

逆合成孔径雷达成象中距离校正的研究

皮亦鸣 黄顺吉

(电子科技大学7系,成都 610054)

摘要 本文分析了逆合成孔径雷达(ISAR)成象中距离校正的基本原理,提出了两种新的校正方法:峰值对准法和直接校正法。利用雷达实测数据,讨论了上述新方法与幅度相关法的差别,从而肯定了直接校正法的优越性。

关键词 逆合成孔径雷达;距离校正;幅度均方差

1. 引言

近年来,逆合成孔径雷达(ISAR)已成为解决反隐身和目标识别等难题的最有前景的途径之一,受到国内外学者的高度重视。

运动补偿是 ISAR 成象的关键,它一般分两步完成:第一步是距离校正,消除目标回波的距离走动;第二步是相位补偿,以修正目标回波相位。目前,国内外对未知航迹运动目标的成象大都采用空域校正法,即幅度校正法实现距离校正^[1-5]。最为典型的是采用 Chen^[1] 提出的幅度相关法实现距离校正,但在回波相关性较差时会产生相当大的走动估计误差。本文基于距离校正的原理,提出了两种新的校正方法:峰值对准法和直接校正法。利用外场实测雷达数据,分析了这3种校正方法的优缺点。结果表明,采用直接校正法具有较大的优越性,并且能够推广到远程卫星目标的 ISAR 成象。

2. 距离校正

对于 ISAR,要实现二维高分辨力成象,就要减小距离单元宽度和增加相干积累时间。由于目标闪烁效应,这两种情形都可能增大脉冲回波出现距离走动的可能性。在相干处理时间内,距离在脉间存在较大变化,回波包络函数可能出现数倍于发射脉宽的变化,因此在聚焦成象处理前,应先对回波采样信号进行距离校正,以消除距离走动。针对这一问题,Chen^[1] 首先提出幅度相关法。假定 $x_1(r)$ 和 $x_2(r)$ 是两个相邻脉冲的回波复包络, r 是距离。由于雷达回波是能量有限信号,可以认为 $x_1(r)$ 和 $x_2(r)$ 是希尔伯特空间内的两个元素。在一个脉冲重复周期内高速运动目标姿态变化较小,回波是慢起伏信号,因此可以用回波幅度表征回波信号,则有

$$m_1(r + \Delta r) \approx m_2(r) \quad (1)$$

其中 $m_1(r) = |x_1(r)|$, $m_2(r) = |x_2(r)|$ 。 Δr 表示回波数据对不准值,即需估计的回波

1991.11.18 收到,1992.09.21 定稿

皮亦鸣 男,1968年生,博士研究生,现主要从事信号处理和雷达成像方面的研究工作。

黄顺吉 男,1932年生,教授,博士生导师,中国电子学会会士,现主要从事信号处理、雷达成像和神经网络等领域的工作。

距离走动值。

从理论上说,距离校正就是使 $x_1(r)$ 和 $x_2(r)$ 之间的距离最小,即使实信号 $m_1(r)$ 和 $m_2(r)$ 之间的距离最小。

在希尔伯特空间内, $m_1(r)$ 和 $m_2(r)$ 之间的距离可表示为

$$d^2(m_1, m_2) = \|m_1 - m_2\|^2 = \|m_1\|^2 + \|m_2\|^2 - 2(m_1, m_2) \quad (2)$$

时移不改变信号能量,由(1)式有

$$\|m_1\|^2 = \|m_2\|^2 \quad (3)$$

这样,距离可表示成

$$d^2(m_1, m_2) = 2[\|m_1\|^2 - (m_1, m_2)] = 2[R(0) - R(s)] \quad (4)$$

其中

$$R(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} m_1(r) m_2(r-s) dr \quad (5)$$

(5)式是两个信号 $m_1(r)$ 与 $m_2(r)$ 之间的相关函数。根据 Schwartz 不等式和(1)式,显然, $s = \Delta r$ 时相关函数 $R(s)$ 取最大值,从而 $m_1(r)$ 和 $m_2(r)$ 之间的距离最小。

按照上述原理,计算对不准值 Δr ,就是幅度相关法的基本依据。显然,幅度相关法要求相邻脉冲的回波幅度具有良好的相关性。当目标回波中存在噪声,距离走动较大以及相干处理时间较长时,都会破坏回波幅度的相关性,使得幅度相关法的估计误差增大。

针对上述问题,我们提出了两种改进的距离校正方法。

方法 1 (峰值对准法) 假定目标在某一距离单元内存在有一强散射点,使该距离单元的回波采样主要由该强散射点决定。因此,只要将不同脉冲的最强回波点锁定在同一距离门,就可以对不同距离门回波分别作相位补偿,从而实现聚焦成像。当回波脉冲不具备明显的峰值时,峰值对准法就可能出现较大的估计误差。

