

UW B-SAR 成像算法中的插值方法研究*

伍宏涛 王顺华 梁甸农

(国防科技大学电子技术系 长沙 410073)

摘要 本文简单介绍了大处理角超宽带合成孔径雷达(UWB-SAR)波数域成像算法,研究了其中 Stolt 插值的内容及其必要性,提出了几种插值方法来解决其中的插值问题。最后,利用所提出的几种插值方法进行仿真,得到了较好的聚焦效果,表明所提插值方法是有效的。

关键词 UWB-SAR, 波数域成像算法, Stolt 插值

分类号 TN 959.3

Research on Interpolating Methods for UW B-SAR Imagery

Wu hongtao Wang shunhua Liang diannong

(Department of Electronic Technology, NUDT, Changsha 410073)

Abstract In this paper, the wavenumber domain algorithm for large processing-angle UW B-SAR imagery is briefly described. Then the content and necessities of Stolt Interpolation are studied. And some interpolating methods are presented to work for Stolt Interpolation. Lastly, with these methods many emulations are made and good focusing results obtained. It is clear that all methods introduced are efficient.

Key words UW B-SAR, wavenumber domain imagery algorithm, stolt interpolation

对于大处理角 UW B-SAR 而言,波数域成像算法是一种有效的成像方法,它借助插值步骤能自动校正距离迁移,并消除距离与方位耦合的影响。插值步骤一般称为 Stolt 插值,包括成像数据坐标的变换和成像数据插值两部分。 k_x-k_y 算法是在全波数域(k_x-k_y 域)内处理数据,因此必须把频率 k 变换为波数 k_x 进行处理,然后通过数据插值使其适合算法处理的要求。

传统实现插值的方法很多,但一般都有其局限性。经过分析和比较,本文采用了频率细分的方法及频移插值的方法,仿真表明它们具有很好的效果。

下文在第二节中首先简单介绍了 k_x-k_y 算法和插值的必要性;第三节在简述常用的插值技术的基础上,详细介绍了频率细分的方法及频移插值的方法;第四节对所提方法进行仿真研究,并给出了仿真结果;第五节对全文作了总结。

1 k_x-k_y 算法过程及插值必要性

k_x-k_y 算法是一种波场反演方法,由地球物理研究中地震迁移算法移植而来。它设成像地域为辐射波场,波场各点源在同一时刻激发脉冲波,并以 $C/2$ (C 为电磁波传播速度)的速度向天线传播,通过波场反演得到微波图像。尽管它按“停-走-停”的方式,但由于 C 远大于平台运动速度,故其影响可以忽略。这种方法的相位补偿是在波数域完成的,距离迁移在频域表现为相位变化,通过插值在波数域逐点精确补偿所有误差,包括因距离迁移产生的相移,即自动校正了距离迁移。

假设载机沿 X 方向运动,接收数据经过距离向脉冲压缩之后为 $d(x, z=0, t)$ (预处理后数据),

* 1998年 5月 27日修订

第一作者:伍宏涛,1972年生,硕士生

几何模型如图 1所示:

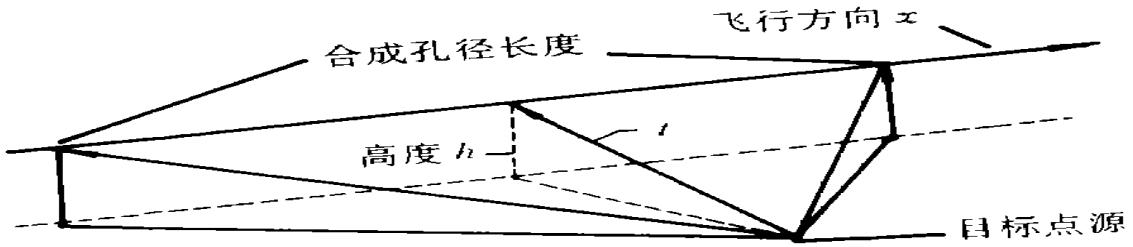


图 1 SAR系统几何模型

1) $k-k$ 算法流程如下:

