

舰船目标单脉冲雷达三维成像技术¹

马长征 张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘要 单脉冲雷达三维像和 ISAR 像相比与目标的物理尺寸相一致, 在精密制导中具有重要的意义。本文分析了舰船目标三维转动引起的多普勒频移的特点, 提出了在相干处理时间内利用解调频技术分离各散射点的方法, 针对单脉冲测角会出现的角闪烁现象, 给出了处理角闪烁的办法。仿真结果表明, 本文的方法成像质量较好。

关键词 单脉冲雷达, 舰船目标, 三维成像

中图分类号 TN957.7

1 引言

逆合成孔径雷达 (ISAR) 利用目标和雷达之间的相对转动, 目标上各散射点的多普勒频移的不同来对目标成像^[1-3]。对于机动目标, 特别是对舰船目标, 因海浪的运动使舰船同时具有偏航 (yaw), 前后颠簸 (pitch), 左右摇摆 (roll), 目标瞬时转动轴时刻在变化使得距离-多普勒平面时刻在变, 从而 ISAR 像时刻在变, ISAR 像有时就不能反映目标的真实形状信息, 不利于自动识别和精密制导。

对于点目标, 单脉冲雷达通过利用回波和差信号可测出点目标偏离波束中心的角度, 即对点目标在空间定位。对于多散射点的复杂目标, 可以利用大带宽信号在距离上分开各散射点, 然后在每一距离单元对散射点测角, 形成三维像。若同一距离单元有多个散射点, 因多散射点的矢量合成会出现角闪烁, 此时可以借鉴 ISAR 技术, 通过相干积累再在多普勒域分离各散射点, 然后利用和差波束对各散射点测角, 可减少角闪烁的程度, 得到较好的目标的三维像^[1]。但此时同一距离-多普勒单元上仍可能有多个散射点, 单脉冲测角仍会出现角闪烁, 造成成像质量下降。我们给出了一个准则来判断是否发生了角闪烁, 对于发生了角闪烁的点不计算其空间坐标。

当目标相对于雷达是匀速转动时, 各散射点回波的转动分量是近似单频信号, 可以用傅里叶变换来提取各散射点。对于机动目标, 上述假设不成立, 也有多篇文献考虑其 ISAR 成像^[4-7]。舰船目标其运动非常复杂, 也是一种机动目标, 去掉目标的平动分量, 其瞬时转动的转速是时变的, 多普勒频移是一个连续函数。由 Weierstrass 定理, 可由多项式来逼近此连续函数, 选取的多项式的阶数越高, 逼近性能越好, 但计算量剧增, 我们考虑在相干处理时间内用线性函数来近似转动引起的多普勒频移, 提出利用解调频技术分离各散射点。

当雷达波束和海平面的入射角 (和垂线夹角) 较大时, 海杂波强度很弱, 本文暂不考虑海杂波的影响。

2 单脉冲雷达三维成像原理

单脉冲雷达和差波束测角是一种非常成熟的技术。对于已经跟踪的目标, 由于目标距波束中心很近, 因而和波束增益可以看成常数, 差波束增益可以看成线性函数。设 A 为和波束天线增益, K 为差波束天线方向图的斜率, 点目标和单脉冲雷达天线波束中心 (电轴) 夹角为

¹ 1998-10-08 收到, 1999-07-16 定稿

θ , 目标回波信号复振幅为 $s(t)$, 通过单脉冲天线接收, 和信号为 $s_h = F_{\Sigma}(\theta)s(t) = As(t)$, 差信号为 $s_c = F_{\Delta}(\theta)s(t) = K\theta s(t)$, 通过计算归一化误差信号 $E = (s_c/s_h)(A/K)$ 即可求出 θ . 考虑到各种噪声, 需对 E 取实部. 假设两路波束通路在比幅前相移的一致性很好, 差信号存在的“零值深度”问题可忽略.

