

机动目标的逆合成孔径雷达成像原理与算法

保 铮,孙长印,邢孟道

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室,西安 710071)

摘 要: 对于非合作的机动目标,由于目标相对于雷达射线的姿态和转速难以测定,而且是时变的,因而给逆合成孔径雷达(ISAR)成像造成较大困难.本文讨论了这种情况下成像的一般原理,并对机动性不太大,散射点子回波多普勒变化满足一阶近似条件时,提出了实用算法.实测数据的处理结果说明新算法是可行的.

关键词: 逆合成孔径雷达; 机动目标; 线性频率调制信号

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 06-0024-05

Principle and Algorithm of Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging for Maneuvering Targets

BAO Zheng, SUN Chang-yin, XING Meng-dao

(Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: Inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging of the non-cooperative maneuvering target is a challenging task due to its time-varying orientation and rotation velocity which denies accurate measuring. This paper investigates the general principles of ISAR imaging of maneuvering targets, and proposes an algorithm for application in situations when the maneuverability is not too serious and the Doppler variation of sub-echoes from scatterers can be approximated as a first order polynomial. The imaging results using real data show the effectiveness of the new method.

Key words: inverse synthetic aperture radar (ISAR); maneuvering target; LFM signal

1 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)成像近二十年来受到广泛的关注.雷达具有远距离、全天候、全天时工作的优点,通过ISAR成像作目标识别已在现代雷达中应用,但仅限于平稳目标.由于ISAR的对象一般为非合作目标,运动比较复杂,且难于准确测量,机动目标ISAR成像的运动补偿和成像处理均需进一步研究.

运动目标经平动补偿后,等效于转台目标.成像所需要的转角(即相干积累角)一般不超过 $2 \sim 3^\circ$,对不特别大的飞机一类目标,成像期间散射点越距离单元走动(MTRC)的问题可以不考虑.从而使问题大大简化,但实际目标是三维的,当作机动飞行时,其转动也是三维的,且一般作非匀速转动.经平动补偿后等效的转台目标作三维非匀速转动,成像算法较复杂.本文将系统地研究成像算法,有关运动补偿将另文讨论.

文献[3]讨论了电波为平面波条件下,视角任意改变时的雷达成像问题,目标作三维非均匀转动相当视线作相应改变,可以用该文献提出的方法为成像算法的基础.但是,由于目标是非合作的,相对于雷达视线的姿态变化难以测定,无法用确知的视线变化作成像计算.本文除讨论ISAR对机动目标的成

像原理外,还对如何用回波时序作成像处理进行了研究,并给出了实测数据的成像结果.

2 三维目标的二维成像

为了研究ISAR对三维目标的成像,先讨论一般三维物体的重构问题.设三维物体的密度函数为 $g(x, y, z)$,其傅里叶变换为波数空间的谱函数 $G(k_x, k_y, k_z)$:

$$G(k_x, k_y, k_z) = \iiint g(x, y, z) e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dx dy dz \quad (1)$$

物体重构是先设法测得其波数空间的谱函数,然后通过傅里叶反变换重构目标密度函数.如何测得波数空间的谱函数呢?根据有名的投影切片定理^[4],如图1所示,在目标空间对垂直于射线 R 作正交投影积分 $P(R)$,其傅里叶变换 $F[P(R)]$ 即波数空间沿向量方向 K 的谱分布,而 K 和 R 具有相同的空间角.

于是,若在全空间对空间角扫描,得到各个空间的正交投影切片的傅里叶变换,集中起来便构成物体的波数空间的三维谱函数.

上面介绍的方法用于雷达成像是合适的,对于远距离的小目标(如飞机、船等),照射电波的波前近似为平面,这时的

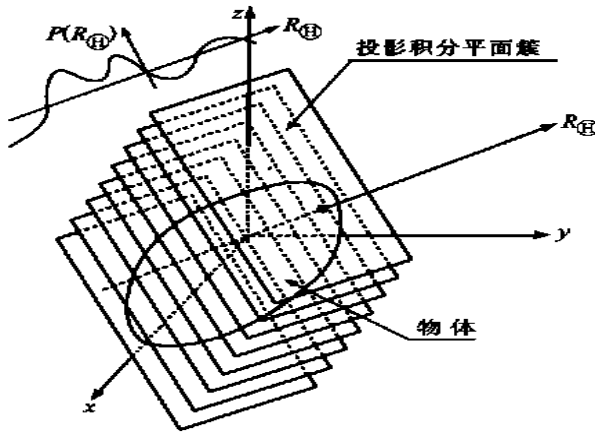


图 1 投影——切片定理

正交切片的投影积分即脉冲雷达在射线 R 方向接收回波的 距离剖面(以目标的某参考点为原点),对该距离剖面作傅里叶变换,便得到波数空间沿同样空间角 方向的向量 K 的谱分布。实际上,ISAR 常用长时宽的线调频(LFM)信号,以原点为基准建立的参考信号作解线调(dechirp)处理,便可直接得到沿向量 K 的波数谱分布。

