

用整体最优准则实现 ISAR 成像的包络对齐

邢孟道, 保 铮, 郑义明

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: ISAR 成像中的包络对齐通常是基于距离像之间的相关性. 本文从目标的散射点模型出发, 首先通过分析和实验研究表明, 近角度(转角变化小于 0.1°) 距离像之间具有强相关性, 但随着转角的增大, 由于交叉项的影响, 相关性急剧下降, 这也表明用相邻相关法作包络对齐, 会产生漂移误差; 之后, 提出了通过在成像所需的距离像中散布选取十多次距离像作平均, 抑制交叉项, 就能得到稳定平均距离像, 它和所有距离像具有强的相关性, 把它作为相关模板进行对齐, 能改善对齐效果; 最后, 提出整体最优准则包络对齐的迭代算法, 实测数据也表明它比已有的方法要好.

关键词: 逆合成孔径雷达 (ISAR); 包络对齐

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2001) 12A-1807-05

Range Alignment Using Global Optimization Criterion in ISAR Imaging

XING Meng-dao, BAO Zheng, ZHENG Yi-ming

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Range alignment is usually based on the correlation of range profile in ISAR imaging. According to the point scatterer model of target, this paper shows that the range profiles have strong correlation within the aspect change 0.1° , but with the increase of aspect change the correlation will decrease greatly due to cross-term, which also shows that drift error will be caused when conventional neighbor amplitude correlation method is used to align the envelope. It is shown that by averaging over ten range profiles selected from the imaging needed range profiles with equal aspect change, the cross-term can be restrained, and the stable average range profile can be obtained. The average range profile has strong correlation with all range profiles, and if it is used as template, then the accuracy of range alignment can be enhanced. An iterative correlation alignment method for range alignment is proposed by using global optimization criterion. Real data validate its effectiveness.

Key words: ISAR; range alignment

1 引言

平面转台目标的雷达成像是容易实现的, 若对分辨率的要求不很高(如 1 米左右), 微波雷达所需要的目标转动相干积累角很小(一般不超过 $2 \sim 3^\circ$). 基于目标的散射点模型, 可认为在成像转动期间散射点越距离单元走动(MTRC)基本上不发生, 则将接收到的一系列目标距离剖面(设目标以等间隔转动)排列好, 并分距离单元对回波序列作傅立叶变换, 得到各距离单元的散射点横向分布, 即目标散射点的二维分布图像.

对运动目标, 如飞行中的飞机, 相对于雷达存在转动和平动两个分量, 如能将平动分量补偿掉, 则运动目标等效于转台目标, ISAR 成像可立即实现. 但准确的平动补偿不易做到.

设目标某次回波为 $s(t) e^{j\phi}$, $s(t)$ 是该次回波复包络, 即复距离剖面. 平动补偿就是将回波信号平移, 回波延迟后为 $s(t - \tau) e^{j\phi}$. 信号处理通常在基带进行, 延迟后回波的复包络为 $s(t - \tau) e^{j\phi}$, 即回波延迟可分为两部分: 复包络 $s(t)$

的延迟(即 $s(t - \tau)$)和初相校正(即 $e^{j\phi}$). 这两部分对补偿精度的要求显然不一样, 复包络的变化与距离分辨单元的大小有关, 如平移误差为距离分辨单元的几分之一, 复包络的变化是很小的. 初相校正则不同, 平移误差要与波长相比较, 若 $\lambda = 3\text{cm}$, 则 1mm 的平移误差, 初相变化达 24° . 为此, 平移补偿通常分两步进行, 首先作包络对齐的粗补偿, 然后再作初相校正的精补偿. 实际上, 要实现毫米级的精补偿是困难的, 好在相位变化以 2π 为模, 只作相位校正就容易得多.