对于复杂目标, 为了得到高质量的三维像, 如引言中所述, 应充分分离目标上的散射点. 在纵向上, 利用大带宽信号即可, 在横向上就要利用相干积累, 也就是说要利用 ISAR 技术. 设 $\Sigma(m, n)$, $\Delta_{az}(m, n)$ 和 $\Delta_e(m, n)$ 对应于和波束、水平差波束和俯仰差波束的 ISAR 像, (m, n) 位置对应于某一强散射点, 通过计算 $\text{Re} \left\{ \frac{\Delta_{az}(m, n) A}{\Sigma(m, n) K} \right\}$ 和 $\text{Re} \left\{ \frac{\Delta_e(m, n) A}{\Sigma(m, n) K} \right\}$ 即可求出此散射点相对于波束中心的水平夹角和仰角, 然后根据目标距雷达的距离即可得出其空间位置坐标, 这样就可以得到目标的三维像.

3 舰船运动特点分析及各散射点分离方法

对于在海上航行的舰船目标, 除了舰船本身的向前运动外, 由于海浪的运动, 舰船会出现前后颠簸, 偏航和左右摇摆 (我们主要讨论雷达向着舰船飞行, 舰船相对雷达视线的夹角的变化相对舰船本身的转动来说可以忽略, 对成像没有贡献, 我们在下面的讨论中忽略舰船的平动). 这些运动可以看成是三维转动, 其每一转角分量随时间的变化可以用一个正弦函数来描述^[1]:

$$\alpha = q \sin(2\pi \frac{t}{T} + \varphi), \quad (1)$$

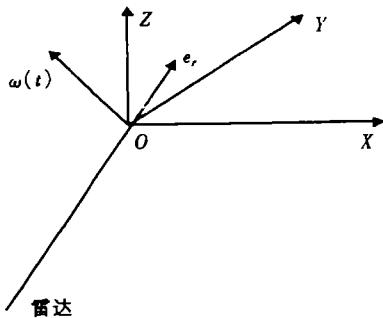


图 1 以目标中心为原点的坐标系

其中 q 是转动的幅度, T 为转动周期, φ 为初始相位. 文献 [1] 给出了两种类型舰船, 在海况 5 时三种转动的 q 和 T 的取值. 对于驱逐舰, q 分别为 1.7° , 1.9° , 19.2° , T 分别为 6.7s , 14.2s , 12.2s ; 对于航空母舰, q 分别为 0.45° , 0.667° , 2.5° , T 分别为 11.2s , 33.0s , 26.4s . 由于同时存在着三种非均匀转动, 使得舰船的总转动规律非常复杂. 如图 1 所示, 以目标中心为原点建立坐标系, 雷达视线的方向向量为 $\vec{e}_r = (e_{r1}, e_{r2}, e_{r3})$. 设三种转动角度随时间的变化为

$$\alpha_i = q_i \sin(\frac{2\pi t}{T_i} + \varphi_i), \quad i = 1, 2, 3; \quad (2)$$

则转速为

$$\omega_i(t) = \dot{\alpha}_i = (2\pi q_i / T_i) \cos(2\pi t / T_i + \varphi_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

任一时刻目标上任一点 $\vec{p} = (x_1, y_1, z_1)$ 的多普勒频移 $f_d(t) = 2(\vec{\omega}(t) \times \vec{p}) \cdot \vec{e}_r / \lambda$, 转轴转动的角速度为

$$\omega_{axis} = \vec{\omega} \times \dot{\vec{\omega}} / |\dot{\vec{\omega}}|, \quad (4)$$

其中 $\dot{\omega}$ 为 ω 的导数。我们给出驱逐舰, 其前后颠簸、偏航、左右摇摆初始相位分别为 $\pi/2$, $\pi/14$, $\pi/3$, 雷达与 X 轴夹角 90° , 与 Z 轴夹角 60° 情况下, 30s 时间内转轴运动的情况与此时目标上各散射点的多普勒频移, 如图 2、图 3 所示。