方法 2 (直接校正法) 在希尔伯特空间中,通常定义(2)式中的两信号 $m_1(r)$ 与 $m_2(r)$ 之间的距离

$$d^2(m_1, m_2) = \int_{-\infty}^{\infty} [m_1(r) - m_2(r)]^2 dr \quad (6)$$

使(5)式中 $R(s)$ 最大,也就是使上式的距离最小。称(6)式的距离为幅度均方差

$$\sigma_1^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [m_1(r) - m_2(r)]^2 dr \quad (7)$$

这样,搜索距离对不准值可以通过直接寻找使 σ_1^2 最小的 Δr 值完成。

3. 计算分析

ISAR 成像的运动补偿就是要消除雷达与目标间相对运动带来的相位变化。可以证明^[6],只要某一距离单元内有一强散射点的回波强度高于同一单元内其他散射点强度之和 4dB,它就能作为目标的相位基准,用于运动补偿。

设 $m_n(k)$ 是来自第 k 个距离单元上目标对第 n 个脉冲的回波幅度,计算均值和均方值:

$$\begin{aligned} \overline{m(k)} &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N m_n(k) \\ \overline{m^2(k)} &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N m_n^2(k) \end{aligned} \quad (8)$$

该距离单元归一化方差

$$\sigma_2^2 = (\overline{m^2(k)} - \overline{m(k)}^2) / \overline{m^2(k)} \quad (9)$$

归一化方差 σ_2^2 取最小值的距离单元, 回波幅度起伏最小, 其相位也最稳定, 最适合于作为相位补偿基准。

我们以相邻脉冲幅度均方差 σ_1^2 和基准单元归一化方差 σ_2^2 为标准, 衡量 3 种距离校正法的优劣。 σ_1^2 的大小, 体现了距离校正的成功与否, σ_2^2 的大小直接关系到运动补偿的效果。

借助 FM-CW 雷达进行飞机模型成像试验, 获得了 6 幅独立图象。试验中的飞机模型是用于风洞试验的开 7 飞机模型, 表面覆盖铝蒙皮, 见图 1 照片所示。试验在露天场地进行, 采用雷达运动方案, 较为接近真实情况。

表 1 是对外场试验中毫米波雷达采集的原始数据使用各种距离校正方法时, 两个方差 σ_1^2 和 σ_2^2 的数值。

表 1 3 种距离校正法的方差

方差 校正法	第 1 段				第 5 段			
	第 7,8 脉冲间 σ_1^2	第 27,28 脉冲间 σ_1^2	σ_2^2	总走动数	第 7,8 脉冲间 σ_1^2	第 27,28 脉冲间 σ_1^2	σ_2^2	总走动数
幅度相关	0.983	1.580	0.120	3	1.638	1.094	0.104	6
峰值对准	1.081	1.792	0.146	5	1.676	1.094	0.087	4
直接校正	0.983	1.569	0.117	2	1.625	1.094	0.098	5

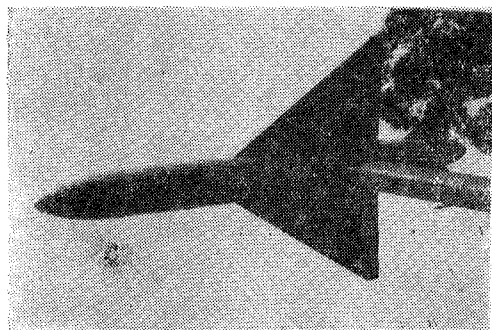
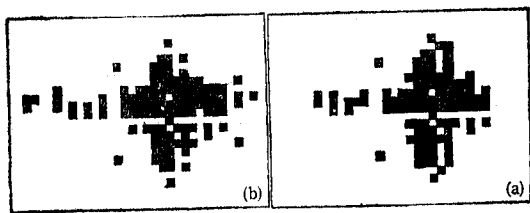


图 1 模型飞机长 3.1m, 翼展 1.64m



(a) 直接校正法 (b) 幅度相关法

图 2 第 1 段图象

比较表 1 中 3 种校正法的方差效果和距离走动总数, 幅度相关体现了距离上幅度的统计平均, 不易受噪声的影响, 对于回波幅度峰值不明显的第 1 段数据, 效果较好, 且距离走动数估计也较准确。峰值对准法却适合于具有强散射点的第 5 段数据, 且能够获得最小的基准单元归一化方差 σ_2^2 , 但对相邻脉冲间幅度方差损失较大, 尤其在回波幅度峰值不明显时, 走动数的估计有相当大的偏差。采用峰值对准法既能适应具有强散射点的第 5 段数据, 也能适应无明显峰值的第 1 段数据, 使 σ_1^2 和 σ_2^2 协调一致, 获得了最佳效果, 实现了走动数的精确估计。从文献[1]知道, 距离走动误差大于 1 个距离单元时对成像就会造成严重影响, 而直接校正法能成功避免这一误差的影响。

