DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2013.01.012

雷达目标三维成像算法研究

薛明华，马志扬

（北京航空航天大学电子信息工程学院，北京 100191）

摘　要：逆合成孔径雷达三维成像技术可有效揭示雷达目标散射源的空间分布；相比于传统的距离向和方位向二维成像，三维成像又增加了俯仰向的分辨能力，可以识别雷达目标高度方向的散射源分布情况。从雷达目标回波信号分析出发，探讨了三维成像的基本公式及算法。距离向分辨采用传统的 FFT（快速傅里叶变换）实现，方位向和俯仰向分辨运用卷积反投影算法实现。讨论了两种实现方位向和俯仰向成像的投影插值算法，即二维投影插值法和直接投影法，与传统的二维投影插值算法比较，直接投影法具有计算速度快和计算精度高的优点。

关键词：雷达散射截面；一维成像；二维成像；三维成像

中图分类号：TN957.52　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-2337(2013)01-0065-06

Research on Three-Dimensional Imaging Algorithm of Radar Target

XUE Ming-hua, MA Zhi-yang

(*School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing* 100191, *China*)

Abstract: Three-dimensional inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging can effectively reveal the spatial distribution of radar targets; compared with the conventional two-dimensional imaging, which only involves the resolution in range and azimuth directions, three-dimensional imaging adds the resolution in elevation direction. Based on an analysis of the echo data from radar targets, the basic formulas and algorithm of three-dimensional imaging is discussed. The range image is obtained by the traditional fast Fourier transform (FFT) algorithm, while the azimuth and elevation images are obtained by the convolution back projection (CBP) algorithm. Two algorithms for realizing azimuth and elevation projections are presented, i.e., two-dimensional projection interpolation method and direct projection method. Compared with the two-dimensional projection interpolation method, direct projection method is faster and has higher accuracy.

Key words: radar cross section (RCS); one-dimensional imaging; two-dimensional imaging; three-dimensional imaging

1　引　言

基于逆合成孔径[1]的雷达成像技术可以有效地揭示雷达目标散射源的空间分布情况；目前二维成像技术[2]已广泛应用于雷达目标探测与识别领域，距离向分辨采用 DFT 算法，方位向分辨依据目标的多普勒频移。该技术中图像的距离分辨率只与发射信号的带宽有关($\Delta X=\frac{C}{2B}$)，方位分辨率即与综合孔径角有关，也与信号波长有关($\Delta Y=\frac{\lambda}{2\theta}$)。三维成像技术是在二维成像的距离与方位两维空间分辨基础上，又增加了俯仰向的分辨能力，可以识别雷达目标高度方向的散射源分布情况。通过对雷达目标回波信号的分析，探讨实现雷达目标三维分辨的基本算法。

2　目标回波信号分析

设目标区后向散射率分布函数为 $g(x,y,z)$。目标的 RCS 分布函数 $\sigma(x,y,z)$ 与 $g(x,y,z)$ 的关系为

$$\sigma(x,y,z)=|g(x,y,z)|^2 \tag{1}$$

收稿日期：2012-08-02；修回日期：2012-09-11

式中，(x,y,z) 是目标的固定坐标系，(x',y',z') 是雷达运动坐标系(见图1)，它是(x,y,z)坐标系先绕 z 轴旋转 φ 角，再绕旋转后的 x' 轴旋转 θ 角的结果，雷达波射线方向为 y' 轴方向，雷达与(x',y',z') 坐标中心相距 R_0。其中 y' 与(x,y,z) 的关系为