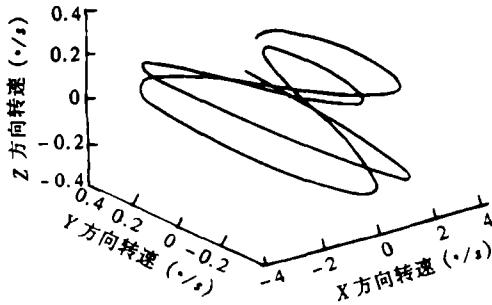


图 2 转轴转动向量随时间的变化

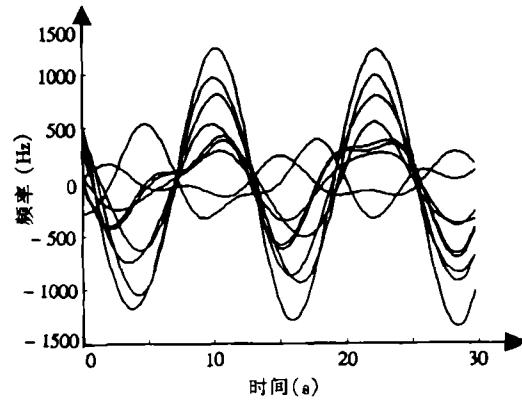


图 3 各散射点多普勒频移随时间的变化

我们可以看到, 长时间内各散射点多普勒频移是比较复杂的。在短时间内, 为了处理的方便可以对多普勒频移进行零阶或一阶近似, 即对转动做匀速或匀加速近似。如果转动能被看成是匀速的, 则用 FFT 方法即可分离各散射点; 若只能被看成匀加速转动, 则需要利用解调频等技术。在相干处理时间内何时可由匀速转动近似, 何时必须由匀加速转动近似, 不仅与舰船本身的转动有关, 也与雷达和舰船的相对方位有关。能做零阶近似的时间段比较小, 大多数时间内需做一阶近似。

下面具体讨论转轴变化对多普勒频移的影响。首先设雷达视线垂直于 (X, Z) 平面, 因转动在雷达视线方向的分量对各散射点的多普勒频移不产生影响, 我们设目标的转轴只限于在 (X, Z) 平面上运动, 以 Z 轴为初始转动轴, 则

$$\omega(t) = \left[\frac{2\pi q_1}{T_1} \cos \left[\frac{2\pi t}{T_1} + \frac{\pi}{2} \right], 0, \frac{2\pi q_3}{T_3} \cos \left[\frac{2\pi t}{T_3} + \varphi_3 \right] \right]. \quad (5)$$

那么目标上任何一点 (x, y, z) 其多普勒频移为

$$f(t) = \frac{2}{\lambda} \left[x \frac{2\pi q_3}{T_3} \cos \left[\frac{2\pi t}{T_3} + \varphi_3 \right] - z \frac{2\pi q_1}{T_1} \cos \left[\frac{2\pi t}{T_1} + \frac{\pi}{2} \right] \right]. \quad (6)$$

多普勒频移的变化率 (调频率、斜率) 为

$$\mu = f'(t) = \frac{2}{\lambda} \left[-x \left[\frac{2\pi}{T_3} \right]^2 q_3 \sin \left[\frac{2\pi}{T_3} t + \varphi_3 \right] + z \left[\frac{2\pi}{T_1} \right]^2 q_1 \sin \left[\frac{2\pi}{T_1} t + \frac{\pi}{2} \right] \right]. \quad (7)$$

由 (6) 式, (7) 式可知, 当 $t = 0$ 时, 空间各散射点的多普勒频移的初始频率 f 和斜率 μ 的 (f, μ) 坐标分布在以直线 $\mu/f = -(2\pi/T_3)\text{tg}(\varphi_3)$ 为中心, 宽度为 $(2/\lambda)H(2\pi/T_1)^2 q_1$ 的一个带状区域内, H 为目标的高度。在一般转动情况下, 类似如上讨论。随着 t 的变化, 中心直线的斜率会变化, 带状区域的宽度也会发生变化。图 4、图 5 给出了对于 8mm 波长,

