

# 毫米波雷达的高分辨力成像

樊正芳 许小剑 赵素

(国家航天局第二研究院北京环境特性研究所, 北京, 100854)

**摘要** 介绍了宽带相干毫米波雷达测量系统的特点, 阐述了目标高分辨力成像原理及毫米波雷达高分辨力成像的 4 种算法, 并对其成像算法的性能进行了比较, 给出了成像实验结果.

**关键词** 毫米波, 雷达, 目标, 成像, 高分辨力.

## 引言

由于高分辨力微波成像能清晰观察到目标散射中心的分布情况, 为雷达目标电磁散射机理研究和散射特征控制等提供了重要的研究手段, 因此, 受到国内外广泛的重视. 随着工艺水平的提高, 毫米波技术近 10 年来得到了迅速的发展, 我所利用目前国内的毫米波器件, 成功地研制了宽带相干高分辨力毫米波测量雷达系统, 并用该系统开展了对飞机等目标的高分辨力毫米波成像研究, 取得了满意的结果.

本文介绍该系统的特点和目标高分辨力成像原理, 讨论了毫米波雷达高分辨力成像的 4 种算法, 并对其成像算法的性能进行了比较.

## 1 毫米波雷达测量系统

宽带相干毫米波测量雷达的系统框图如图 1 所示. 该测量雷达是全相干的, 高频系统由毫米波参考源回路、本振回路和发射回路等 3 个锁相回路构成, 发射信号带宽为 1000 MHz, 标称距离分辨力为 0.15 m, 以阶跃变频连续波为主波形. 接收机可同时接收水平极化和垂直极化 (或者左圆 / 右圆极化) 两个正交通道的信号, 并分别进行 I/Q 鉴相, 实现对雷达目标回波的幅度和相位测量, 系统主要性能指标如下: 工作频段为  $K_a$  波段, 发射信号带宽为 1.0 GHz, 发射输出功率为 1000 mW, 发射信号型式为阶跃变频连续波, 天线极化形式有水平 / 垂直和左圆 / 右圆, 极化隔离度  $\geq 30$  dB, 接收机型式为极化双通道和 I、Q 双通道相干接收机, 接收机灵敏度为  $-100$  dBm, 接收机线性动态范围  $\geq 70$  dB, 幅度测量精度优于 1 dB, 相位测量精度优于  $10^\circ$ .

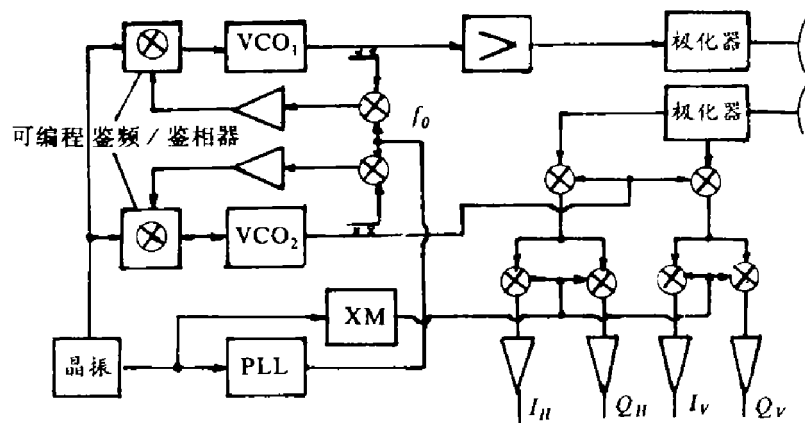


图 1 毫米波测量雷达系统框图

Fig. 1 Block diagram of wide-band coherent MMW radar system

## 2 成像原理

### 2.1 成像原理

根据基本电磁理论, 如果满足物理光学和 Born 近似条件, 在不同频率和不同目标姿态角下测量目标的单站或双站散射场, 可以获得目标散射函数  $f(\vec{r})$  的傅里叶谱  $F(\vec{p})$ , 此处  $\vec{p}$  和  $\vec{r}$  分别为傅里叶空间和目标空间的三维向量. 由于测量系统的带通特性、高频特性以及观测方位角窗口的有限性, 实际测量中所能获得的傅里叶空间谱数据  $F(\vec{p})$  必然是高频区的有限谱扩展. 在高频区, 目标散射函数  $f(\vec{r})$  可以简单解释为目标对测量有贡献的那些散射中心的三维几何分布与强度 (RCS) 分布. 因此, 从测量谱  $F(\vec{p})$  重建的是受衍射和噪声限制的目标散射函数  $f(\vec{r})$ , 其图像表现为目标多散射中心的图像.