- (1) 对接收数据 $d(x, z=0, t)$ 做预处理;
- (2) 作二维快速傅氏变换, 得到 $D(k_x, z, k)$;
- (3) 作坐标变换 $k_z = \sqrt{\left(\frac{2w}{c}\right)^2 - k_x^2}$ 得到 $D(k_x, z, k_z)$ 及数据插值;
- (4) 逐点乘上方位向压缩因子和正侧视倾斜因子;
- (5) 二维逆 FFT 完成成像

从上述过程可以看出, 步骤 3 完成的是将 $D(k_x, z, w)$ 变成 $D(k_x, z, k_z)$, 即将数据从 $k_x - k$ 域变换到 $k_x - k_z$ 域。它是 $k-k$ 算法的关键和核心。

2) Stolt插值的必要性

预处理之后的数据矩阵经过二维 FFT 变换, 形成一个新的数据矩阵, 矩阵的每个元素在 $k_x - k$ 域内分布是均匀的。它们的位置如图 2 所示。

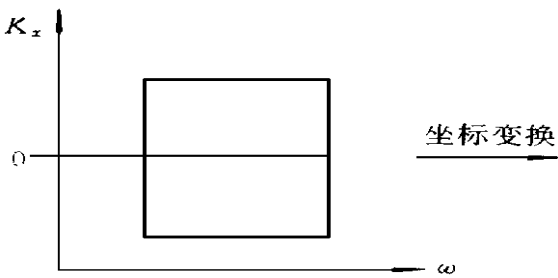


图 2

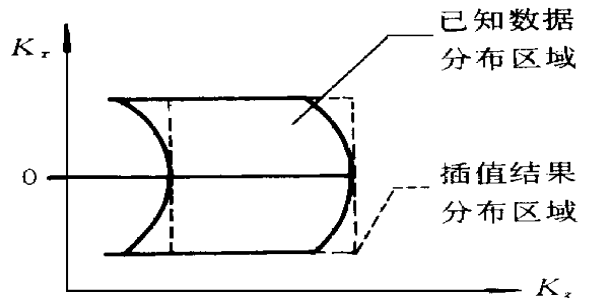


图 3

经过坐标变换之后, 对应于 $k_x - k_z$ 域内的坐标位置变化如图 3 所示。对于数据 $D(k_x, z, k_z)$ 而言, 它在 $k_x - k_z$ 域上的分布不均匀和非方形的, 方位向随着 k_x 绝对值增大对应的 k_z 值减少, 距离向随着 k 增大对应的 k_z 值分布逐渐变密。所以, 必须用插值方法求出一个均匀分布的矩形数据阵出来。我

们知道, 当 $k_x = 0$ 时, 由坐标变换公式 $k_z = \sqrt{\left(\frac{2k}{c}\right)^2 - k_x^2}$ 可知, k 所对应的 k_z 是均匀的, 我们一般取这一列 k_z 值为其他列待插的 k_z 值。在 $k_x - k_z$ 域上某个 $k_x \neq 0$ 时 k_z 的位置分布是不均匀的, 这意味着我们要在不均匀节点上插值求出均匀位置上的值。只有这样才能满足二维逆 FFT 的要求, 才能使得方位向压缩因子和倾斜因子切实有效。

坐标变换的实质是把弯曲的距离曲线变换到直线, 插值是为了使拉直后的迁移线上的采样点均匀分布且消除各种误差, 只有这样才能满足二维逆 FFT 的要求, 才能使得方位压缩因子和倾斜因子切实有效。总之, 插值步骤的实质就是精确的校正距离迁移, 使方位向积累曲线沿迁移的实际弯曲程度变化, 同时自动校正由距离变化引起的相移。如果插值结果精确, 则 $k-k$ 算法完全消除了距离向与方位向的耦合。

2 插值方法研究

为了保证一定的精度, 必须对各种插值方法进行分析。

对不均匀节点作插值, 可用拉格朗日插值、牛顿插值、样条插值等很多方法。但是经过实验仿真和分析可以得出, 这些方法都不能很好的解决本文问题。这样, 我们必须考虑另外的实现方法。