本文主要讨论包络对齐, 首先要解决的问题是根据什么准则来进行对齐. 前面提到, 平动补偿相当将运动目标转换成转台目标, 但可以想象到, 将目标上的不同点移到转轴上, 两者散射点分布二维像的形状相同, 只是有一定的位移. 这时两种转台目标回波序列的波形也相同, 只是初相值有一个常数的差别, 因为两者多普勒为 0 的点所对应的坐标不同. 作为包络对齐的粗补偿, 精度不需要达到波长的量级, 初相校正正是精补偿的事. 包络对齐可用散射点模型二维像作为基准, 各次回

波序列应与它对齐.

2 目标的散射点模型与回波序列

当将两个起点不同而波形相同的信号作对齐处理时,可用不同的延迟计算两者的相关系数,当两波形完全重合时,相关系数最大,两者准确对齐.将滑动相关用于 ISAR 的包络对齐,可用复包络^[7],也可用实包络,用得更多的是实包络^[1,2].在 ISAR 里,用相邻两次回波作包络对齐,两回波的波形不完全相同.由于成像所需要的相干积累角约为 $2 \sim 3^\circ$,而所采用的回波序列为几百(如为 256 次),则相邻回波序列对应的目标转角为 0.01° 的量级.从下面的分析和实际里可见,两回波的波形差别很小,采用相邻相关作包络对齐可获得好的对齐效果,实际情况确实如此.但是,这里所说的效果好只是指相邻两次对齐,成像所需的序列有几百,就是说要进行几百次相邻相关对齐.实际工作表明,虽然相邻相关对齐的误差很小,但常发生误差积累效应而产生包络漂移,整体上不能很好对齐.在后面的实例中还会看到,在回波序列中有个别瞬间波形有特异变化,从而使该处的包络对齐产生大的误差,用相邻相关法会使后续包络在错误位置上继续排列下去,产生了突跳误差.运动补偿后的成像是排列好的包络序列,在初相校正后,分距离单元通过 DFT 而获得的.可见包络对齐应从整体上来观察,若包络基本对齐,误差起伏为距离单元的几分之一,甚至有个别几次误差很大,都对成像质量影响不大.反之,虽然相邻回波包络对齐的误差很小,但漂移误差或突跳误差达几个距离单元,则成像质量会变得很差.

针对上述情况,文献[3]和[4]提出对某次回波对齐时不是用前一次回波,而是前面多次回波的合成序列,或用指数窗,或用矩形窗,使包络对齐在较小漂移误差和突跳误差方面有明显改善,但有时仍不够满意.应当指出,不用前面单次回波而用多次回波合成,是在整体优化思想下所作的改进,但显然只是利用了局部.为了更好地运用整体优化概念,下面先讨论回波序列和目标散射点模型的关系.

设目标作平面转动,将目标的径向按距离分辨单元长度划分为 N 个径向单元.目标均匀转动了一个小的相干积累角,其间接收到 M 次回波($m=0,1,\dots,M-1$),所对应的转角分别为 $0, \dots, (M-1)$.设第 n 个距离单元里有 P_n 个散射点,它们相对于转轴的横向分别为 $x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nP_n}$,各子回波序列的振幅和起始相位分别为 a_{ni} 和 φ_{ni} ($i=1, \dots, P_n$),同时由于相干积累角很小,在转动过程中所有散射点均保持在各自的距离单元里,即不发生外逸,也没有新的进入.为此可写出第 n 个距离单元、第 m 次回波的复包络为,

$$s_n(m) = \sum_{i=1}^{P_n} a_{ni} \exp(j\varphi_{ni}) \exp[-j\frac{4\pi}{\lambda} x_{ni} (m-1)] \quad (1)$$

其中 $n=1, \dots, N, m=0, \dots, M-1$.由此可得相应的功率像

$$\begin{aligned} |s_n(m)|^2 &= s_n(m) s_n^*(m) \\ &= \sum_{i=1}^{P_n} a_{ni}^2 + 2 \sum_{i=2}^{P_n} \sum_{k=1}^{i-1} a_{ni} a_{nk} \cos[\varphi_{nik}(m)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中,

$$\begin{aligned} \varphi_{nik}(m) &= (\varphi_{ni} - \varphi_{nk}) - \frac{4\pi}{\lambda} (x_{ni} - x_{nk}) (m-1) \\ &= \varphi_{nik}(0) + \varphi_{nik}(m) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\varphi_{nik}(m) = \exp[-j\frac{4\pi}{\lambda} (x_{ni} - x_{nk}) (m-1)]$.