$$y'=-x\cos\theta\sin\varphi+y\cos\theta\cos\varphi+z\sin\theta \tag{2}$$

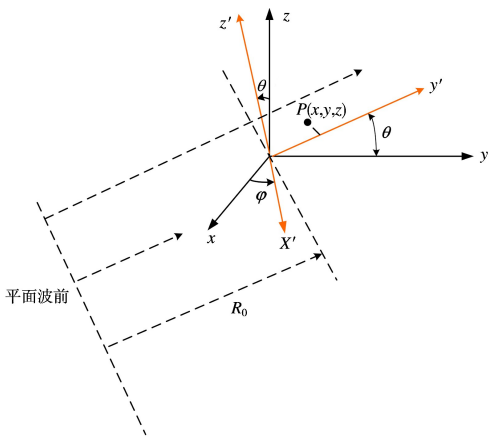


图 1 雷达基本坐标系

设雷达发射信号为 $s_i(t)$，发射角为(θ,φ)。目标区中一个点目标的回波为

$$s_{rp}(t)=g(x,y,z)s_i(t-\frac{2R}{c}) \tag{3}$$

由于目标区中处于同一距离(R) 平面上的散射点的回波信号是同时到达雷达的，所以 $R(R_0+y')$ 处回波的总响应是反射平面 s 上所有点的反射波的矢量叠加。由此可知，y' 处反射率 $g(x,y,z)$ 沿该轴的投影(见图 2) 为

$$p(y')=\int_s g(x,y;z)\mathrm{d}x'\mathrm{d}z' \tag{4}$$

y' 处投影点的回波响应为

$$s_r(t)=\iint g(x,y,z)s_i(t-\frac{2R}{c})\mathrm{d}x'\mathrm{d}z'=p(y')s_i(t-\frac{2R}{c}) \tag{5}$$

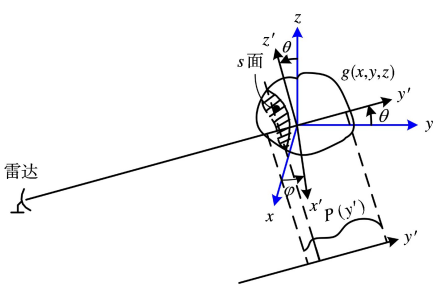


图 2 目标散射率的一维距离投影

目标区的总回波响应信号应是 y' 轴所有投影点的和。

$$s_r(t)=\iiint g(x,y,z)s_i(t-\frac{2R}{c})\mathrm{d}x'\mathrm{d}z'\mathrm{d}y' \tag{6}$$

3 三维成像基本算法

3.1 三维成像公式

已知发射信号为线性调频信号[3]，点回波响应信号是延迟 τ 的发射信号：

$$\begin{aligned}s_i(t)&=\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_0 t+k\pi t^2)}\\ s_i(t-\tau)&=\mathrm{e}^{\mathrm{j}[\omega_0(t-\tau)+k\pi(t-\tau)^2]}\end{aligned} \tag{7}$$

式中，$\tau=2R/c$，$k=B/T$。回波信号与本振混频产生中频信号：

$$s_0(t-\tau)=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{4\pi}{c}[\frac{B}{T}t+f_0)R} \tag{8}$$

令 $$\rho=\frac{4\pi}{c}(\frac{B}{T}t+f_0);\ -\frac{T}{2}\leqslant t\leqslant\frac{T}{2} \tag{9}$$

则 $$s_0(t-\tau)=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\rho R}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\rho(R_0+y')} \tag{10}$$

中频信号 $s_0(t-\tau)$ 清除了高频载波，但保留了目标特征的全部信息。所以可用 $s_0(t-\tau)$ 代替积分中的 $s_i(t-\tau)$。

$$s_r(t)=\iiint g(x,y,z)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\rho R}\mathrm{d}x'\mathrm{d}z'\mathrm{d}y' \tag{11}$$

考虑不同方位角和俯仰角的不同位置上的回波，用 $s_r(t)$ 表示三维信号已不合适，现用 $G(X,Y,Z)$ 代替。用 $\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y\,\mathrm{d}z$ 代替 $\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'\mathrm{d}z'$，上式改写为

$$G(X,Y,Z)=\iiint g(x,y,z)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\rho R}\mathrm{d}x\,\mathrm{d}z\,\mathrm{d}y \tag{12}$$