0.32s 时间内, 前后颠簸、偏航、左右摇摆初始相位分别为 $\pi/2$ 、 $\pi/14$ 、 $\pi/3$ 时, 驱逐舰上各散射点多普勒频移随时间的变化和初始时刻的 (f, μ) 坐标。

虽然多普勒频移在一小段时间内仍然可以看成是线性函数, 但其 (f, μ) 坐标不在同一条直线上, 与转动轴固定匀加速转动时的情况不同^[5]。由此我们可以得到如下结论, 由于机动, 同一距离单元上各散射点多普勒频移规律不同, 需要分别进行相位补偿。

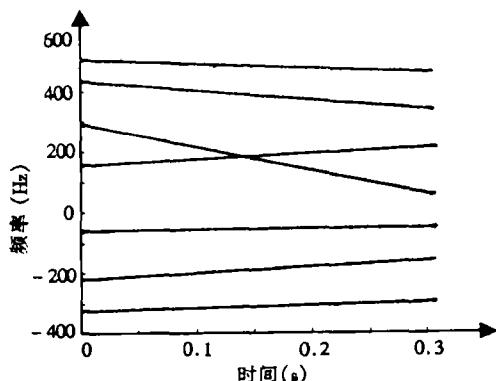


图 4 各散射点多普勒频移随时间的变化

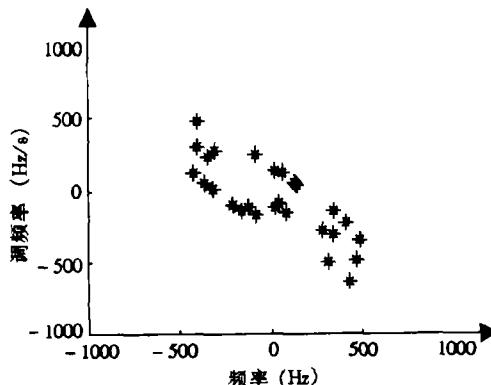


图 5 各散射点的坐标

4 三维成像及角闪烁点剔除

由上节分析我们看到, 对于舰船目标各散射点回波多普勒频移被近似成线性调频信号, 要想较好地分离各散射点, 需要解调频处理。假如我们已经对和差信号分离了各散射点, 利用单脉冲测角原理可以计算出各散射点的角度, 即可得到目标的三维像, 但多普勒频移规律相近的点会投影到一个点上, 旁瓣也使相邻的散射点互相影响, 这样利用单脉冲测角会出现角闪烁, 我们提出如下的准则把发生角闪烁的点剔除掉。

对于理想的单脉冲天线, 如果回波是理想孤立散射点的回波, 回波和差归一化误差信号的虚部为零 (若天线存在零值深度, 虚部是小量), 如果不是理想孤立散射点, 回波归一化信号的虚部不为零。但真实目标不可能有真正的理想孤立散射点, 所谓的孤立散射点是大量距离很近的散射点的叠加, 所以我们认为图 5 上的孤立点代表的目标上的散射点分两种情况, 一种是距离很近的大量散射点的叠加, 称其为孤立散射点, 一种是分开的多个孤立散射点因多普勒频移规律相近合成的一个点称为合成散射点。两种情况均有可能发生角闪烁。

设单脉冲天线接收了 m 个散射点的回波信号, 那么归一化误差信号为

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m \theta_i a_i e^{j\varphi_i}}{\sum_{i=1}^m a_i e^{j\varphi_i}} = \theta_1 + \frac{\sum_{i \neq 1} (\theta_i - \theta_1) a_i e^{j\varphi_i}}{a_1 e^{j\varphi_1} + \sum_{i \neq 1} a_i e^{j\varphi_i}}, \quad (8)$$