通常用的实包络为,

$$\begin{aligned} |s_n(m)| &= [s_n(m) s_n^*(m)]^{1/2} = \left[\sum_{i=1}^{P_n} a_{ni}^2 \right]^{1/2} \\ &+ \sum_{i=2}^{P_n} \sum_{k=1}^{i-1} a_{ni} a_{nk} \cos[\varphi_{nik}(m)] / \left[\sum_{i=1}^{P_n} a_{ni}^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

其中式(2)和式(4)的第一项是相同子回波自己共轭相乘的自身项,它为各散射点的强度和,与转动无关(当然是在不发生 MIRC 的条件下);第二项是相异子回波共轭相乘的交叉项,它是 m 的函数.

2.1 距离像随转角的变化

由式(2)可见,各个距离单元中,位于左右两侧的两个散射点的 $\varphi_{nik}(m)$ 变化最大,若该两点之间的横向距离差为 L_{nM} ,则 $x_{ni} - x_{nk} = L_{nM}$,如果最大的 φ_{nik} 分量小于 $\pi/2$,即

$$|\varphi_{nikM}| = \frac{4\pi}{\lambda} L_{nM} (M-1) < \pi/2 \quad \text{或} \quad (M-1) < \frac{\lambda}{8L_{nM}} \quad (5)$$

举个数字例子,如 $\lambda = 5$ 厘米, $L_{nM} = 30$ 米,则 $(M-1) < 2 \times 10^{-4}$ 弧度,这时交叉项的变化也很小. 2×10^{-4} 弧度约为 0.01° .微波雷达波长为 5 厘米时,对飞机一类目标成像所需的相干积累角约为 3° 左右,若用 256 次回波样本进行成像(为使相干积累角达到要求,一般要抽取),则相邻两次之间的目标的转角约为 0.01° .可以想象到,如果目标的转角大于 0.1° ,则 φ_{nik} 的变化就很复杂了,横向距离远的两个点,其 φ_{nik} 可能大到 5° ,而横向紧连的两个点的 φ_{nik} 仍然很小.对众多的散射点,式(2)中的交叉项的各个分量可近似看成为随机变化,即交叉项随 m 作 0 均值的随机变化,其相关角度为百分之一度的量级.

我们举一个实测的例子,图 1 是雅克飞机的距离像,雷达工作在 C 波段,频带为 400 兆赫,所用的数据与 ISAR 成像相结合,一幅 ISAR 像用 256 次回波,相干积累角 3° 左右(实际目标通常转动较慢,我们是通过抽取达到的),即相邻回波的转角为 0.01° 多.图 1(a)、(b)、(c) 和 (d) 依次为第 1、第 2、第 10 和第 243 次回波的距离像,可见第 1 和第 2 次回波,因为转角只有约 0.01° ,两者十分相似,相关系数很高.将图 1(c) 第 10 次回波与图 1(a) 相比较,已可看出两者的明显区别;而图 1(d) 的第 243 次回波与图 1(a) 第一次回波的就有很大差别,其实两者间的转角约为 3° ,目标相对于雷达的散射点模型,基本未发生变化.可见一维距离像的对方向非常敏感,下面讨论通过平均的方法,抑制方向敏感性.