目标散射中心的高分辨力成像是基于距离-多普勒分辨原理. 在目标散射中心成像中, 通常由转台目标旋转成像来实现. 常规处理时, 成像的标称径向和横向距离分辨力分别为

$$\delta_y = \frac{c}{2B}, \quad (1)$$

$$\delta_r = \frac{\lambda}{2\theta}, \quad (2)$$

式中  $B$  为雷达带宽,  $c$  为光速,  $\lambda$  为雷达中心波长,  $\theta$  为目标总转角.

### 2.2 基本成像公式

对一刚性旋转目标进行成像测量时, 在极坐标下 ( $x = r \cos \varphi, y = r \sin \varphi$ ), 目标的回波信号数学表达式可表示为<sup>[1]</sup>:

$$F(k, \theta) = \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} f(r, \varphi) \exp\{-j2\pi kL\} r dr d\varphi. \quad (3)$$

式 (3) 中  $F(k, \theta)$  为目标回波,  $f(r, \varphi)$  为目标二维散射函数,

$$L = \sqrt{R_0^2 + y^2 + 2rR_0 \sin(\varphi - \theta) - R_0} \quad (4)$$

当满足远场测量条件, 即  $R_0 \gg r$  时, 则有:

$$L \approx r \sin(\varphi - \theta), \quad (5)$$

根据式 (3), 以极坐标表达的目标图像再现公式为

$$\hat{f}(r, \varphi) = \int_{-\theta/2}^{+\theta/2} \int_{k_1}^{k_2} F(k, \theta) k \exp\{j2\pi k L\} dk d\theta, \quad (6)$$

以此类推根据成像公式 (4)~(6) 可设计出其它各种图像再现算法的公式.

### 2.3 频率与角度采样间隔

在实际测量系统中, 阶跃变频与目标旋转角度测量均是以离散的形式采样的, 为了讨论方便, 以下算法表达式中采用的是上述成像公式所采用的连续积分形式, 其采样间隔必须满足采样定理, 以免产生距离混迭.

由于是连续波系统, 为了不产生径向距离混迭, 对应的阶跃变频间隔  $\Delta f$  应满足

$$\Delta f \leq \frac{c}{4R_{\max}}, \quad (7)$$

式 (7) 中  $R_{\max}$  为目标最大距离,  $c$  为传播速度.

为了避免在目标横向距离上产生混迭, 要求方位角采样间隔  $\Delta\theta$  满足

$$\Delta\theta \leq \frac{\lambda_{\min}}{2D}, \quad (8)$$

式 (8) 中  $D$  为目标大小,  $\lambda_{\min}$  为最小雷达波长.

## 3 成像算法

目前已研究了以下 4 种成像算法<sup>[2]</sup>: 两维傅里叶变换法、滤波-逆投影法、最大熵法和人工神经网络混合算法等. 其中两维傅里叶变换法是最经典的算法, 滤波-逆投影法适用于近场测量成像, 因为其算法的数学式中包含了近场修正因子, 以上两者具有常规高分辨力; 最大熵法和人工神经网络混合算法均为非线性算法, 两者都具有超分辨能力.

### 3.1 两维傅里叶变换算法

旋转目标成像所采集到的目标数据是极坐标格式 (环形谱域) 数据. 两维快速傅里叶变换 (FFT) 图像再现算法是在两维直角坐标网格下实现的, 这就要求在图像再现前, 必须先把环形谱域成像数据依照成像测量几何关系用二维插值器插值到 FFT 所要求的直角坐标网格上, 然后由式 (9) 完成图像再现, 即:

第一步: 2-D 插值

$$\begin{array}{ccc}
 F(k, \theta) & \xrightarrow{2-D \text{ 插值}} & F(k_x, k_y) \\
 F(k_1, k_2) & & (k_{y_1}, k_{y_2}) \\
 (-\theta/2, +\theta/2) & & (k_{x_1}, k_{x_2})
 \end{array}$$

第二步: 2-D FFT

$$f(x, y) = \int_{k_{x_1}}^{k_{x_2}} \int_{k_{y_1}}^{k_{y_2}} F(k_x, k_y) \exp\{j2\pi(k_y y - k_x x)\} dk_y dk_x. \quad (9)$$

当成像转角  $\Delta\theta$  较小, 且为远场、单站测量状态时, 插值这一步常可省略, 从而可用 2-D FFT 算法实现快速成像.

### 3.2 滤波-逆投影算法

滤波-逆投影算法可直接用极坐标格式数据再现目标图像. 用滤波-逆投影算法实现图像再现式 (6) 时可表示为

$$\left. \begin{aligned}
 P(\theta, L) &= \int_0^{k_2-k_1} |k+k_1| F(k+k_1, \theta) \exp\{j2\pi kL\} dk, \\
 f(r, \varphi) &= \int_{-\theta/2}^{+\theta/2} P(\theta, L) \exp\{j2\pi k_1 L\} d\theta;
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式 (10) 中  $L$  由式 (4) 或式 (5) 决定.