其中 φ_i 为各散射点的回波相位。各散射点不论在同一空间分辨单元内, 还是不在同一空间分辨单元内, 因距离分辨单元比波长大多, φ_i 之间只能看成是均匀分布。

若是孤立散射点的情况, 即 θ_1 对应一强散射点 P , 其他均为小散射点, $a_1 \gg a_i, i \neq 1$, 上式可以近似为

$$E \approx \theta_1 + \sum_{i \neq 1} (\theta_i - \theta_1) \frac{a_i}{a_1} e^{j(\varphi_i - \varphi_1)} = \theta_1 + \sum_{i \neq 1} (\theta_i - \theta_1) \frac{a_i}{a_1} \cos(\varphi_i - \varphi_1) + j \sum_{i \neq 1} (\theta_i - \theta_1) \frac{a_i}{a_1} \sin(\varphi_i - \varphi_1). \quad (9)$$

根据 2 节所述, 此时测出的角度为

$$\theta \approx \theta_1 + \sum_{i \neq 1} (\theta_i - \theta_1) \frac{a_i}{a_1} \cos(\varphi_i - \varphi_1). \quad (10)$$

θ 和 θ_1 之间的误差是其他散射点相对于 P 点的夹角的加权和。归一化误差信号的虚部也为其他散射点相对于 P 点的夹角的加权和。转换到横向距离, 记 $x = \text{Re}\{R \times E\}$, 这样使得所得结果和纵向距离无关。另记实部误差 $R_x = |\text{Re}\{R \times E - R \times \theta_1\}|$, 虚部误差 $I_x = |\text{Im}\{R \times E\}|$, 我们给出如下的计算机仿真结果。设目标相对于雷达 5km, 目标的分辨单元是 $0.7 \times 0.7 \times \text{m}^3$, 单元中心在横向从 0 到 60, 单元内有一强散射点, 幅度为 1, 另外有 1 到 9 个不等的小散射点, 强度从 0 到 0.5 随机均匀分布, 位置在一个分辨单元内随机均匀分布。我们统计了实、虚部误差 (R_x, I_x) 的分布情况和平均 R_x 随着 I_x 的变化情况 (拟合后), 如图 6, 图 7 所示。图 6 中, (R_x, I_x) 有远大于 1 的, 但很少, 为画图清晰截掉了, 不影响我们的分析。可以看到, (R_x, I_x) 均分布在一个较小的范围内, 概率密度函数形状相似, 均值呈近似线性关系, I_x 可以作为判断 R_x 的依据。