2.2 平均距离像

如上所述,在目标相对于雷达的散射点模型基本未变的转角范围里(一般为 $3 \sim 5^\circ$ 或更大),式(2)的结果可以适用,即其自身项是不随转角变化,而交叉项则随转角作均值为 0 的随机变化.其相关转角为百分之一度的量级.因此,在一定的转角范围里,取较多交叉项相关较小的回波(即间隔较大)作平均,交叉项的分量就会减得很小,平均距离像基本为距离像

中的自身项,它在转角范围内是稳定不变的.

仍用与图 1 相同的数据,图 2(a)为用一幅 ISAR 像的全部 256 次回波中等间隔取 10 个距离像作平均的平均距离像,

图 2(b)全部 256 次平均的平均距离像,只要在全观察角内散布选取样本,用十多次回波作平均就能得到该视角范围的稳定平均距离像.

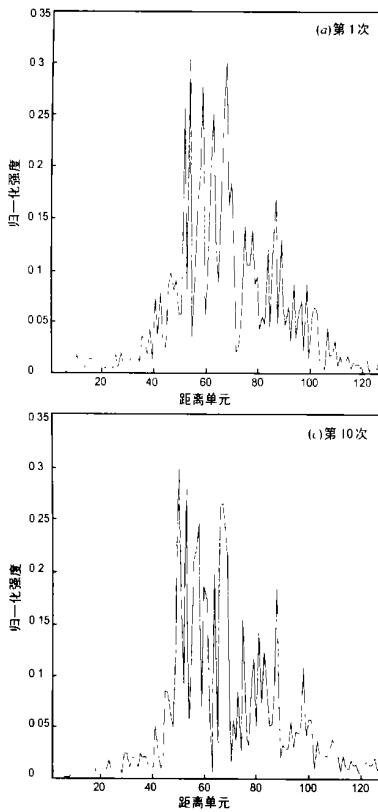


图 1 雅克飞机的距离像

平均距离像还可以从 ISAR 的图像域得到解释.若各次回波的复距离像为 $s_n(m) (m=0, 1, \dots, M-1), s(m) = [s_1(m), \dots, s_N(m)]^T$, 对 $s(m)$ 分距离单元沿 m 作傅里叶变换, 得 $S(k) = [S_1(k), \dots, S_N(k)]^T, (k=0, 1, \dots, M-1)$. 实际上, $X(k)$ 表示目标的 ISAR 二维像, $S_n(k)$ 表示位 (n, k) 点散射点的复振幅. 根据 Parseval 公式: $\sum_{k=0}^{M-1} |S_n(k)|^2 = \sum_{m=0}^{M-1} |s_n(m)|^2 (m=0, 1, \dots, M-1)$, 其中 $\sum_{k=0}^{M-1} |S_n(k)|^2$ 为第 n 个单元所有散射点强度之和, 即式(2)中的自身项.

2.3 平均距离像的相关性

所谓稳定的距离像是指在该转角范围距离像十分相似.