用滤波-逆投影法可实现目标精密成像且易于完成近场-远场修正, 特别适合于对目标散射中心作精密诊断的成像处理.

### 3.3 最大熵法

最大熵法在离散时间序列的高分辨力功率谱估计中得到了广泛的应用. 特别是当序列较短时, 通过对序列的外推扩展, 可以获得比经典的谱更高的分辨力. 由于在微波成像中, 对目标的二维分辨力取决于频谱窗口和方位窗口的大小. 当雷达带宽较窄或者旋转方位角窗口较小时, 图像的分辨力将急骤变差. 因此, 若用最大熵线性预测法对成像测量数据进行谱外推, 然后根据谱外推后的数据完成图像再现, 便有可能从较少的测量数据中获得高分辨力的微波图像. 最大熵再现算法的具体实现可见文献 [2], 其主要步骤如下:

(1) 用 Burg 算法对成像测量数据作频率-方位角二维谱外推;

(2) 用滤波-逆投影算法对谱外推前后的数据分别作图像再现, 得到原始图像和最大熵图像;

(3) 根据原始图像提供的目标粗略“形状”信息, 对最大熵图像作旁瓣抑制处理, 最终完成图像再现.

### 3.4 人工神经网络处理的混合算法

在实际应用中, 通常要对小角度旋转目标成像. 此时, 若用最大熵作二维成像处理, 通常频率采样点数较大, 径向维的线性预测模型的阶数可以选得比较高, 故预测误差很小; 而方位角维的样本数一般较少, 其线性预测模型的阶数也只能选得较小, 因而产生大的预测误差, 这种误差是引起分辨力变差和图象旁瓣电平升高的主要原因. 为了克服上述缺点,

可采用径向维谱外推与横向维神经网络处理相结合的混合成像处理技术. 该成像算法的具体实现见文献 [2, 3] 其主要步骤为:

- (1) 用线性预测对每个方位角下的一组频率采样数据进行一维谱外推, 再作傅里叶变换, 从而获得径向距离维的超分辨力;
- (2) 求出各横向距离单元的散射中心幅度和相位的最小均方误差估计值;
- (3) 用 Hopfield 神经网络模型找出目标横向上各散射中心的位置;
- (4) 根据神经网络输出的散射中心位置值, 由图像再现式重新求解各散射中心的幅度和相位值, 从而最终完成二维超分辨的图像再现.

## 4 实验结果

对某飞机模型成像见图 2 的实例. 其测试条件为: 雷达工作频段为  $K_a$  波段, 信号带宽为 1.0 GHz, 目标总转角为  $3^\circ$ , 角度采样间隔为  $0.1^\circ$ , 采用垂直极化波照射, 接收目标的同极化和交叉极化散射场分量, 并用滤波-逆投影法重建目标的同极化 (见图 2(a)) 和交叉极化 (见图 2(b)) 图像. 由于成像系统可以对目标的同极化和交叉极化散射分量进行测量, 因而可采用极化图像增强技术. 一般地, 极化图像增强则可将与散射矩阵 4 个分量中的每一个相对应的傅里叶谱形成之图像强度相加. 作为图像增强的另一种手段, 还可进行目标对称性图像增强, 因为成像雷达所感兴趣的人造目标通常都具有轴向对称性, 且其对称面可从目标的航向中导出. 经过极化增强和对称性增强的图像分别见图 2(c) 和图 2(d).