其空间分布图如图 3 所示。

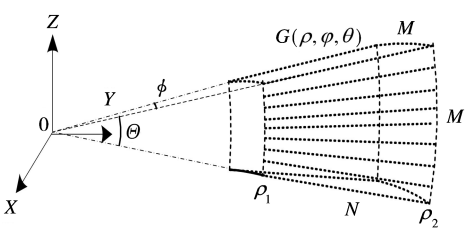


图 3 $G(X,Y,Z)$ 的空间分布图

由于 $\rho R=\rho R_0+\rho y'$

$$\rho y'=-\rho x\cos\theta\sin\varphi+\rho y\cos\theta\cos\varphi+\rho z\sin\theta=Xx+Yy+Zz \tag{13}$$

式中，$X=-\rho\cos\theta\sin\varphi$；$Y=\rho\cos\theta\cos\varphi$；$Z=\rho\sin\theta$。要注意这里 θ,φ 的取值范围与一般坐标系的定义有些区别。若不考虑 R_0 的影响，

$$G(X,Y,Z)=\iiint g(x,y,z)\mathrm{e}^{\mathrm{j}(Xx+Yy+Zz)}\mathrm{d}x\,\mathrm{d}z\,\mathrm{d}y \tag{14}$$

式中，$G(X,Y,Z)$ 是已知采样数据阵，$g(x,y,z)$ 是散射率密度分布，两者呈傅里叶变换关系。

$$g(x,y,z)=\frac{1}{(2\pi)^3}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}G(X,Y,Z)\cdot e^{j(xX+yY+zZ)}\,dX\,dY\,dZ \tag{15}$$

由于 $G(X,Y,Z)$ 是球坐标分布的数据，用直角坐标计算公式左边很不方便，因此改用球坐标表示。

三维成像依据的基本公式为

$$g(x,y,z)=\frac{1}{(2\pi)^3}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}G(\rho,\varphi,\theta)\cdot e^{j(\rho R)}\rho^2\sin\theta\,d\rho\,d\varphi\,d\theta \tag{16}$$

式中，$\rho R=\rho R_0+\rho y'=\rho R_0-\rho x\cos\theta\sin\varphi+\rho y\cos\theta\cos\varphi+\rho z\sin\theta$。

3.2　雷达目标反射率的一维距离分辨

三维成像的基本算法是距离向分辨用传统的快速傅里叶变换[4-5]，方位、俯仰两个方向用反投影算法。一维距离成像是关于 ρ 与 y' 轴的变换关系，y' 是方位和俯仰角的函数，因此对应每一[(φ_j,θ_k)；$j=1,2,\cdots,M$，$k=1,2,\cdots,M$]，都要进行 ρ 与 y' 轴的傅里叶变换，共要进行 M^2 次运算。成像公式可进一步写成：

$$g(x,y,z)=\frac{1}{(2\pi)^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\frac{1}{2\pi}\int_{\rho_1}^{\rho_2}G(\rho,\varphi,\theta)e^{j(\rho y')}\rho^2d\rho\right]\sin\theta\,d\varphi\,d\theta=\frac{1}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\Theta}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\frac{\Theta}{2}}\left\{\frac{1}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\Phi}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\frac{\Phi}{2}}\left[\frac{1}{2\pi}\int_{0}^{\rho_2-\rho_1}G(\rho,\varphi,\theta)e^{j(\rho y')}\,|\rho+\rho_1|^2d\rho\right]\cdot e^{j\rho_1 y'}\,d\varphi\right\}\sin\theta\,d\theta \tag{17}$$