为了获得目标的三维像,波数空间数据的支撑区应是三维的,但空间角可限于 $2 \sim 3$ 的范围里,而 K 径向支撑区的范围则由雷达信号的载频 f_c 和带宽 F 确定,其区间为 $[4 / -2 F / c, 4 / +2 F / c]$,其中 λ 为波长, c 为光速。由于实际 ISAR 信号的 $F \ll f_c$,而且成像观测期间雷达射线在 x 轴附近 $2 \sim 3$ 的空间角 里游动,所以在波数空间支撑区的范围非常接近平行于 x 轴的长方体。采用长方体近似,即在支撑区范围里,不同空间角的向量近似是平行的。

在上述长方体的近似假设下,可先对波数谱函数沿 k_x 方向作傅里叶反变换,而得到沿 x 距离的 $k_y - k_z$ 平面的谱分布,若以距离分辨单元为间隔在 x 轴上取一系列离散值,便得到各个距离单元里的 $k_y - k_z$ 谱分布。因此,可将各距离单元分别作目标在 $y - z$ 平面里的重构处理,然后再综合成目标的三维像。

ISAR 成像一般只要求得到目标的二维像,二维像是重构三维像的一个横截面。考虑到用局部波数谱 $G_l(k_x, k_y, k_z)$ 重构的目标会有所失真(甚至是大的失真,例如 $G_l(k_x, k_y, k_z)$ 限制在一个平面里,则不可能获得目标与该平面垂直方向的信息),以 $g_l(x, y, z)$ 表示之, $g_l(x, y, z)$ 在 $z=0$ 的 $x - y$ 横截面的二维像为

$$g_l(x, y, 0) = \iint G_l(k_x, k_y, k_z) dk_z e^{j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (2)$$

等式右边中括弧里为 $G_l(k_x, k_y, k_z)$ 沿 k_z 轴在 $k_x - k_y$ 平面里的积分投影,即对该积分投影作二维傅里叶反变换就可获得所需的横截面像。

由于傅里叶变换对具有旋转性质,若要得到 $g_l(x, y, z)$ 其它角度平面的横截面像,只要先计算 $G_l(k_x, k_y, k_z)$ 在相应平面的正交积分投影,则在该平面对投影所作的二维傅里叶反变换即为所需平面的横截面像。

将目标(如飞机)作机动飞行和在平面内作平稳飞行的

ISAR 成像情况作对比,当采用简单的距离-多普勒算法时,两者均可按距离分辨率单元来分析各自的横向分布,但后者只是用一维线谱分布,前者要研究它在二维谱平面里的变化。

3 分距离单元从波数谱函数重构目标图像

将目标以离散的散射点表示,则目标的波数谱函数可以表示为各散射点的线性组合。又由于响应是非空变的,只要研究一个散射点的谱函数即可。在上一节的近似条件下,已沿 x 轴分距离单元处理,只需讨论某一距离单元(即 x 为常数)的散射点,设该散射点 P 的坐标为 (y_0, z_0) $l = (r_0 \cos \theta, r_0 \sin \theta)$ 其密度函数为 $A(y - y_0, z - z_0)$,通过傅里叶变换得波数平面 $k_y - k_z$ 的谱函数为 $A \exp[-j(k_y y_0 + k_z z_0)]$,其相位函数

$$(k_y, k_z) = -(k_y y_0 + k_z z_0) \quad (3)$$

用等相位线在 $k_y - k_z$ 平

面里画出的相位函数为一组平行线(图 2),其垂线的倾角即散射点位置向量的倾角,而平行线的间距与位置向量的模成反比。

实际 ISAR 测得的谱函数的支撑区不可能是整个波数平面,而仅仅是图 2 单个散射波数函数的相位函数雷达射线扫过的扫描线(图 2),设该扫描线方程为 $k_z = f_r(k_y)$,而

$$f_r(k_y) = \begin{cases} f(k_y), & \phi_1 < \phi < \phi_2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

