

# 基于优化技术的 ISAR 成像运动补偿

孙光民

(北京工业大学电子工程系, 北京, 100022)

刘国岁、周德全

(南京理工大学电子工程系, 江苏, 南京, 210014)

TV 215.01

**摘要** 给出一种基于优化技术的运动补偿方法, 通过对运动目标的径向非匀速运动引起的时变的非线性相位误差及非匀速转动引起的转角不均匀进行补偿, 从而获得了理想的高分辨目标二维像。本文用这种优化补偿方法对外场实测的飞机回波数据进行了成像实验, 成像结果表明, 目标二维像聚焦良好, 与传统的运动补偿方法相比, 成像质量明显得到改善。

**关键词** 运动补偿, 最优化技术, ISAR 成像。

红外成像

## 引言

ISAR 成像质量的好坏在很大程度上取决于运动补偿, 所谓运动补偿就是要消除目标运动对成像的影响。对于飞机一类的运动目标, 由于目标的非合作运动, 其运动参数很难精确测定, 所以给运动补偿带来很大困难。尤其是目标的径向非匀速运动所带来的时变的高阶非线性相位误差, 可使图像发生模糊甚至畸变。另外, 尽管转动分量用于横向成像, 但对基于 FFT 的距离-多普勒成像方法来说<sup>[1]</sup>, 必须满足转角采样间隔近似均匀的条件, 由于飞机目标运动的机动性, 其转动分量是非匀速转动, 因此, 对于各重复周期回波来说, 在相同时间间隔内, 目标转过的角度不同, 从而引起转角采样间隔非均匀, 导致图像散焦, 质量变差。用传统的运动补偿方法对以上两种影响进行补偿, 效果均不理想, 为此, 本文采用优化技术对运动目标的径向非匀速运动及转角采样间隔不均匀进行补偿, 获得了令人满意的结果。本文提出的优化方法主要解决径向非匀速运动所引起的相位误差及非匀速转动所引起的转角采样间隔不均匀对成像的影响, 优化补偿是针对原始回波数据进行的, 并且所采用的回波信号是经过时频转换技术处理的脉冲线性调频信号。优化方法采用单纯形搜索法, 优化评价函数采用图像熵测度函数。

## 1 评价函数及优化方法的确定

对于任何优化问题, 都必须设计一个评价函数  $S(X)$ ,  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$ , 在一定的约束条件下, 通过一种最优搜索方案, 在可行解空间中进行搜索, 以找到最优解  $X^*$ , 使评价函数  $S(X)$  在  $X^*$  处达到最小。

对于 ISAR 运动补偿问题来说, 由于目标的运动参数无法精确测定, 所以采用最优化方

法,在一定的范围内对目标的运动参数进行搜索,从而得到目标实际运动参数的最优估计,用这组估计参数对目标回波进行运动补偿,便可获得聚焦良好的目标二维像.<sup>[2,3]</sup>目标二维像聚焦越好,说明运动参数的估计越精确,因此,我们选择能衡量二维像聚焦好坏的图像熵测度函数作为评价函数<sup>[4]</sup>,其定义为:

$$S = \sum_m \sum_n I_{mn} \exp(1 - I_{mn}), \quad (1)$$

式(1)中  $I_{mn}$  为二维像中第  $m$  行  $n$  列分辨单元的散射强度对所有分辨单元散射强度之和归一化的值:

$$I_{mn} = \frac{g_{mn}}{\sum_m \sum_n g_{mn}}, m = 1, 2, \dots, L; n = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

式(2)中  $g_{mn}$  为目标二维像中第  $m$  行  $n$  列分辨单元的散射强度(或称为像素).

文献[4]证明了图像熵测度函数  $S$  为凸函数,因此在解空间中不存在局部极小点,唯一的极小点即为全局最小点,所以只要求得函数  $S$  的极小点,便可认为得到了最优解.

在最优化方法中,如果评价函数有明显的数学表达式,则可用微分法和变分法等数学分析方法来求解,但对于评价函数无法用表达式明确表示时,则只能用数值解法直接求解.我们采用优化技术进行运动补偿,评价函数选为图像熵测度函数,它是通过数值计算而得到的,因此我们采用直接法进行求解,由于对各种直接法来说,运算效率都差不多,而且在我们所求解的问题中,假定待估计的运动参数只有两个,所以选用较简单的单纯形寻优法,具体的优化过程分两步进行:

(1) 针对经时频转换技术处理的脉冲线性调频回波信号,假定目标径向运动的方程为:  $r = R_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ , 其中  $R_0$  为目标初始径向距离,  $v_0$  为目标初始径向速度,  $a$  为目标径向加速度,通过控制图像熵测度函数,对运动参数  $R_0$ 、 $v_0$  和  $a$  进行最优估计,并由估计的最优参数对数据进行相位补偿,以消除由目标径向非匀速运动所产生的时变的非线性相位项.