式中，$\rho_1=\frac{4\pi}{c}(f_0-\frac{B}{2})$

$\rho_2=\frac{4\pi}{c}(f_0+\frac{B}{2})$

在某一(φ_j,θ_k)方向关于 y' 的散射率分布 $P_{\varphi_j,\theta_k}(y')$ 可从上式最内层积分得出：

$$P_{\varphi_j,\theta_k}(y')=\frac{1}{2\pi}\int_{0}^{\rho_2-\rho_1}G(\rho,y')e^{j(\rho y')}\,|\rho+\rho_1|^2d\rho \tag{18}$$

此时 $y'=-x\cos\theta_k\sin\varphi_j+y\cos\theta_k\cos\varphi_j+z\sin\theta_k$，隐含是$(\varphi,\theta)$的函数。

3.3　雷达目标反射率二维分布的反投影重构算法

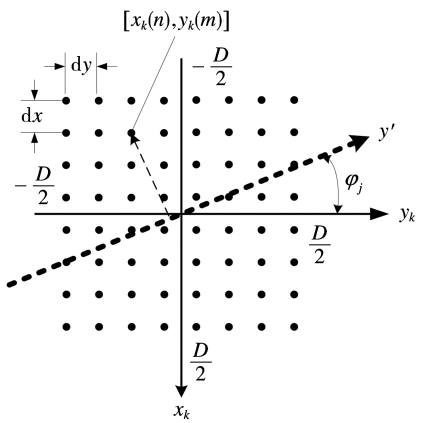
$P_{\varphi_j,\theta_k}(y')$ 代入三维表达式中，

$$g(x,y,z)=\frac{1}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\Theta}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\frac{\Theta}{2}}\left\{\frac{1}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\Phi}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\frac{\Phi}{2}}P_{\varphi_j,\theta_k}(y')\cdot e^{j\rho_1(-x\cos\theta\sin\varphi+y\cos\theta\cos\varphi)}\,d\varphi\right\}e^{j\rho_1 z\sin\theta}\sin\theta\,d\theta \tag{19}$$

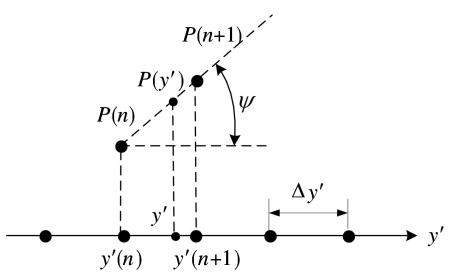
式中大扩号中的积分是关于(x_k,y_k)平面的二维散射率分布计算式，这里 x_k,y_k 是 $\theta=\theta_k$ 时的二维投影平面的坐标。

$$q(x_k,y_k)=\frac{1}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\Phi}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\frac{\Phi}{2}}P_{\varphi,\theta_k}(y')\cdot e^{j\rho_1(-x\cos\theta_k\sin\varphi+y\cos\theta_k\cos\varphi)}\,d\varphi \tag{20}$$

距离分辨后的数据是沿 y' 轴方向排列的，在 $\theta=\theta_k$ 平面上任意方位角 φ_j 的 $P_{\varphi_j,\theta_k}(y')$ 在 $[x_k(n),y_k(m)]$ 点的投影关系如图 4 所示。由于二维成像方位向反投影是在 θ_k 平面进行的，即 $\theta_k=0$。此时投影轴 $y'=-x_k\sin\varphi_j+y_k\cos\varphi_j$。



(a)　投影轴 y' 与 $\theta=\theta_k$ 成像平面



(b)　$P_{\varphi_j,\theta_k}(y')$ 的线性插值

图 4　投影数据的方位向插值

由于 $P_{\varphi_j,\theta_k}(y')$ 是 y' 轴上的离散点，而(x_k,y_k)是成像区平均等分的坐标点，当 $P_{\varphi_j,\theta_k}(y')$ 反投到(x_k,y_k)时，很难满足两者有一一对应的关系，所以需要对 $P_{\varphi_j,\theta_k}(y')$ 进行插值。线性插值的表达式如下：

$$\mathrm{tg}\psi=\frac{P_j(n+1)-P_j(n)}{\Delta y'}$$
$$P_j(y')=P_j(n)+\mathrm{tg}\psi(y'-y'(n)) \tag{21}$$