则上述散射点 P 重构的图像为

$$\begin{aligned} g_M(y, z) &= \int_l A e^{-j(k_y y_0 + k_z z_0)} e^{j(k_y y + k_z z)} dl \\ &= \int_l A e^{j[k_y(y - y_0) + k_z(z - z_0)]} dl \\ &= \int_l A e^{j(k_y y + k_z z)} dl \odot A(y - y_0, z - z_0) \end{aligned} \quad (4)$$

式中符号 \odot 表示二维卷积。

式(4)右边第一项为系统响应 $h(y, z)$,它表示只是利用 $k_y - k_z$ 平面局部数据在 $y - z$ 平面引起的失真,而

$$h(y, z) = \int_l e^{j(k_y y + k_z z)} dl = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \sqrt{1 + [f_r(k_y)]^2} e^{j[k_y y + f_r(k_y) z]} dk_y \quad (5)$$

上式积分范围里,相位变化很多周,即相位为振荡缓变的,因而可以用驻相原理求解上式的积分,即对一定 k_y^* ,只在

$$\left. \frac{d}{dk_y} [k_y y + f_r(k_y) z] \right|_{k_y = k_y^*} = y + f_r(k_y^*) z \Big|_{k_y = k_y^*} = 0 \quad (6)$$

处贡献主要的积分值。若 k_y^* 作为驻相点在积分区间是唯一的,则式(5)的积分可以近似写成^[5]:

$$h(y, z) = \left[\frac{-}{2 f_r(k_y^*) z} e^{-j(\pi/2)} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{1 + [f_r(k_y^*)]^2} e^{j[k_y^* y + f_r(k_y^*) z]} \quad (7)$$

应当指出,由于 ISAR 雷达以一定的重复周期脉冲式的工,扫描线 $k_z = f_r(k_y)$ 不是连续的,而是由一系列离散点所组成.对于机动目标,扫描的速率常常是不均匀的,用实测数据处理时必须考虑.更主要的是非合作机动目标的姿态变化是难以测量的,一般得不到图 2 中的扫描线,而可能测得的仅仅是一系列时序数据,下面来研究利用时序数据重构目标图像的问题.

4 用回波的时频分布重构目标图像

虽然非合作目标的姿态变化在 $k_y - k_z$ 平面的扫描线不确定,不能直接用来重构目标图像,但上一节介绍的概念是十分有用的.以时间 t 为参变量,将波数平面的两个变量写成 $k_y(t) = (4/\lambda) z t$ 和 $k_z(t) = (4/\lambda) \phi(t)$.虽然空间角的变化难以测定,但扫描线扫过波数平面时各散射点相位随时间的变化会在回波中反映出来,可用以重构目标的图像,并概略估计目标的姿态变化.

下面先从几种简单情况开始讨论.设扫描线为均匀扫过的水平线,即 $k_y(t) = (4/\lambda) z t$, $k_z = (4/\lambda) \phi_0$,其中 z 为绕 z 轴的转速.对应于这一扫描线, $P(y_0, z_0)$ 点的相位变化为 $p(t) = - (k_y y_0 + k_z z_0) = - (4/\lambda) (z y_0 t + \phi_0 z_0)$ (8) 其多普勒频率为

$$p(t) = - \dot{p}(t) = (4/\lambda) z y_0 \quad (9)$$

实际上,这就是在水平面平稳飞行的结果,由于多普勒频率 p 与该散射点的横轴位置 y_0 成正比,故可用多普勒谱表示目标散射点的横向分布.两者只是差一个比例常数 $((4/\lambda) z)$,如须知道横向的真实尺寸,还要进行定标.

同样是水平扫描线,如果扫的方向相反,则式(9)的 z 应为负值,即目标图像横向翻转.如果扫描是非均匀的,设以等加(减)速扫过,则相位变化呈线性调频律,且调频率与散射点的横向位置成正比,文献[6]讨论过这种情况.

如果扫描线为任意倾斜的斜直线(设倾角为 β),则可将 $y - z$ 和 $k_y - k_z$ 平面同步地旋转 β 角,得到 $u - v, k_u - k_v$ 平面(图 3)即

$$k_y = k_u \cos \beta - k_v \sin \beta, k_z = k_u \sin \beta + k_v \cos \beta \quad (10)$$

这时就可以在 $k_u - k_v$ 平面里按水平扫描线处理,而得到的是 $x - u$ 截面的像.举个特例,若 $\beta = 90^\circ$,则扫描线在 $k_y - k_z$ 平面里为垂直线,可得目标垂直截面的图像.