(2) 对 FFT R-D 成像方法来说,在成像之前,先要通过插值变换将极坐标格式数据变为直角坐标格式数据,由于目标的非匀速转动,各重复周期的回波数据在小扇区内为非等间隔排列的,且各点数据的确切位置未知,为此我们在插值过程中引入最优化技术,假定目标转动方程为:  $\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \beta t^2$ , 其中  $\theta_0$  为目标初始转角,  $\omega_0$  为初始角速度,  $\beta$  为角加速度.通过对图像熵测度函数寻优,完成对转动参数  $\theta_0$ 、 $\omega_0$  和  $\beta$  的最优估计,并由估计的最优参数确定数据格栅的精确位置,最后通过插值变换将非等间隔排列的极坐标数据转化为等间隔排列的直角坐标数据.

对原始回波数据一旦完成以上两个步骤的优化补偿,则可以通过沿纵横两个方向分别进行一维 FFT 运算而获得目标二维像,而且在得到一维距离像后需要进行距离对齐,以消除回波包络延迟误差.特别指出的是,本文中介绍的优化补偿方法要求相位补偿在距离对齐之前进行,原因是本方法要利用各点回波数据与时间  $t$  的严格对应关系来进行运动参数估计.通过上述各步计算,最后便可获得聚焦良好的目标二维像.<sup>[5]</sup>

## 2 径向运动引起的相位误差补偿

目标径向运动对成像产生两方面的影响,即回波包络延迟和相移,常用的运动补偿方法

一般分两步进行,首先进行距离对齐,然后再进行相位补偿,距离对齐用于消除各次回波包络延迟的影响.由于本文中介绍的优化补偿方法要利用各点回波数据与时间  $t$  的严格对应关系来进行运动参数估计,所以要求相位补偿在距离对齐之前进行,为了避免距离对齐破坏各点回波数据与时间  $t$  的严格对应关系,在寻优过程中计算图像熵测度函数时所要用的二维像,没有进行距离对齐,所以存在一定的模糊,但由于它只是临时过渡所用,对最终成像结果影响不大,距离对齐则在最后成像时完成.与相位补偿相比,距离对齐所要求的精度要低的多,因此本文中距离对齐采用传统方法进行,如散射重心法、实包络相关法等.以下讨论的优化补偿方法,主要解决相位补偿问题.

设雷达发射的线性调频脉冲信号(暂不考虑信号包络)为:

$$S_T(t) = \exp\left(j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2}kt^2\right)\right), \quad |t| \leq \frac{T}{2} \quad (3)$$

式(3)中  $f_0$  为中心频率,  $T$  为时宽,  $k=B/T$  为调频斜率,  $B$  为带宽.对于点目标,其回波信号为:

$$S_R(t) = \exp\left(j2\pi\left(f_0(t - T_R) + \frac{1}{2}k(t - T_R)^2\right)\right), \quad (4)$$

式(4)中  $T_R=2R/C$  为目标回波时延,  $R$  为目标距离,  $C$  为光速.

接收机采用时频转换(Stretch)技术,先产生一个与发射信号斜率相同的线性调频参考信号:

$$S_L(t) = \exp\left(j2\pi\left(f_0(t - T_L) + \frac{1}{2}k(t - T_L)^2\right)\right), \quad (5)$$

式(5)中  $T_L=2R_L/C$  为参考时延,  $R_L$  为系统窄带信号所测得的目标距离估计值.参考信号与回波信号进行去斜率混频后得:

$$S(t) = \exp\left\{j2\pi\left[k(T_R - T_L)t + f_0(T_R - T_L) + \frac{1}{2}k(T_L^2 - T_R^2)\right]\right\}, \quad (6)$$

由式(6)可见,假定雷达可以精确跟踪点目标,即  $T_R=T_L$ ,则上式中相位误差为零,不需要补偿,对于在径向上有多个散射点分布的目标回波,对应于各散射点,上式中  $T_R$  各不相同,但平动分量对每个散射点的作用是相同的,即目标径向运动不会改变各点的相对关系,因此,若雷达能精确跟踪目标上某个参考点,则经全去斜率混频后,由径向运动引起的相位误差仍然为零,也不需要补偿.但由于雷达窄带系统的跟踪精度远不能满足要求,而且数据率很低(每 20 个周期提供一个数据),所以  $T_L$  的存在反而使各周期回波信号中相位发生不规则跳变,给运动参数估计和相位补偿带来困难,因此,我们首先利用窄带数据将  $T_L$  抵消掉,使所需补偿的相位误差只取决于目标径向运动,然后采用优化方法对目标的实际运动参数进行估计,并完成相位补偿.消除  $T_L$  影响后的回波信号变为:

$$S(t) = \exp\left\{j2\pi\left[kT_R t + f_0 T_R - \frac{1}{2}kT_R^2\right]\right\}, \quad (7)$$

