推导相一致。图 6(c)为目标在 0.18 秒时的一维距离像,对应于图 6(b)中长度变化曲线的第一个谷点,图 6(d)为目标在 0.34 秒时的一维距离像,对应于图 6(b)中长度变化曲线的第一个峰点。为了减少杂波和噪声对一维距离像长度估计的影响,采用基于归一化阈值的门限估计方法提取目标的一维像长度特征。

利用第三部分提出的两种方法,对实测数据进行旋转体目标的特征提取,得到的结果见表 2。由第三部分的分析可知,两种估计方法的不同之处在于对目标旋转速度的估计上。方法 1 利用了相邻三次的距离像长度,通过解方程组的方法得到旋转速度的估计值;而方法二则通过对距离像长度序列做傅立叶变换,进而得到旋转速度的估计值。从二者的实现过程看,方法 1 更依赖于单次距离像长度特征的提取结果,这点在试验结果中也得到了反映。利用方法 1 得到的转速估计值,较好的估计误差为 6.71%(第一次试验),较差的在 13.62%(第五次试验),并且估计值在真值上下波动较大。而采用方法 2 得到的估计结果,降低了单次长度特征提取的影响,误差较稳定,从试验结果来看,仅有第四次产生了较大的误差,这主要是由于观测时间较短,一维像长度序列仅有 50 多个点,做 DFT 的精度不高引起的。

表 2 旋转体特征估计结果(旋转半径真实值 0.4 米)

测量试验编号	1	2	3	4	5	6
真实转速(rad/s)	9.332	8.517	8.378	7.926	8.063	8.482
转速估计值(rad/s)(方法 1)	8.706	9.661	9.285	8.763	9.161	7.844
转速估计值(rad/s)(方法 2)	9.204	7.977	9.204	9.203	7.670	9.203
半径估计值(m)(方法 1)	0.38	0.38	0.35	0.35	0.34	0.42
半径估计值(m)(方法 2)	0.41	0.45	0.36	0.33	0.39	0.36

在试验中,旋转体转速的真实值是通过在 15 秒至 1 分钟的时间内人为记数取平均得到的,而雷达的观测时间大约为 1 秒。由于电压不稳等因素会导致旋转体的转速不稳定,所以上述对于转速的估计,是令人满意的。目标旋转半径的真实值为 0.4 米,由表 2 的结果看出,对半径的估计大多偏小。观察图 6(b)、(c)、(d)可以看出,由于杂波等因素的存在,造成目标一维距离像发生变形,所提取的长度特征并不完全满足正弦绝对值曲线,因此造成了对目标旋转半径的估计值和真实值相比有所偏差,考虑到雷达系统宽带分辨力为 0.3 米,旋转半径估计值的误差是可以接受的。

5 结论

本文针对最常见的旋转体——包含两个对称散射

点的旋转目标,分析了其在步进频率信号照射下,合成一维距离像的结构特征和长度变化规律。从理论上推导出其长度变化服从正弦绝对值曲线,并得到了根据距离像长度计算旋转半径和旋转速度的计算公式。利用毫米波步进频率雷达导引头对旋转体测量的外场数据,对本文提出的理论和方法进行了验证,得到了很好的结果。文本的研究成果对于旋转目标宽带距离像特性分析、微运动特征提取、目标识别都具有借鉴意义。

需要说明的是,本文的研究成果是建立在旋转目标转速不高的假设下得到的结论。当旋转目标转速过高时,径向速度对一维像的展宽影响必须加以考虑,该问题有待在下一步工作中开展。同时,多旋臂旋转目标、不等旋臂旋转目标一维距离像的结构特点和微运动特征提取问题也将在下步的工作中进行更为深入的研究。

参考文献:

- [1] V C Chen, F Li, S Ho, et al. Micro-doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study[J]. IEEE Trans on AES, 2006, 42(1): 2 - 21.
- [2] V C Chen, Hao Ling. Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis [M]. Boston, London: Artech House, 2002. 173 - 193.
- [3] V C Chen, F Li, S Ho, H Wechsler. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 271 - 276.
- [4] V C Chen. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics: A review[A]. Anthony J Bell. Proceedings of SPIE on Independent Component Analyses, Wavelets, and Neural Networks[C]. Orlando, USA: SPIE Press, Apr 2003, 5102: 240 - 249.
- [5] V C Chen. Analysis of radar micro-Doppler signature with time-frequency transform[A]. Proceedings of the 10th IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing[C]. Washington, USA: Naval Res Lab Press, Aug 2000. 463 - 466.
- [6] Sparr T, Krane B. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 277 - 283.
- [7] Gene Grenaker, Jon Geisheimer, David Asbell. Extraction of Micro-Doppler data from vehicle targets at X-band frequencies[A]. Robert Trebits, Proceedings of SPIE on Radar Sensor Technique[C]. Orlando, USA: SPIE Press, Apr 2001. 4374: 1 - 9.
- [8] 冯德军, 陈志杰, 王雪松, 王国玉. 基于一维距离像的导弹目标运动特征提取方法[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(6): 43 - 47.

FENG De-jun, CHEN Zhi-jie, WANG Xue-song, WANG Guo-yu. A method for extracting moving feature of ballistic missile targets from high resolution range profiles[J]. Journal of Na-

- tional University of Defense Technology, 2005, 27(6): 43 - 47. (in Chinese)
- [9] 陈行勇. 微动目标雷达特征提取技术研究[D]. 湖南长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2006.
CHEN Hang-yong. Research on Radar Signature Extraction from Target with Micro-motions [D]. Changsha, Hunan: Graduate School of National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [10] 陈行勇, 刘永祥, 姜卫东, 郭桂蓉. 微动目标合成距离像数学分析[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 585 - 589.
CHEN Hang-yong, LIU Yong-xiang, JIANG Wei-dong, GUO Gui-rong. Mathematics of synthe sizing range profile of target with micro-motion [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 585 - 589. (in Chinese)
- [11] T H Einstein. Generation of High Resolution Radar Range Profiles and Range Profile Auto-Correlation Functions Using Stepped Frequency Pulse Trains [R]. Lexington, Massachusetts: Lincoln Laboratory, Oct 1984. AD-A149242.
- [12] Mun, Kok Leong. Stepped Frequency Imaging Radar Simulation [R]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, Mar 2000. AD-A379137.
- [13] Wehner D R. High-Resolution Radar [M]. Boston, MA, USA: Artech House, 1995. 197 - 238.
- [14] M A Hussain. HRR, length and velocity decision regions for rapid target identification [A]. William J. Miceli, Proceedings of SPIE on Radar Processing, Technology and Applications [C]. Denver, Colorado: SPIE Press, 1999. 3810: 40 - 52.

作者简介:



马 梁 男, 1983 年 5 月出生于河南开封, 现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生, 目前主要研究方向为雷达信号处理、雷达目标识别。

Email: aquila_free@163.com



王 涛 男, 1976 年 12 月出生于河南南阳, 2006 年获国防科技大学电子科学与技术工程学院工学博士学位。研究兴趣为雷达极化信息处理、雷达目标识别。

Email: wanter2000@gmail.com