上面是结合多普勒成像原理进行说明,实际上扫描线的长短会影响横向分辨率,即只有长时间的相干积累,才能获得高的多普勒分辨率.用波数平面沿扫描线作傅里叶变换可得目标重构的系统响应.仍以本一开始的匀速扫描线为例,可得 P 点沿 y 轴的响应为 $(4/\lambda) A z T e^{-j(4/\lambda) \phi_0 z_0} \text{sinc}(\frac{T}{2} (- p))$,其中 $- p = (4/\lambda) z (y - y_0)$, T 为观测时间.这一

响应表明, P 点可在 y_0 按一定的比例重构(比例常数为 $(4/\lambda) z T$),但展开成 sinc 函数,时间 T 越长,则响应函数越窄,即分辨率越高.

下面再来讨论扫描线为曲线(图 2)的一般情况.曲线的切线方向不断变化,先讨论某一时刻(相当于扫描线上某一点)的情况.按切线方向作坐标旋转,使切线在新的坐标里为水平线.以切点附近一小段扫描线(可近似为直线)作成像处理,可得各散射点横向位置准确而分辨率很差的像,其成像截面即为包含 x 轴与该切线的平面.为了提高分辨率必须利用这一小段外的数据,问题是如何获得有效的相干积累.这一结论告诉我们,机动目标在某一时刻的动态像对应于一定截面,而成像的关键在于能高分辨地求得该时刻各散射点的瞬时多普勒频率.实际上,扫描线扫过时各散射点的相位变化可以从雷达回波中直接得到,为了将各散射点子回波分量区分开,应对回波作时频分布.

可以想像到,由于散射点位置不同,波数平面相位等值线的倾角和疏密是不一样的,所以沿扫描线弯曲移动和速度不均对各个子回波相位变化率(即多普勒频率)的影响也是不同的.但是,飞机一类目标机械惯性较大,在很短的时间和很小的空间角变化过程中,其变化不会十分剧烈.各个子回波的相位变化一般可以用低次多项式表示,图 4 示实测数据一个距离单元的时频分布,总的观测时间约为 11 秒,数据长度为 550 (雷达的重复频率为 400Hz,作 8:1 抽取),图 4 是以伪 Wigner 分布(窗长为 100)画出的,可见其过程是非平稳的,而且时频变化比较复杂.以后的分析将会看到,在这一段不长的观测时间,波数平面的扫描线变化已相当复杂,应对其作分段处理,重构出各种不同截面的目标图像.问题是时间段的选择原则是什么,以及应采用怎样的时频分析方法.

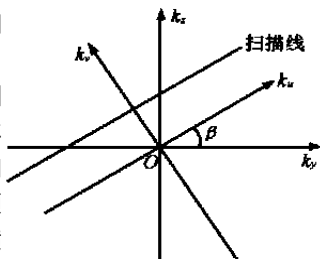


图 3 对斜扫描线进行坐标旋转变换

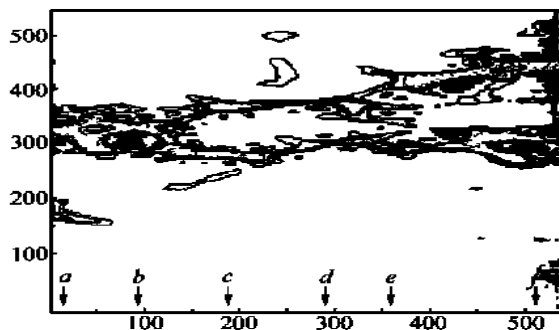


图 4 某距离单元的时频分布图

最简单的时频分析方法是短时傅里叶变换(STFT),为得到瞬间时刻的谱分布,STFT 等效于缩短数据长度,为使窗内的信号基本平稳,窗长必须很短,频率分辨率会很差. Wigner 分布对线性调频信号具有高的频率分辨率,此时截取的信号段应近似为线性调频,若信号截取过长而明显偏离线性调频,非但不能提高分辨率,反而会增加值交叉项,使瞬时谱里出现虚假信号. Wigner 分布另一个主要问题是多分量间会有交叉项而使瞬时谱里存在虚假信号.可以采用加权处理来抑制交叉项,但必须以降低分辨率为代价.

本文希望用较短的数据信号,使各个分量基本满足线性

调频的条件,采用基于最大似然的参数估计超分辨率方法,以获得较高的横向分辨率.为了简化计算和提高稳健性,本文采用 RELAX 算法.一般的 RELAX 算法是针对不同频率的多分量正弦信号,本文将其推广到线性调频信号.线性调频较之正弦波要多一个参数——调频率,这有利于分量之间的区分,使所得结果更稳健.