假定目标径向运动方程为:

$$r = R_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2, \quad (8)$$

由于初始距离  $R_0$  为一常数, 不失一般性, 设  $R_0 = 0$ , 则由  $r$  引起的时延为:

$$\tau = \frac{2r}{c} = \frac{2}{c} (v_0 t + \frac{1}{2} a t^2), \quad (9)$$

由式(7)和(9)便可得径向运动引起的相位误差信号为:

$$e(t) = \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} \left[ k(v_0 t + \frac{1}{2} a t^2) t + f_0(v_0 t + \frac{1}{2} a t^2) - \frac{1}{2} \cdot \frac{2k}{c} (v_0 t + \frac{1}{2} a t^2)^2 \right] \right\}, \quad (10)$$

经展开化简并忽略 4 次方以上项, 则得到对应的相位补偿因子为:

$$\zeta(t) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} \left[ f_0 v_0 t + (k v_0 + \frac{1}{2} a f_0 - \frac{1}{c} k v_0^2) t^2 + k a \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{c} v_0 \right) t^3 \right] \right\}. \quad (11)$$

所以对不同周期不同采样点的回波数据乘以对应  $t$  的  $\zeta$  值, 便可消除由径向运动引起的时变的非线性相位误差.

要想完全补偿径向运动引起的相位误差, 就必须要对目标径向运动参数进行精确估计, 本文采用单纯形法对目标径向运动参数  $v_0$  和  $a$  进行优化估计, 因为在二维空间, 单纯形可由一个三角形来表示, 所以我们首先在二维解空间  $(v_{0\min}, v_{0\max}) \cap (a_{\min}, a_{\max})$  选定三个初始顶点(三组不同的  $v_0, a$  值)组成初始单纯形, 并计算各顶点所对应的评价函数值  $S(v_0, a)$ , 从而确定所需要搜索的方向, 直到找到满足精度要求的使  $S(v_0, a)$  达到最小的  $v_0, a$  值, 便作为目标实际运动参数的最优估计. 将这组最优估计值代入式(11), 并对回波数据进行相位补偿.

### 3 转角间隔不均匀的优化插值

基于 FFT 的距离-多普勒(R-D)成像方法, 在满足一定条件下, 将二维处理近似分解为一维处理的成像方法, 因此它要求频率和转角二维采样间隔必须均匀, 另外, 由于对于频率和转角来说, 回波数据采样点处于一个小角度的扇形区域内的极坐标格栅上, 所以, 在成像前首先要进行坐标变换, 即将极坐标数据内插成直角坐标数据.

如果目标转动为匀速转动, 则经过径向和横向两次插值, 便可完成坐标变换, 但由于目标运动的机动性, 其转动为非匀速的, 且其转动参数为未知的, 因此, 将其作为等转角间隔数据进行坐标变换, 势必带来误差, 使图像质量变差. 本文在插值过程中引入最优化技术, 通过对目标转动参数进行优化估计, 将转角间隔非均匀的极坐标格式数据内插成均匀间隔的直角坐标数据, 从而获得聚焦良好的目标二维像. 设目标转动方程为:

$$\theta(t) = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \beta t^2, \quad (12)$$

为分析方便, 设  $\theta_0 = 0$ , 与上一节类似, 搜索方法采用单纯形法, 评价函数仍采用图像熵测度函数  $S$ , 通过控制评价函数  $S(\omega_0, \beta)$ , 对转动参数  $\omega_0, \beta$  进行最优估计, 并计算在所估计的转动参数条件下, 目标在各重复周期所转过的角度, 从而确定各周期回波中各点数据的实际极坐标格栅位置, 并将其内插成均匀间隔的直角坐标数据. 插值变换分为两步进行, 首先将前

面已确定位置的,在径向上处于圆弧上的各点数据,内插成按梯形网格排列的数据,第二步是沿方位向对这种非等间隔排列的数据进行插值变换,使梯形网格转换为等间隔的方形网格,最后采用 FFT R-D 成像方法对所得的直角坐标数据进行成像。