$P_j(y')$ 是方位角 φ_j 时对 (x_k,y_k) 的投影值。对点 (x_k,y_k) 的总方位孔径角 Φ 的投影值：

$$q(x_k,y_k)=\sum_{j=1}^{M_\varphi}P_j(y') \tag{22}$$

3.4 目标反射率三维分布数据的计算

二维散射率分布函数 $q(x_k,y_k)$ 是俯仰角 θ 的函数，不同的 θ_k 有不同的二维分布图，共有 M 个二维图(见图 5)，其中包括 $\theta=0°$ 的 $(x,0,y)$ 平面的分布图(广泛使用的二维图)。这些图在每个 θ_k 所对应的 (x_k,o,y_k) 平面已经完成两维分辨。尤其是目标的横向 $(x=x_k)$ 距离在每个平面上都是统一的，而 y_k,z_k 是与 θ_k 有关的量，它们与 $(y,0,z)$ 坐标系的关系为转轴关系。

$$y_k=y\cos\theta+z\sin\theta$$
$$z_k=-y\sin\theta+z\cos\theta$$

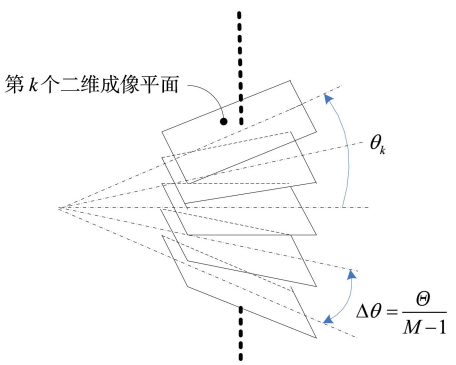
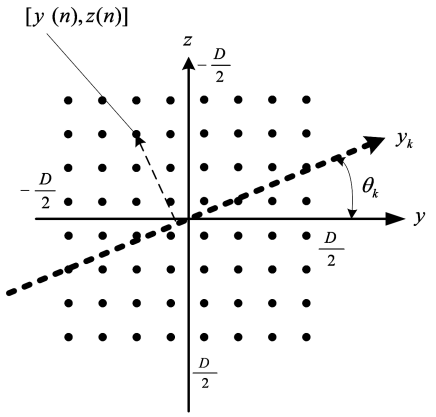


图 5 M 个二维成像平面以等角度间隔在空间的分布

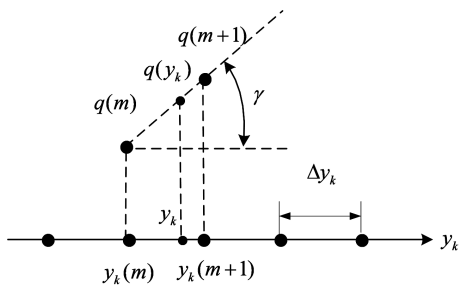
不同 θ_k 对应的二维数据中包含着目标俯仰方向的相位信息，即多普勒频率信息，因此可依据 M 个不同俯仰角 θ_k 平面的二维数据进行三维分辨[6-7]。y_k 是 θ_k 有关的投影轴。

$$g(x,y,z)=\frac{1}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\Theta}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\frac{\Theta}{2}}q(x_k,y_k)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\rho_1 z\sin\theta}\sin\theta\,\mathrm{d}\theta \tag{23}$$

三维投影是在 $x=$常数的 (y,z) 平面上进行的，目标的横坐标在二维投影时已确定，三维投影最终确定横坐标和高度坐标。对每一个 (y,z) 平面上的点 $[y(n),z(n)]$，在俯仰孔径角 Θ 内，要进行 M_θ 次投影计算(如同上一节方位向插值方法如图 6 所示)。在总方位角 Φ 内共有 M_φ 个平面要进行三维投影，因此三维成像(不考虑距离分辨的时间)总投影时间是单个二维成像的 $(M_\theta\times M_\varphi)$ 倍。