5 ISAR 机动目标成像的算法

5.1 信号模型

对满足一阶近似的回波数据作超分辨处理,其信号模型为回波由多个线性调频信号和零均值高斯白噪声组成,设共接收到 M 次回波.用这些数据可以分别分析各距离单元散射点回波的参数.下面分析第 n 个距离单元的,其方法适用于所有距离单元.

第 n 个距离单元的回波序列写成向量形式, $y = [y(0), \dots, y(M-1)]^T$, 设在该距离单元内有 K 个子回波(线性调频信号), 它们的起始频率和调频率分别为 $f_k, k(k=1, \dots, K)$ (以上符号均应有下标 n , 表示是第 n 个距离单元的, 现省略), 于是各线性调频序列均可写成下列向量:

$$\phi_k = [1, e^{j2\pi(f_k + \frac{1}{2}k)}, \dots, e^{j2\pi(f_k(M-1) + \frac{1}{2}k(M-1)^2)}]^{*T}, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (11)$$

将这 K 个向量排列成矩阵, 得

$$\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_K]_{M \times K} \quad (12)$$

同时, 设各个线性调频分量的复振幅为 $\alpha_k (k=1, 2, \dots, K)$, 可将其写成列向量 $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_K]^T$. 于是观测数据向量可写成

$$y = \Phi \alpha + e \quad (13)$$

式中 e 是零均值高斯白噪声向量.

只要从观测数据中估计出各个线性调频分量的参数 f_k, k , 就可以利用 $\{f_k, k\}_{k=1}^K$ 得到起始时刻 ($t=0$) 的目标像, 并从 $\{f_k, k\}_{k=1}^K$ 得到其它时刻的瞬时多普勒分布. 这种基于最大似然的参数估计方法是有效的, 它接近参数估计的 Cramer-Rao 界(证明从略), 又由于它同时对不同调频率的分量进行估计, 其性能优于一般正弦波的估计.

5.2 基于线性调频信号模型的超分辨率算法

对于式(13)所示的信号模型, 参数 α, f 和 k 的最大似在参数估计可通过下面对数似然函数极小化得到(略去常数项):

$$C_1(\alpha, f, k) = \left\| y - \sum_{k=1}^K \alpha_k \phi_k \right\|^2 \quad (14)$$

上式中 C_1 的最优化是一个多维空间的寻优问题, 十分复杂. 本文将 RELAX 算法^[7]推广, 以求解 C_1 的寻优问题. 为此, 首先作以下准备工作. 令:

$$y_k = y - \sum_{i=1, i \neq k}^K \alpha_i \phi_i \quad (15)$$

同时假定 $\{\alpha_k, f_k, k\} (k=1, 2, \dots, K, i \neq k)$ 已经求出, 则式(14)的极小化等效于下式的极小化:

$$C_2(\alpha_k, f_k, k) = \left\| y_k - \alpha_k \phi_k \right\|^2 \quad (16)$$

对上式关于 α_k 求极小值就获得 α_k 的估计值:

$$\hat{\alpha}_k = (\phi_k^H \phi_k)^{-1} \phi_k^H y_k \triangleq \phi_k^H y_k / M \quad (17)$$

令:

$$\tilde{y}_k = [y_k(0), y_k(1) e^{-j2\pi f_k}, \dots, y_k(M-1) e^{-j2\pi f_k(M-1)}]^{*T} \quad (18)$$

$$\phi_k = [1, e^{j2\pi f_k}, \dots, e^{j2\pi f_k(M-1)}]^{*T} \quad (19)$$

则式(17)可改写为如下:

$$\hat{\alpha}_k = \tilde{y}_k^H \phi_k / M \quad (20)$$

从式(20)可以看出: $\hat{\alpha}_k$ 是 \tilde{y}_k 归一化的离散傅里叶变换, 所以只要得到 f_k, k 的估计值 \hat{f}_k, k , 可通过 FFT 获得 $\hat{\alpha}_k$. 将 $\hat{\alpha}_k$ 的估计值代入式(16)后, f_k, k 的估计值 \hat{f}_k, k 可由下式寻优得到:

$$C_3(f_k, k) = (1 - \phi_k^H \phi_k / M) y_k^2 = y_k^H y_k - y_k^H \phi_k \phi_k^H y_k / M \quad (21)$$