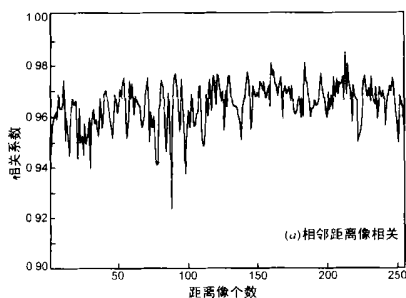


图 3 雅克-42 飞机单次距离像的相关系数

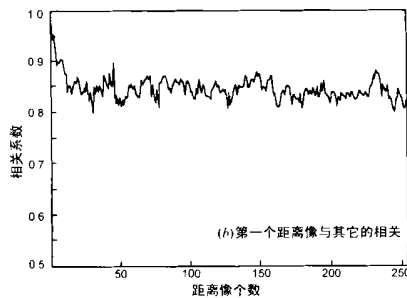


图 4 用平均距离像对各次回波得到的相关系数

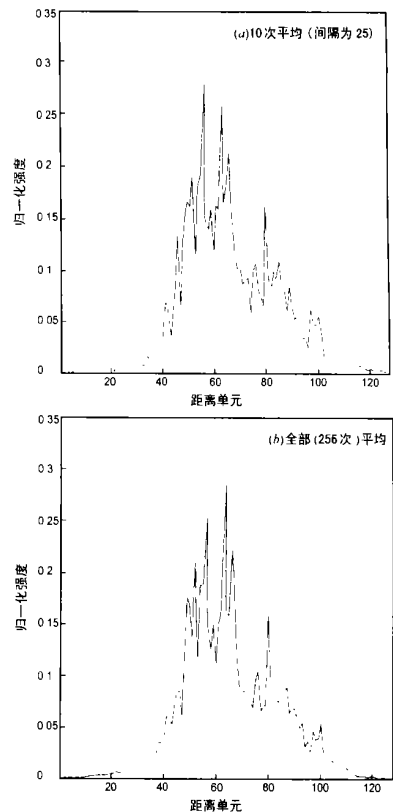


图 2 雅克飞机的平均距离像

作为科学研究,应对“相似性”量化.

一维距离像可以用列向量表示,在信号空间里,相似的向量会聚集在一个小的范围里,信号越相似,向量聚集得越密.因此,若将向量长度取归一化,则向量的顶点分布在超球面上,用向量在空间的距离来量化它们的相似性显然是合适的.通常为便于计算,采用 2-范数距离.

设两归一化实向量为 s_1 和 s_2 , 则它们的 2-范数距离 d_2

$$d_2 = E[|s_1 - s_2|^2] = E[(s_1 - s_2)(s_1 - s_2)^T] = 2 - 2E[s_1 s_2^T] = 2(1 - \rho) \quad (6)$$

式中 $E[\cdot]$ 表示数学期望, $\rho = E[s_1 s_2^T]$ 为两向量的相关系数.

式(6)表明,2-范数距离 d_2 与相关系数 有简单关系: 越大,则 d_2 越小;当 趋于1时, d_2 趋于0. 所以用相关系数来表示两向量的相似性是合适的.

下面,我们用实测数来直观的考察相关性,仍然采用雅克-42飞机,数据段仍用与图1相同,图3(a)为相邻两次回波相关,可以想象到,约0.01的转角,交叉项仍有强的相关性,相邻相关系数接近于1,都比0.9高得多,且大多数高于0.95.用第一次回波的距离像与其它各次回波相关,情况就不一样了,图3(b)表明,它只是对相近的几次回波有强的相关,然后随着转角的加大而迅速减小,图3(b)中约在十余次回波后,相关系数减小到在0.85附近起伏.

在2.2节里已经说明了平均距离像对方向的变化较为稳定,且在图2中举例说明间隔抽取25个距离像作平均,已取得好的平均效果.这里仍用图2雅克飞机的数据段,先间隔10个抽取1个,用25个距离像平均得到平均距离像,对各次回波作相关处理,得到如图4所示的相关系数.从图4可见,用平均距离像作为模板与各次回波作相关处理,它虽然不像相邻相关那样有很高的相关系数,但与图3(b)相比较,使相关系数的下限由0.8提高到0.89,而且大多数在0.92以上.

3 整体最优准则包络对齐的迭代算法

从整体最优的概念出发,包络对齐应当是将所有 m 次回波一起进行,例如以某一次回波为准,改变后 $M-1$ 次回波的延迟,使某代价函数最优.这是一个高维搜索问题,难以实现,常用的算法是分解成多次一维搜索,并作多次迭代,即除某次回波外,将其它回波固定,而改变该次回波的延迟,通过局部优化得到延迟值,最后再换一个回波进行搜索.由于各次搜索是相关的,轮完一遍后还要进行新一轮,直到新一轮延迟值

的变化均小于一定数值为止.