(a) 投影轴 y_k 与 $\varphi=\varphi_j$ 成像平面



(b) $q_{\varphi_j,\theta_k}(y_k)$ 的线性插值

图 6 投影数据的俯仰向插值

4 三维成像直接投影算法讨论

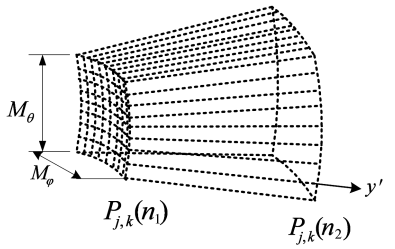
以上讨论了先进行方位向的投影(或聚焦)取得目标区 M_θ 个二维分辨平面，这些平面完成了横向(x 轴)分辨，再由这些平面进行 M_φ 次俯仰向投影实现另外两维分辨。两次投影是分开进行，从原理上分析，投影次序可互换。

能否由一维(纵向距离)分辨后得到的三维数据直接完成另外两维空间的距离分辨，下面进行讨论。

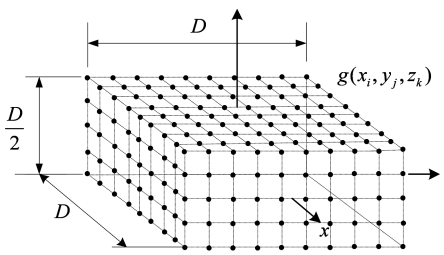
$g(x,y,z)$ 在空间的分点坐标为 $g(128,128,64)$(见图 7)，考虑运算量太大，只计算 $g(64,64,32)$，然后插值到 $g(128,128,64)$。

将三维成像公式离散化：

$$g(x,y,z)=\frac{1}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\Theta}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\frac{\Theta}{2}}\frac{1}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\Phi}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\frac{\Phi}{2}}P_{\varphi_j,\theta_k}(y')\mathrm{e}^{\mathrm{j}\rho_1 y'}\sin\theta\,\mathrm{d}\varphi\,\mathrm{d}\theta=$$
$$\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2\sum_{k=1}^{M_\theta}\sum_{j=1}^{M_\varphi}P_{\varphi_j,\theta_k}(y')\sin\theta_k\cdot$$
$$\mathrm{e}^{\mathrm{j}\rho_1(-x\cos\theta_k\sin\varphi_j+y\cos\theta_k\cos\varphi_j+z\sin\theta_k)}\Delta\theta\Delta\varphi \tag{24}$$



(a)　截取目标区后一维散射率数据分布图



(b)　三维成像区目标点分布图

图 7　散射率离散数据的空间分布

(φ_j,θ_k) 是入射波方向。

$$\varphi_j=\frac{\pi}{2}-\frac{\Phi}{2}+(j-1)\Delta\varphi,\ j=1,2,\cdots,M_\varphi$$
$$\theta_k=\frac{\pi}{2}-\frac{\Theta}{2}+(j-1)\Delta\theta,\ k=1,2,\cdots,M_\theta \tag{25}$$

(x,y,z) 是目标点的坐标,取值范围:$(D,D,\frac{D}{2})$,$\Delta x=\frac{D}{63}$,$\Delta y=\Delta z=\Delta x$。

$$x=-\frac{D}{2}+(l-1)\Delta x,\ l=1,2,\cdots,64$$
$$y=-\frac{D}{2}+(m-1)\Delta y,\ m=1,2,\cdots,64 \tag{26}$$
$$z=-\frac{D}{4}+(n-1)\Delta z,\ n=1,2,\cdots,32$$