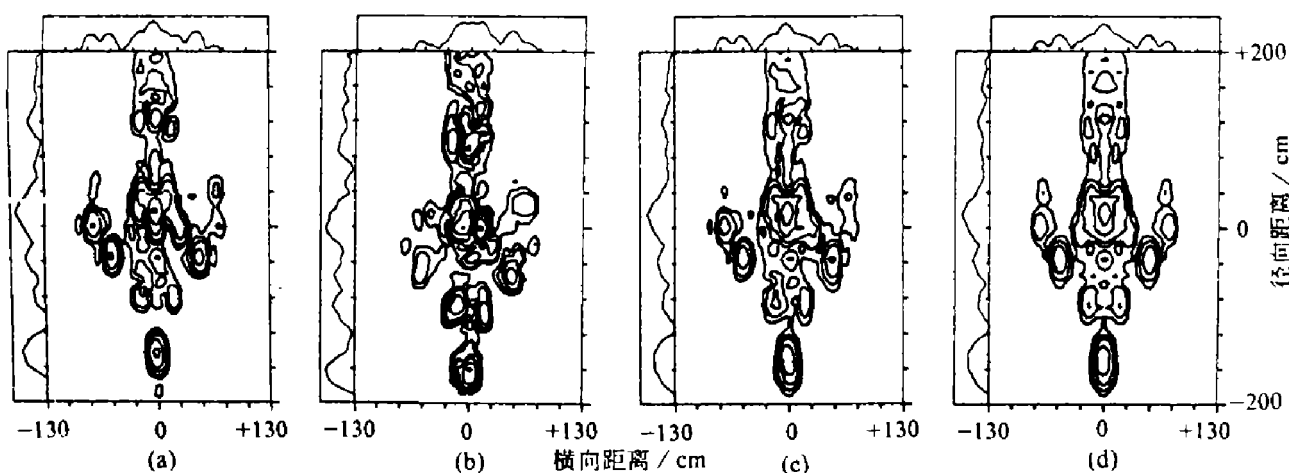


图 2 飞机模型的高分辨力成像图

(a) V-V 极化; (b) V-H 极化; (c) 极化增强; (d) 对称性增强

Fig. 2 High-resolution imaging on plane model

(a) V-V polarization; (b) V-H polarization;

(c) polarization enhancement; (d) symmetry enhancement

根据相同测量数据, 用滤波-逆投影算法 (此处目标转角很小, 2-D FFT 法的结果与滤波-逆投影法基本一样, 限于篇幅, 未予给出)、最大熵法和神经网络混合处理 3 种成像算法重建了图像, 并进行了比较 (见图 3), 从图 3 中可以看出超分辨力成像算法的

良好效果.

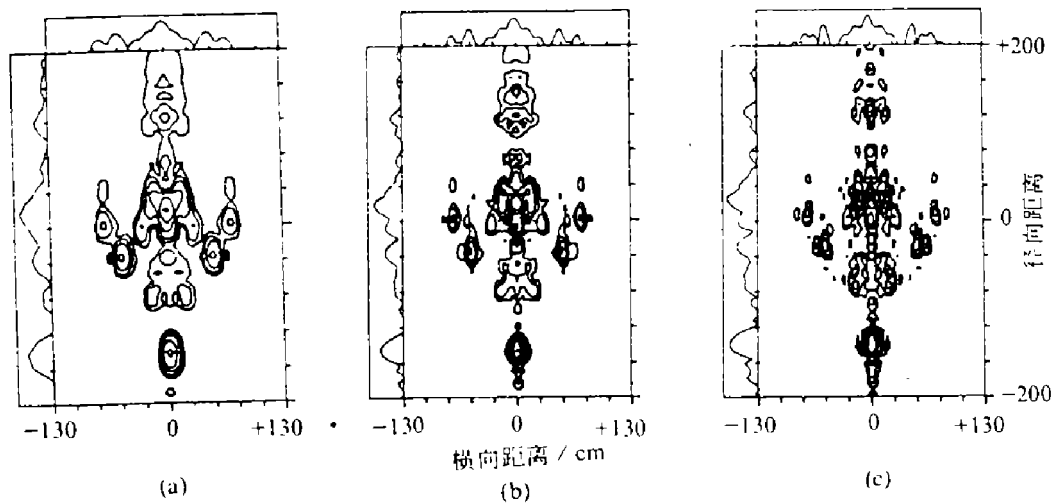


图3 三种不同成像算法的重建图像

(a) 滤波-逆投影法; (b) 最大熵法; (c) 人工神经网络混合算法

Fig. 3 The reconstructed images for three algorithms

(a) filtered-back projection algorithm; (b) maximum entropy;  
(c) hybrid artificial neural network algorithm

#### 参考文献

- 1 黄培康, 等. 电子学报, 1992, (6): 54~60
- 2 许小剑, 黄培康. 宇航学报, 1993, (4): 1~7
- 3 Xu Xiaojian, Huang Peikang. *Super-resolution techniques with application to microwave imaging, Proc. of Radar'92*. London, 1992

## HIGH RESOLUTION IMAGING WITH WIDEBAND MILLIMETER-WAVE RADAR

Fan Zhengfang Xu Xiaojian Zhao Su

(Beijing Institute of Environmental Features,  
The Second Academy, National Space Bureau, Beijing 100854, China)

**Abstract** The framework and technical specifications of a wideband coherent millimeter wave radar being newly developed in the Beijing Institute of Environmental Features, are introduced. The principle of high resolution imaging is reviewed. Four imaging algorithms are discussed and their performances compared. Experimental results of imaging on a model aircraft are presented.

**Key words** millimeter wave, radar, target, imaging, high resolution.