式中 I 为 $M \times M$ 维单位阵. 上式最小化等效于下式最大化:

$$C_4(f_k, k) = (\phi_k^H y)^H (\phi_k^H y) / M \quad (22)$$

这样, 估计值 \hat{f}_k, k 为:

$$\{\hat{f}_k, \hat{\alpha}_k\} = \arg \max_{f_k, k} \{|\tilde{y}_k^H \phi_k|^2 / M\} \quad (23)$$

对于固定的 k 取值, f_k 的估计值 \hat{f}_k 为归一化的周期图 $|\tilde{y}_k^H \phi_k|^2 / M$ 主峰处的频率值. 这样, 式(23)的优化问题归结为: 在 k 的可能的取值范围内寻找一个 $\hat{\alpha}_k$, 在该点处周期图 $|\tilde{y}_k^H \phi_k|^2 / M$ 的主峰值大于其余各点处的主峰值, $\tilde{y}_k (k)$ 表示 \tilde{y}_k 是 k 的函数. 所以可通过上述一维寻优获得 \hat{f}_k 的估计值 $\hat{\alpha}_k$, 再由式(23)得到 f_k 的估计值 \hat{f}_k .

实际运算时, 为了提高一维寻优的速度, 采用 MATLAB 中的函数 Fmin().

基于推广 RELAX 算法线性调频信号的参量估计步骤:

第一步: 假设信号数 $K=1$, 分别利用式(20)和式(23)计算 $\{\hat{\alpha}_1, \hat{f}_1, \hat{\alpha}_1\}$.

第二步: 假设信号数 $K=2$, 首先将第一步计算所得到的 $\{\hat{\alpha}_1, \hat{f}_1, \hat{\alpha}_1\}$ 代入式(15)求出 y_2 , 再分别利用 y_2 和式(20)及式(23)计算 $\{\hat{\alpha}_2, \hat{f}_2, \hat{\alpha}_2\}$; 将计算的 $\{\hat{\alpha}_2, \hat{f}_2, \hat{\alpha}_2\}$ 代入式(15)求出 y_1 , 然后利用 y_1 和式(20)及式(23)重新计算 $\{\hat{\alpha}_1, \hat{f}_1, \hat{\alpha}_1\}$, 这个过程反复叠代, 直至收敛.

第三步: 假设信号数 $K=3$, 首先将第二步计算所得到的 $\{\hat{\alpha}_1, \hat{f}_1, \hat{\alpha}_1\}$ 和 $\{\hat{\alpha}_2, \hat{f}_2, \hat{\alpha}_2\}$ 代入式(15)求出 y_3 , 再分别利用 y_3 和式(20)及式(23)计算 $\{\hat{\alpha}_3, \hat{f}_3, \hat{\alpha}_3\}$; 将计算得到的 $\{\hat{\alpha}_3, \hat{f}_3, \hat{\alpha}_3\}$ 和 $\{\hat{\alpha}_2, \hat{f}_2, \hat{\alpha}_2\}$ 代入式(15)求出 y_1 , 然后利用 y_1 和式(20)及式(23)重新计算 $\{\hat{\alpha}_1, \hat{f}_1, \hat{\alpha}_1\}$; 将计算得到的 $\{\hat{\alpha}_1, \hat{f}_1, \hat{\alpha}_1\}$ 和 $\{\hat{\alpha}_3, \hat{f}_3, \hat{\alpha}_3\}$ 代入式(15)求出 y_2 , 然后利用 y_2 和式(20)及式(23)重新计算 $\{\hat{\alpha}_2, \hat{f}_2, \hat{\alpha}_2\}$, 这个过程反复叠代, 直至收敛.

后续步骤: 令 $K=K+1$, 上述步骤持续进行, 直到 K 等于待估计信号数.

上述过程中的收敛判据与 RELAX 算法的收敛判据相同, 即比较代价函数 C_1 在两次叠代过程中的变化值, 如果这个变换值小于某个值, 如 10^{-3} , 则认为过程收敛.

6 机动目标实测数据成像结果举例

用上一节的算法对外场实测机动目标数据进行成像处

理. 目标为雅克-42 飞机, 机身长度为 36.38 米, 翼展宽度为 34.88 米, 机高为 9.83 米, 尾部上翘. 实验雷达工作在 C 波段, 信号带宽为 400 兆赫, 目标机动前距雷达约 33.5 公里, 飞行高度约 5000 米, 目标相对于雷达射线向前偏右方直线飞行. 目标的机动只是进一步向右方偏转了一个小的角度, 为时约 11 秒.