首先完成距离校正, 然后经过运动补偿和聚焦成像, 得到对应于第 1 段, 第 5 段回波数据的 4 帧图象, 如图 2 和图 3 所示, 每段数据由 32 个脉冲采样组成, 其中 (a) 对应于直接校正法完成距离校正, (b) 采用幅度相关法实现距离校正。4 幅图象都是经过方位加权, 门限处理和机轴对称翻转的结果。

由图 2 和图 3 可见, 强散射点多集中在机翼部分, 而机头部分散射强度较弱, 飞机的散射特性动态范围很大。采用直接校正法既能消除强散射点的影响, 又有利于保留有用而宝贵的弱象素单元, 如机头部分的象素。而幅度相关法不仅可能导致图象模糊, 且常丢失机头部分的弱象素单元。总的说来, 飞机图象清晰可辨, 有力证明了直接校正法的可行性。

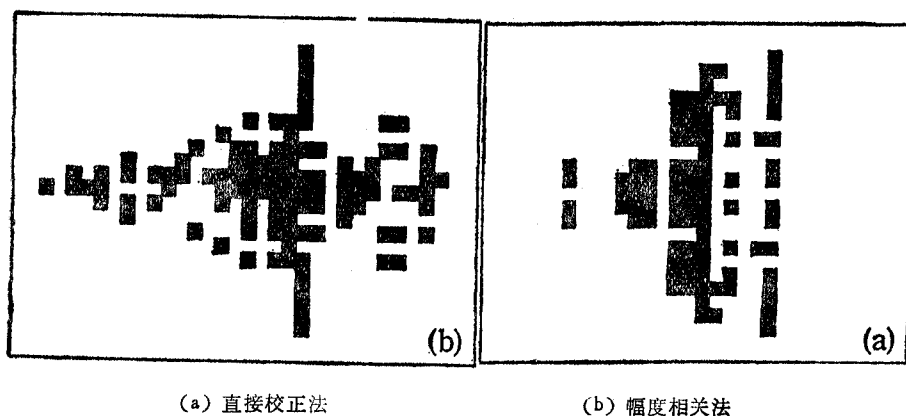


图 3 第 5 段图象

4. 结语

采用直接校正法, 具有下述优点: (1) 直接校正法既能适应于具有强散射点的目标回波, 也能适应空间缓变散射的目标回波, 对多种目标类型均表现出很强的自适应性和稳定性; (2) 直接校正法减少了运算量。不妨设距离成像区是 64 点, 幅度相关法需要 2560 次实乘法 (包括 3 次正反傅氏变换), 而直接法可以只对 32 个距离单元局部搜索 (甚至更少), 只需 2048 次实乘法; (3) 幅度相关法仅能消除距离走动, 直接法不仅能消除距离走动, 对距离弯曲也有校正作用; (4) 直接法对于距离走动大, 回波噪声强和相干处理时间长的远程卫星目标 ISAR 成像, 尤其具有良好效果。

参 考 文 献

- [1] C. C. Chen, H. C. Andrews, *IEEE Trans. on AES*, AES-16(1980)1, 1—14.
- [2] B. D. Steinberg, *Proc. IEEE*, 76(1988)12, 1578—1592.
- [3] Y. W. Chen, R. S. Berkowitz, ISAR imaging technique for seasurface target, *Proc. of the Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Ann Arbor, (1987), pp. 723—728.
- [4] D. A. Ausherman et al., *IEEE Trans. on AES*, AES-20(1984)4, 363—398.
- [5] D. Wehner, *High Resolution Radar*, Artech House, (1987), Chapter 7.
- [6] B. D. Steinberg, *Microwave Imaging with Large Antenna Arrays*, John Wiley & Sons, (1983), Chapter 9.

THE ANALYSIS OF RANGE-ALIGNMENT IN INVERSE SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGING

Pi Yiming Huang Shunji

(University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract In this paper, the basic theory of range-alignment in Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) imaging is analysed. Two new methods of range-alignment are proposed. One is peak point alignment, and another is direct range-alignment. Based on the measured radar data, the differences between the above-mentioned new methods and amplitude correlation method are discussed, resulting in the confirmation on the superiority of the direct range-alignment method.

Key words ISAR; Range-alignment; Amplitude mean variance