实际整体优化的迭代函数仍可用相关函数,以第一次回波为基准($t_0=0$),而后续各次回波的相对延迟分别为 t_1, \dots, t_{M-1} .设对第 i 次回波作对齐处理,则对该次回波的 t_i 进行搜索,使与其它各次回波的相关函数之和为最大:

$$\max_i \arg |s_i(t_i)| \prod_{m=1, m \neq i}^{M-1} |s_m(t_m)|, i=1, \dots, M-1 \quad (7)$$

式中 $s_i(t_i)$ 表示延迟为 t_i 的第 i 次回波向量,上标 T 表示转置. i 在1到 $M-1$ 之间轮流迭代.

式(7)中括号里的数值不是 t_i 的函数,它是几百个延迟距离像向量之和,即 $|s_i(t_i)|$ 远比该值为小,且 $|s_i(t_i)|^T \cdot |s_i(t_i)|$ 为信号自身的内积,它也与 t_i 无关,因而将式(7)中的 $\prod_{m=1, m \neq i}^{M-1} |s_m(t_m)|$ 改成 $\prod_{m=1}^{M-1} |s_m(t_m)|$. 不过,按上面的说明,每搜索一个 t_i 就要将 $\prod_{m=1}^{M-1} |s_m(t_m)|$ 置换而计算新的值.

为简化运算,我们将搜索按轮次分开,在作新一轮搜索时将 $\prod_{m=1}^{M-1} |s_m(t_m)|$ 中的所有 $t_m (m=1, \dots, M)$ 均保持为上一轮的值,这相当于上一轮搜索完成后,分别对各次回波进行搜索,完成新一轮搜索.这样的算法不如逐次的有效,但算法要简化很多,而且在每一轮里的各次回波都对同一个向量作相关比较,这对整体对齐显然有好处.

可以看出,包络对齐完成后, $\prod_{m=1}^{M-1} |s_m|$ 为所有各次实包络之和. 在上一节提到过, $[\prod_{m=1}^{M-1} |s_m|^2]^{1/2}$ 能准确反映散射点强度的径向分布,因此将式(7)里的代价函数改写成,

$$\max_i \arg |s_i(t_i)| \left[\prod_{m=1}^{M-1} |s_m(t_m)|^2 \right]^{1/2}, i=1, \dots, M-1 \quad (8)$$