#### 4 实验结果

本文采用实测的外场数据,对三种飞机目标进行了成像实验,所采用的回波数据为我国第一部实验 ISAR 系统在外场采集的三种飞机测试数据.三种飞机目标分别为安-26 螺旋桨飞机、雅克-42 大型喷气式飞机和奖状小型喷气式飞机.图 1 为安-26 飞机的成像结果,其中(a)为采用传统的方法对回波进行运动补偿后的成像结果,(b)为采用本文提出的优化补偿方法处理后的成像结果.图 2 为雅克-42 飞机的成像结果,其中(a)为采用传统的方法对回波进行运动补偿后的成像结果,(b)为采用本文提出的优化补偿方法处理后的成像结果.从实验结果可以看出,与传统的运动补偿方法相比,成像质量得到明显改善,但对于安-26 螺旋桨飞机,螺旋桨转动使目标像在横向上产生了部分散焦,从而使成像质量受到一定的影响。

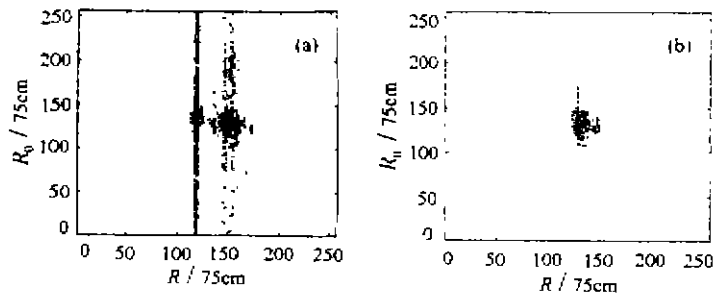


图 1 安-26 飞机成像结果

(a) 传统补偿方法 (b) 优化补偿方法

Fig. 1 Imaging results of Model An-26 airplane

(a) traditional compensation method (b) optimized compensation method

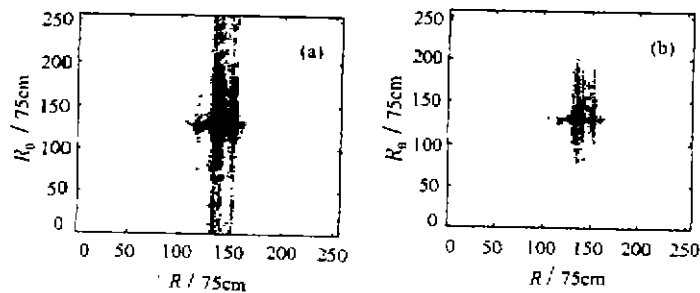


图 2 雅克-42 飞机成像结果

(a) 传统补偿方法 (b) 优化补偿方法

Fig. 2 Imaging results of Model YAK-42 airplane

(a) traditional compensation method (b) optimized compensation method

## 5 结语

本文给出一种基于优化技术的运动补偿方法,通过对运动目标的径向非匀速运动引起的时变的非线性相位误差及非匀速转动引起的转角不均匀进行补偿,从而获得了较理想的高分辨目标二维像,而且由于这种方法具有自聚焦功能,适用于具有各种复杂运动的目标成像.当然应当指出,这种方法也存在缺点,因为图像熵测度函数定义中用到二维像素,而运动补偿是针对原始数据进行的,所以在优化搜索中要多次进行二维FFT运算,运算量较大,给实时成像带来困难,这个问题可通过进一步寻找其它更合适的测度函数作评价函数加以解决.

## REFERENCES

- 1 Wehner D R. *High Resolution Radar*. Norwood: Artech House, 1987
- 2 Flores B C, Cabrera S D, Martinez A. *SPIE*, 1994, **2234**: 49-56
- 3 Berizzi F, Corsini G. *IEEE Trans. on AES*, 1996, **32**(3): 1185-1191
- 4 Flores B C, Ugarte A, Kreinovich V. *SPIE*, 1993, **1960**: 47-56
- 5 Flores B C, Ugarte A. *SPIE*, 1993, **1960**: 36-56

## OPTIMIZATION TECHNIQUES BASED MOTION COMPENSATION FOR ISAR IMAGING

SUN Guang-Min

(Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

LIU Guo-Sui ZHOU De-Quan

(Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Science  
and Technology, Nanjing, Jiangsu 210014, China)

**Abstract** A method based on the optimization techniques for the motion compensation in inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging was proposed. The approach is to minimize the measure function of image entropy, which is a measure of the degree of focus of an image, by using the optimization method that leads to an optimization estimation for the true motion parameters. The approach was developed to improve the quality of range-Doppler imagery. Some experimental imaging results obtained from realistic targets were given.

**Key words** motion compensation, optimization technique, ISAR imaging.