成像处理前先将录取的 11 秒钟数据作包络对齐(用滑窗最小熵方法)^[1], 并分段作了初相校正^[2]. 为了减小运算量, 对数据作 8:1 抽取, 前面提到的图 4 就是该数据中某一距离单元的时频分布图, 可见目标的转动是非平稳的.

从这约 11 秒的数据中选出 6 段, 所成目标截面如图 5 所示. 在每一段里目标的姿态和转速的变化仍然是非平稳的, 其间的像会有小的变化, 这里画出的是每一段起始时刻的截面图, 数据段的时间范围注在各图中.

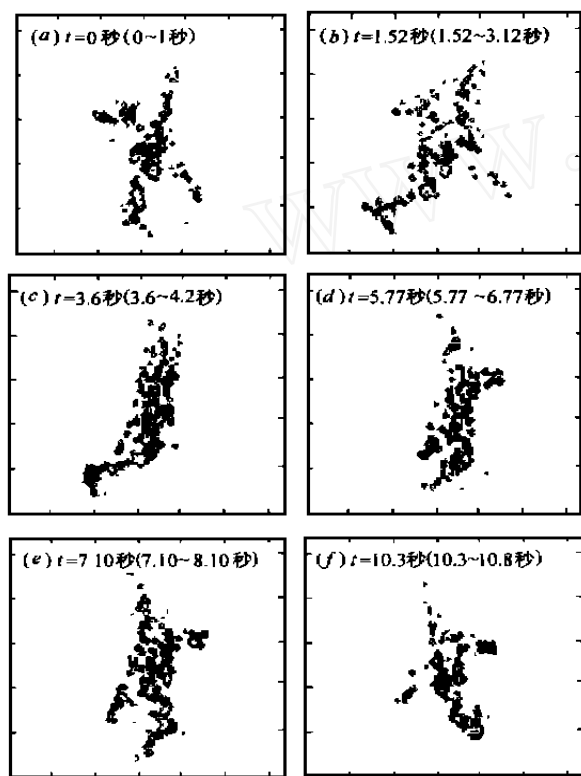


图 5 雅克-42 飞机机动飞行时的 ISAR 动态像

根据目标截面图的变化, 可以概略地画出这一期间扫描线示意图如图 6, 实线表示所用的数据段, 而 a, b, \dots, f 表示与图 5 的成像时刻相对应.

下面结合图 5 和图 6 说明飞机机动飞行的情况. 机动前飞机向前稍偏右直线飞行. 雷达射线相对于目标从右向左扫描, ISAR 像在横向上与“俯视图”相反, 即所成像

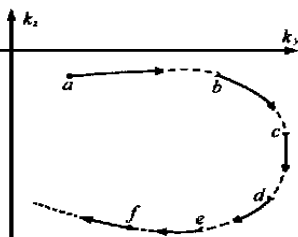


图 6 雅克-42 机动飞行波数谱平面扫描线的示意图

的机首指向上左方. 机动飞行段目标自身转动(包括偏航、俯仰和侧摆)对射线扫描的贡献要比平动的大得多, 图 5(a) 是开始向右偏航的情况, 在图 6 里扫描线由左向右, 所以图 5(a) 的截面图的机首向上偏右. 在 (b) 段里目标继续向右偏航的同时, 机首下俯, 其扫描线向右同时向下扫(图 6 和 b 段), 扫描线向右扫形成图像机首偏右, 而扫描线向下一方面使机首更偏右, 同时还使上翘的机尾明显偏左(图 5(b)). 在 c 段里飞机主要作下俯转动, 这时扫描线为垂直向下扫, 图 5(c) 的图像为垂直截面图. 在 d 段里飞机已不再向右偏航, 而是向偏右方向直线飞行, 扫描线变为由右向左, 而下俯运动仍在继续, 但速度放慢, 这时的截面图(图 5(d)) 机首向上稍偏左, 而机尾仍稍偏左. e 段为飞机停止下俯的平飞段, 图 5(e) 的机首向上偏左, 而机尾基本位于中间. f 段飞机缓慢上升段, 机首有小的上仰转动, 机尾向下, 扫描线在向左的同时缓慢向上扫描, 使图 5(f) 截面图的机尾稍向右偏.