目标点的投影、插值过程类似于二维过程,不同的是在三维空间进行。设(x,y,z)是目标空间任意点,该点三维散射率$g(x,y,z)$的投影过程简述如下:

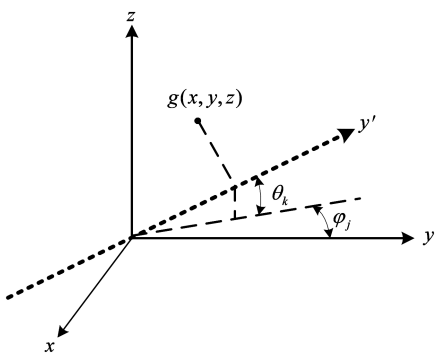


图 8　三维散射率 $g(x,y,z)$ 的投影坐标

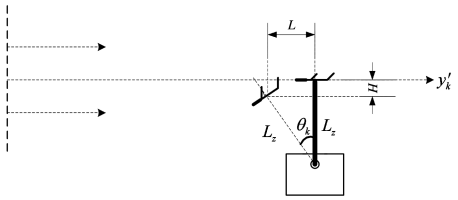


图 9　转台俯仰成像时目标的位移

(1) 确定方位、孔径角

$$\varphi_j=\frac{\pi}{2}-\frac{\Phi}{2}+(j-1)\Delta\varphi,\ j=1,2,\cdots,M_\varphi$$
$$\theta_k=\frac{\pi}{2}-\frac{\Theta}{2}+(j-1)\Delta\theta,\ k=1,2,\cdots,M_\theta \tag{27}$$

(2) 计算该入射方向 $g(x,y,z)$ 的投影位置

由 $y'=R_0-x\cos\theta_k\sin\varphi_j+y\cos\theta_k\cos\varphi_j+z\sin\theta_k$,计算投影点:$n=\frac{y'}{\Delta y'}$,$\Delta y'$ 是 $P_{j,k}(n)$ 的点距离间隔,$\Delta y'=\frac{c}{2Bk}$。

(3) 计算插值 $P_{\varphi_j,\theta_k}(y')$

$$\mathrm{tg}\psi=\frac{P_{j,k}(n+1)-P_{j,k}(n)}{\Delta y'}$$
$$P_{j,k}(y')=P_{j,k}(n)+\mathrm{tg}\psi(y'-y'(n))$$

(4) 在$[-\frac{\Phi}{2},\frac{\Phi}{2}]$,$[-\frac{\Theta}{2},\frac{\Theta}{2}]$孔径内进行 $M_\theta\times M_\varphi$ 次上述过程,并将投影结果叠加。

$$g(x,y,z)=(\frac{1}{2\pi})^2\sum_{k=1}^{M_\theta}\sum_{j=1}^{M_\varphi}P_{j,k}(y')\sin\theta_k\cdot$$
$$\mathrm{e}^{\mathrm{j}\rho_1(-x\cos\theta_k\sin\varphi_j+y\cos\theta_k\cos\varphi_j+z\sin\theta_k)}\Delta\theta\Delta\varphi \tag{28}$$

(5) 按照上述过程,重复计算$(D,D,\frac{D}{2}$ 内的每一空间点的 $g(x,y,z)$。形成矩阵 $g(64,64,32)$,再线性插值到 $g(128,128,64)$。

(6) 取平方、取对数得到 RCS 空间分布值。

$$A(128,128,64)=10\log[g(128,128,64)] \tag{29}$$

根据计算的结果就可以绘制出雷达目标的空间分布图。

5　结束语

直接从一维像数据进行三维投影成像算法只进行一次插值,与传统的两次二维插值算法比较,具有计算速度快和计算精度高的优点。三维成像工程实现的困难在于俯仰方向综合孔径的补偿问题。一般来说转台方位成像是比较理想的情况,

目标相位中心位于转台中心。但在俯仰方向，目标的相位中心不易确定，因为目标装在支架上，转台俯仰轴中心与目标相位中心不重合（如图 10 所示），有高度差 H，也有纵向平移 L，而且两者随 θ_k 变化；必须对位移引起的相位误差进行修正处理。

参考文献：

[1] Dike G, Wallenberg R, Lane M. Principles Inverse Aperture Radar Imaging[C]// IEEE International Radar Conference, USA:[s. n.], 1980.