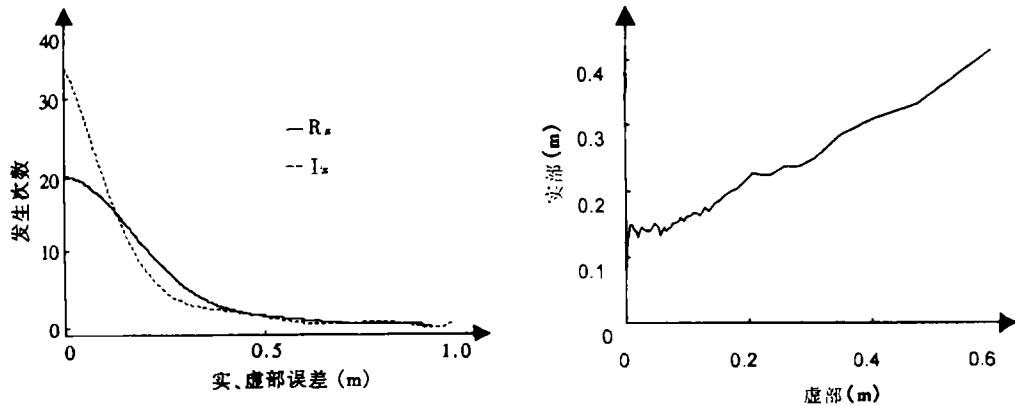


图 6 孤立散射点时 R_x, I_x 的概率密度函数直方图 图 7 归一化误差信号平均实部随虚部的变化

对于合成孤立散射点的情况, 各散射点的强度一般差不多, (8) 式可以写为

$$E = \frac{[\sum_{i=1}^m a_i \theta_i e^{j\varphi_i}] [\sum_{k=1}^m a_k e^{j\varphi_k}]^*}{[\sum_{i=1}^m a_i e^{j\varphi_i}] [\sum_{k=1}^m a_k e^{j\varphi_k}]^*} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m a_i a_k^* \theta_i e^{j(\varphi_i - \varphi_k)}}{[\sum_{i=1}^m a_i e^{j\varphi_i}] [\sum_{k=1}^m a_k e^{j\varphi_k}]^*}. \quad (11)$$

测出的角度是所有角度的加权和, 一般不是任何一个散射点对应的角度, 即发生了角闪烁。这时我们直接统计 x 和 I_x 的分布情况。我们设目标距雷达 5km, 2 至 5 个孤立散射点随机分布在 50m 宽度范围内, 强度为 0.5 到 1 之间随机分布, $|x|$ 和 I_x 的分布如图 8 所示。

我们看到 $|x|$ 、 I_x 的分布函数的形状和孤立散射点时的一样, 这是因为它仍然是一种平均的结果, 但数值范围却增大了很多。

由上分析我们看到可以用 I_x 来判断散射点到底是那一种散射点, 并同时判断是否发生了角闪烁。如果得到 x 的在目标所在的范围内, 去掉、不去掉对成像质量影响不大, 但如果远离目标, 就应当去掉。对于形状不是非常复杂的目标, 合成孤立散射点的情况一般不是很多, 如果期望去掉, 就要选一个较小的阈值; 如果期望要这个散射点, 就要选一个较大的阈值; 即选择一个恰当的角闪烁判断阈值 δ , 由回波信号计算 $I_x = \left| R \times \text{Im} \left[\frac{\partial c}{\partial s_h} \frac{A}{K} \right] \right|$; 若 $I_x > \delta$, 则判断发生了角闪烁, 不计算此散射点的坐标, 否则计算此散射点的坐标。