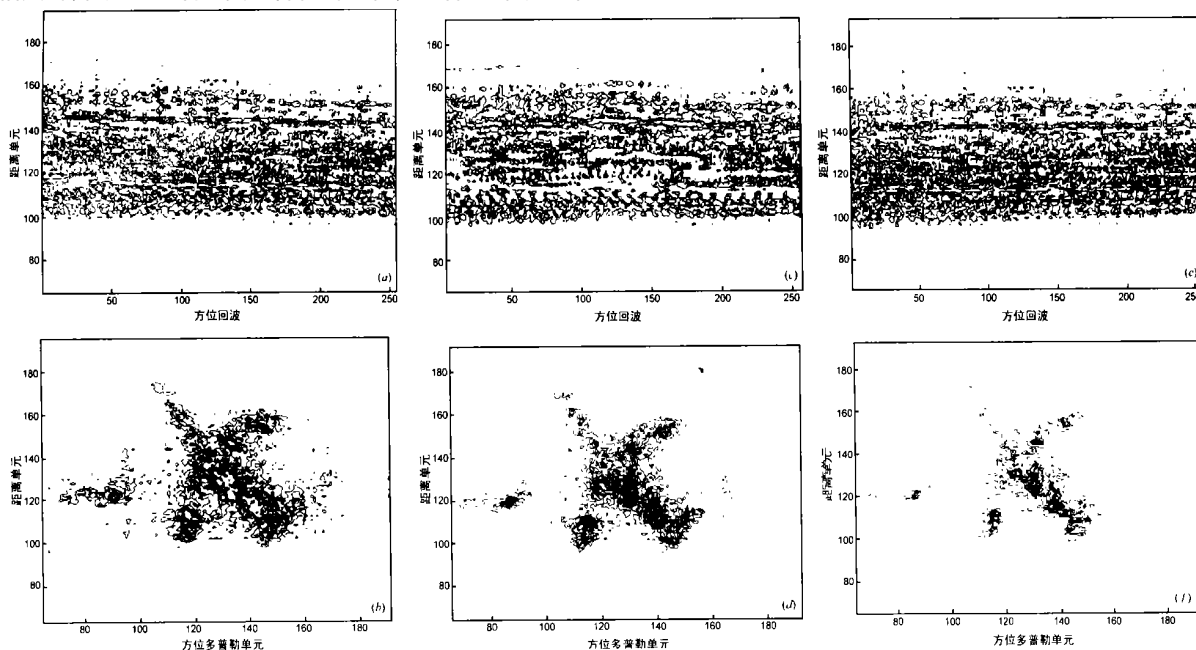


图5 雅克-42飞机的包络对齐和成像。(a)采用相邻相关对齐;(b)(a)的ISAR像;(c)采用平均距离像模板作相关对齐;(d)(c)的ISAR像;(e)采用平均距离像作模板迭代相关对齐;(f)(e)的ISAR像

式中 $m_f (m = 1, \dots, M - 1)$ 为上一轮搜索得到的值,而在本轮搜索中保持不变.而且将在每一轮的搜索中设所有 $i (i = 1, \dots, M - 1)$ 均不变,即在每一轮搜索完毕后,根据新的 i , 计算式(8)的中括弧的值,然后以该向量作为基准,对各距离像作新一轮的对齐.可见这样做的运算量要小得多.

式(8)还表明,当包络对齐正确完成后,式(8)的中括弧即平均距离像,在前一节里已经提到(见图2),平均距离像与各个距离像的相关系数是较高的,可以获得好的对齐结果.不过这些相关系数比相邻相关要差一些,即相邻回波的对齐精度不如相邻相关.但作为粗补偿的包络对齐来说,过高的精度用途不大,而是要求整体不能发生大的偏移,现在的算法是将各次回波与同一标准比较,没有误差积累的问题.

式(8)采用迭代算法, $i (i = 1, \dots, M - 1)$ 起始值的设定是重要的,应尽量靠近实际值,这样一方面可减小运算量,更重

要的是避免搜索进入局部极值区,而得到错误的结果.为此,在回波序列确定后,可先用相邻相关作包络对齐处理,并将各次回波的位置,作为式(8)迭代计算的起始值.

4 实验结果

我们将几批实测数据中,挑选用相邻相关对齐而效果较差的一些数据,采用本文的新算法进行处理,实际效果均较好.限于篇幅,这里举两个例子.图5为雅克-42飞机的不同包络对齐和其成像结果.图6螺旋桨飞机安-26的不同包络对齐方法和其成像结果,图6中个别回波未对齐,有突跳,因为安-26飞机有游动的强散射点回波^[5],不过用整体积分变换成像影响不大,另外采用文献[6]范数1的方法,突跳可以避免,这里不详细讨论了.