[2] Mensa D L. High Resolution Radar Imaging[M]. Dedham, MA:Artech House, 1981.

[3] 皮亦鸣，杨建宇，付毓生，等. 合成孔径雷达成像原理[M]. 成都：电子科技大学出版社，2007.

[4] Oppenheim A V, Schafer R W. Discrete-Time Signal Processing[M]. New Jersey:Printice Hall Inc, 1989.

[5] 沈姗姗，陆锦辉，顾苏. 单目标一维成像及特征提取方法性能分析[J]. 雷达科学与技术，2011，9(5)：420-424.
SHEN Shan-shan, LU Jing-hui, GU Su. One-Dimensional Imaging of Single Target and Performance Analysis of Target Feature Extraction Methods[J]. Radar Science and Technology, 2011, 9(5):420-424. (in Chinese)

[6] Hu Weidong, Li Cheng, Sun Houjun, et al. Interferometric ISAR Imaging for RCS and Three-Dimensional Target Characteristics Measurements[C]// IEEE International Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics(ICMTCE), Beijing, China:[s. n.], 2009:145-148.

[7] Wang Weili, Zhang Shunsheng, Kong Lingkun. Three-Demensional ISAR Imaging Based on DCFT[C]// 2011 IEEE CIE International Conference on Radar, Chengdu, China:[s. n.], 2011:685-687.

作者简介：

薛明华 男，1953 年生，北京人，北京航空航天大学电子信息工程学院教授，主要研究方向为微波毫米波成像及散射辐射测量技术、射频仿真技术。E-mail:buaa_emlab@263.net

马志扬 男，1988 年生，河北人，北京航空航天大学硕士研究生，主要研究方向为射频电路、RCS 测量技术。

（上接第 64 页）

LUO Huan, CHEN Jian-wen, ZHAO Zhi-guo, et al. Ship Target Detection in Over-the-Horizon Radar Based on Signal Block Matrix[J]. Radar Science and Technology, 2011, 9(2):160-165. (in Chinese)

[11] Olkin J A, Nowlin W C, Barnum J R. Detection of Ships Using OTH Radar with Short Integration Times[C]// IEEE National Radar Conference, Syracuse, NY:[s. n.], 1997:1-6.

[12] 赵宏钟，付强，周剑雄. 雷达信号的加速度分辨力分析及应用[J]. 电子学报，2003，31(6)：958-960.

[13] Bao Zheng, Wang Genyuan, Luo Lin. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging of Maneuvering Targets[J]. Optical Engineering, 1998, 37(5):1582-1588.

[14] 梁毅，周峰，邢孟道，等. 采用调频连续波的高速动目标检测方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版)，2008，35(4)：586-591.

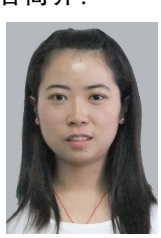
[15] 周浩，文必洋，吴世才，等. 基于时频分析的高频雷达目标检测与定向[J]. 电子学报，2005，33(12)：2265-2268.

[16] Nohara T J, Haykin S. AR-Based Growler Detection in Sea Clutter[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41(3):1259-1271.

[17] Wood J C, Barry D T. Radon Transformation of Time-Frequency Distributions for Analysis of Multicomponent Signals[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1994, 42(11):3166-3177.

[18] 陈国良，王煦法. 遗传算法及其应用[M]. 北京：人民邮电出版社，1996.

作者简介：



戴文娟 女，1988 年生，安徽金寨人，硕士研究生，研究方向为天波雷达信号处理。E-mail:568167791@qq.com