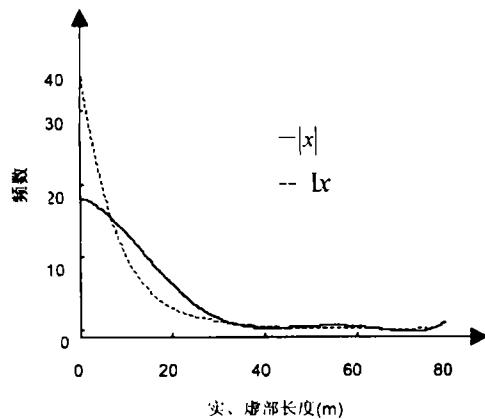


图 8 合成孤立散射点得到的 $|x|$ 和 I_x 的概率密度函数直方图

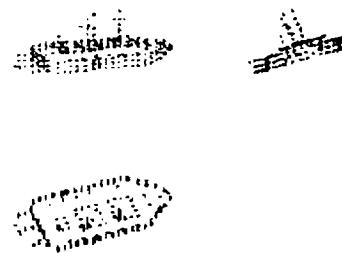


图 9 目标三视图

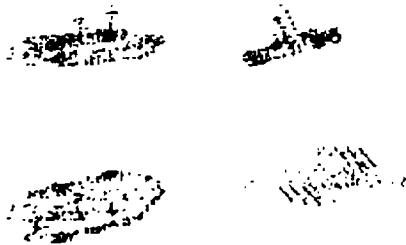


图 10 克服了角闪烁的单脉冲三维像及 ISAR 像

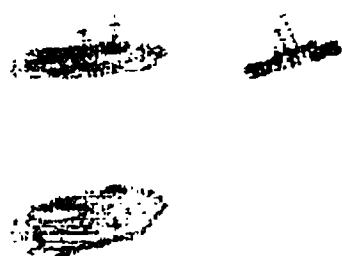


图 11 没有克服角闪烁的单脉冲三维像

5 仿真结果

我们给出一些仿真结果。假设目标以 15m/s 的速度沿 X 轴前进, 雷达距目标 5km , 以 600m/s 的速度以与 X 轴夹角 -110° , 俯冲角 20° , 向目标运动。载频波长 8mm , 信号带宽 150MHz 。纵向距离分辨率 1m 。前后颠簸、偏航、左右摇摆初始相位分别为 $\pi/2$, $\pi/4$, $\pi/5$ 。以雷达视线为 Y 轴, 水平、俯仰差波束中心连线为 X 、 Z 轴。图 9 为驱逐舰的散射点三视图, 图 10 为单脉冲三维像及 ISAR 像, 成像时间 0.064s , 角闪烁阈值 δ 取为 1 , 图 11 为不克服角闪烁时的三维像。因在 ISAR 像里提取了过多的所谓强散射点, 若不剔除角闪烁的点, 图 11 的像有一些模糊。在这个例子中没有出现测角误差非常大的散射点, 图 11

看起来似乎还可以。目标瞬时转动轴的方向不和目标的正前、正上、左右方向一致, 目标在距离-多普勒平面上的投影很难反映目标的形状信息。而单脉冲三维像和原始散射点的三维投影像基本吻合。

6 结 论

本文主要分析了舰船目标三维转动引起的多普勒频移的规律, 提出了利用解调频分离各散射点的方案。对于单脉冲测角出现的角闪烁现象, 提出了利用回波误差信号的虚部的大小来判断是否发生了角闪烁, 并给出了定量的阈值。

参 考 文 献

- [1] Wehner D R. High Resolution Radar. Boston, London: Artech House, 1994, 408-414, 435-465.
- [2] Chen C C, Andrews H C. Target-motion-induced radar imaging, IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst., 1980, AES-16(1): 2-14.
- [3] Ausherman D A, Kozma A, Walker J L, Jones H M, Poggio E C. Developments in radar imaging, IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst., 1984, AES-20(4): 363-400.
- [4] Jain A, Patel I. SAR/ISAR Imaging of a nonuniformly rotating target, IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst., 1992, AES-28(1): 317-321.
- [5] 王根原, 保铮, 孙晓兵. 基于匀加速多普勒频率模型的 ISAR 成像. 电子学报, 1997, 25(6): 58-61.
- [6] Berizzi F, Diani M. Target angular motion effects on ISAR imaging. IEE Proc.-F, 1997, 144(2): 87-96.
- [7] 保铮, 王根原, 罗琳. 逆合成孔径雷达的距离-瞬时多普勒成像方法. 电子学报, 1998, 26(12): 79-83.

THREE-DIMENSIONAL IMAGING TECHNIQUE OF SHIP TARGETS WITH MONOPULSE RADAR

Ma Changzheng Zhang Shouhong

(Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract Monopulse radar three-dimensional(3-D) images coincide with targets' size, but ISAR imaging does not hold, which is important in precision guidance. The movement character of ship targets and the Doppler frequency induced by targets' 3-D rotation are analysed, and dechirping technique to separate scatterers in coherent processing interval is proposed. For angle glint induced in angle measurement by monopulse radar, a method for processing such case is achieved. Simulation results show the high quality of monopulse 3-D images.

Key words Monopulse radar, Ship targets, Three-dimensional imaging

马长征: 男, 1967年生, 讲师, 主要从事时频分布、雷达成像、阵列信号处理等方面的研究工作。

张守宏: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 主要从事时频分布、雷达成像、阵列信号处理、高分辨信号处理等方面的研究工作。