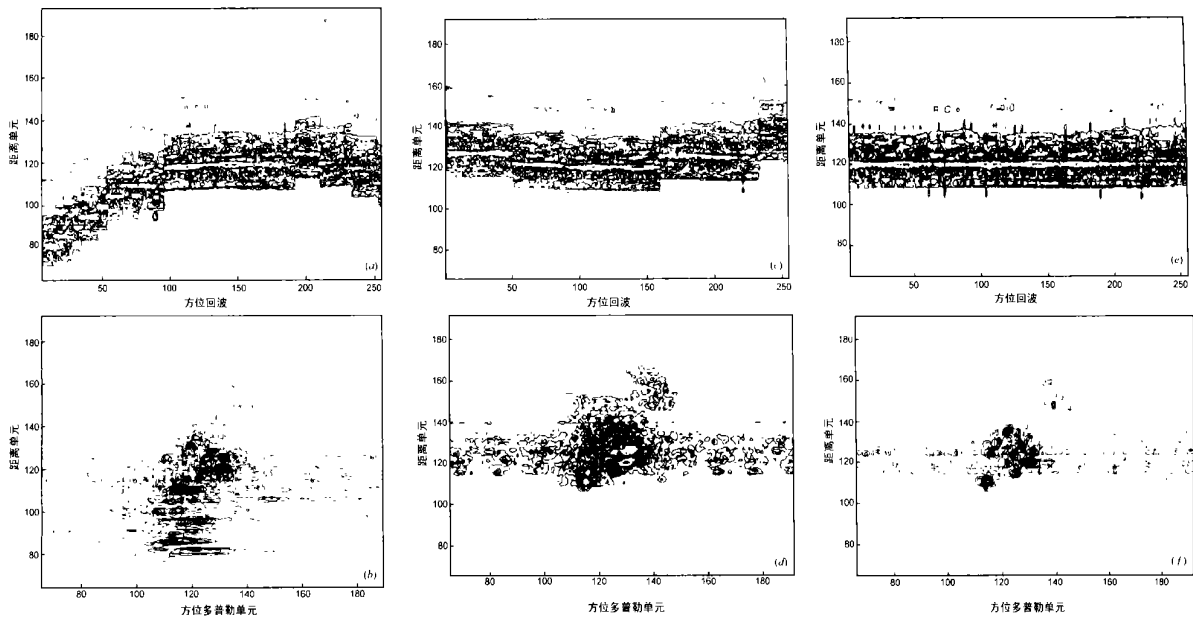


图6 螺旋桨飞机安-26的包络对齐和成像。(a)采用相邻相关对齐;(b)(a)的ISAR像;(c)采用平均距离像模板作相关对齐;(d)(c)的ISAR像;(e)采用平均距离像作模板迭代相关对齐;(f)(e)的ISAR像

5 小结

本文首先从散射点模型出发,分析了距离像相关性,及产生方向敏感性的机理,并通过一定视角内($3^\circ \sim 4^\circ$)散布选取十多次距离像平均,获得稳定的平均距离像,它和所有距离像具有强的相关性,把它作为相关模板进行对齐,可以提高对齐精度.最后,通过迭代进一步提高对齐精度,并提出基于相关的整体最优准则包络对齐的迭代算法.不过对有游动的强散射点回波的飞机,如安-26飞机,用相关法对齐时有时会产生突跳,用基于范数1相关的对齐方法^[6]可以避免产生突跳,因为相关最大实际上是范数2距离最小,基于范数1距离最小的稳健性比范数2距离最小要强.

参考文献:

[1] Ausherman D A, Kozma A, Walker J L, Jones H M, Poggio E C. Devel-

opments in radar imaging [J]. IEEE Trans. on AES, 1984, 20(4): 363 - 400.

[2] C C Chen, H C Andrews. Target-motion-induced radar imaging [J]. IEEE Trans. on AES, 1980, 16(1): 2 - 14.

[3] Haiqing Wu, Grenier D, Delisle G Y, Dar-Gang Fang. Translational motion compensation in ISAR image processing [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(11): 1561 - 1571.

[4] 王根原, 保铮. 逆合成孔径雷达运动补偿中包络对齐的新方法[J]. 电子学报, 1998, 26(6): 5 - 8.

[5] 卢光跃, 保铮. ISAR成像中具有游动部件目标的包络对齐[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(6): 12 - 14.

[6] 邢孟道, 保铮. 一种逆合成孔径雷达成像包络对齐的新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(1): 93 - 96.

[7] 庞怡杰, 王国林. 一种改进的ISAR运动补偿方法[J]. 系统工程与电子技术, 1998, 20(6): 39 - 43.