应当指出, 图 6 的扫描线, 其空间角的变化范围是很小的, 由于采用了超分辨算法, 每幅图像的扫描角只需 3° 左右. 在约 10 秒的观测时间里, 飞机姿态的变化并不大, 偏航和俯仰均只有几度, 但目标的成像截面决定于姿态变化率的方向, 从而可得到各种不同截面的目标像. 如果对图 5 的 6 个图作仔细分析还会发现, 各图的散射点基本是共同的, 由于转角很小, 散射点的纵向位置(相对于参考点)基本没有变化, 只是由于其横向位置随姿态变化率发生大的变化, 而形成不同截面的图像. 对于图 6 的全过程扫描线, 是分段应用的, 一方面全过程应用有困难, 因为各散射点回波的频率变化在全过程相当复杂, 难以实现相干积累, 取其中一段可近似为各种不同调频率的线性调频; 另一方面是也无必要, 取其中一段已获得足够的横向分辨率.

7 结束语

本文首先讨论了对于非合作的机动目标成像的一般原理, 并对机动性不太大, 散射点子回波多普勒变化满足一阶近似条件时, 提出了实用算法, 并用该算法对实测数据进行了成像处理, 得到机动飞行段过程的动态图. 成像结果表明, 在很短的时间里, 飞机的姿态变化很小, 但由于机动中三维转动的姿态变化率较大, 使得到动态图像有很大的变化.



保 铮 1927 年生, 教授, 中国科学院院士, 中国电子学会会士, 研究领域为雷达信号处理及现代信号处理.

参考文献

- [1] 王根源, 保铮. 逆合成孔径雷达运动补偿中包络对齐的新方法. 电子学报, 1998: 5~8

(下转第 39 页)

5 结论

本文针对图像边缘不同的灰度变化方式,提出了基于多特征和模糊推理的边缘检测方法.本方法对于图像边缘,尤其模糊边缘有很好的检测效果,同时可以在一定程度上有效地抑制噪声.

尽管本文提出的方法有很好的检测效果.但是由于文中定义的边缘特征较多,规定的模糊逻辑规则较复杂,计算量较大.如何更好地简化规则,减少计算量,将作为本课题今后的研究方向.

参考文献

- [1] D. Marr and E. Hildreth. Theory of edge detection. Proc. R. Soc. Lond. 1980, B207:187 ~ 217
- [2] R. M. Haralick. Digital step edges from zero crossing of second directional derivatives. IEEE Trans. ,1984 ,PAMI-6(1) :58 ~ 68
- [3] 吴立德. 计算机视觉. 上海:复旦大学出版社,1993:12 ~ 119
- [4] Todd Law, Hidemori Itoh, and Hirohisa Seki. Image filtering, edge detection, and edge tracing using fuzzy reasoning. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1996, 18(5) :481 ~ 491
- [5] S. K. Pal and R. A. King. A note on the quantitative measurement of image enhancement through fuzziness. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1982, 4(2) :204 ~ 208
- [6] Nakagawa and Rosenfeld. A note on the use of local min and max operations in digital picture processing. IEEE Trans. Syst. , Man , Cybern. 1978, 8(8) :632 ~ 635
- [7] E. H. Mamdani. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controller. Int 'l J. Man-machine studies. 1976, 8(6) :669 ~ 679

孔祥维 1963 年出生,现为大连理工大学电信学院副教授,中国电子学会高级会员. 目前主要从事图像处理、信号处理、模式识别和计算机视觉等方面的研究.



谢存 1972 年出生,1998 年毕业于大连理工大学通信与电子系统专业,获工学硕士学位,现为该校博士研究生. 从事图像处理、神经网络及模糊识别等方面的研究.



徐蔚然 1997 年毕业于大连理工大学电子工程系,获工学学士学位,现为该校信号与信息处理专业硕士研究生.

(上接第 28 页)

- [2] B. Zheng and Y. Wei. Improvements of autofocus techniques for ISAR motion compensation. China. J. Electron, 1995, 4(4) :1 ~ 8
- [3] Zheng Bao, Genyuan Wang and Lin Luo. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging of maneuvering targets. Optical Engineering, May 1998, 37(5) :1582 ~ 1588
- [4] Anil K Jain. Fundamental of Digital Image Processing. PRENTICE HALL Englewood Cliffs. NJ 07632, 1989:431 ~ 434
- [5] Walter G. Carrara Ron S. Godman Ronald M. Majewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms. Artech House Boston. London, 1995:423 ~ 424
- [6] Genyuan Wang, Zheng Bao, Xiaobin Sun. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging of Non-uniformly Rotating Targets. Optical Engineering No. 10, Oct. 1996:3007 ~ 3011
- [7] Li. J. ,and P. Stoica. Efficient mixed-spectrum estimation with applications to target feature extraction. IEEE Trans. on SP, February 1996, 44(2) :281 ~ 295