我们把待插的 k_z 值的位置变回到 $k_x - k$ 域内。通过图 4 可以清楚看到, 在 $k_x - k$ 域内已知值区间是等间距分布的。我们可以把待插的值变换到 $k_x - k$ 域, 然后再作插值, 这样比在 $k_x - k_z$ 域内作插值要容易, 并且可以利用 Sinc 函数或者降低截断误差的修正辛格函数来作插值。这里使用简便有效的多相位滤波器方法。

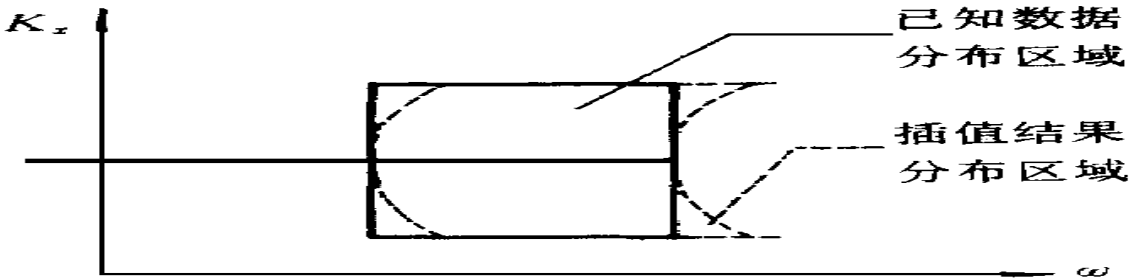


图 4

对插值公式 $k_z = \sqrt{\left(\frac{2k}{c}\right)^2 - k_x^2}$ 作近似处理。一般来讲, k_x 要比 k_z 小得多, 因此对于某个 k_x 而言, 待插的 k

$$k = \frac{c}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2} \approx \frac{c}{2} k_z + \frac{ck_x^2}{4k_z} \quad (1)$$

而由二维 FFT 变换得到的 k 值为 $\frac{c}{2} k_z$, 故在频域对每一列数据作 $\frac{ck_x^2}{4k_z}$ 大小的频移, 即可满足一定精度和快速地得到插值结果。由此, 可以推出在时域乘上频移因子 $e^{-j\frac{ak_x^2}{4R_0}}$ (R_0 表示聚焦深度) 的频移插值方法。

下面详细介绍利用多相位滤波器原理的频率细分的方法来计算待插区间的值。

第一步是通过补零, 加大采样点数。对带宽为 B 、时宽为 T 的信号 $x(t)$, 以采样率 $f_c \gg 2B$ 采样, 采样点数为 $N = f_c T \gg 2BT$, 作 N 点 FFT 变换到频域, 则相邻两点频率变化为

$$\Delta k = 2cf_c / N = 2c / T \quad (2)$$

如果我们在采样信号 $x(t_n)$ 后添加 $(l-1) \times N$ 个零, 作 lN 点的 FFT 变换到频域, 则相邻两点频率变化为

$$\Delta k = 2cf_c / (lN) = 2c / (lT) \quad (3)$$

这样, 在频域上把频谱细分了 l 份。根据这个原理, 在预处理之后, 把二维接收数据 $M \times N$ 在距离向添加 $(l-1) \times N$ 个零, 然后作 $M \times lN$ 的二维 FFT 变换, 从而在频域上把频谱细分了 l 份。

第二步根据待插点的位置寻找靠得最近的已知值位置点, 可以简单地取插值结果为该值, 适当地调整倍频率的阶数, 可以满足所给精度的要求。

对于频移插值方法需要指出的是, 在距离向脉冲压缩之后乘上频移因子的效果比在其之前乘上频移因子的效果要好。这主要是脉压之后频谱变化的原因。

3 仿真结果

根据以上论述, 可以看出, $k-k$ 算法通过插值处理完全适合 UWB-SAR 成像处理。由于计算量、

存储量等多方面原因,若采用时宽非常窄的 UW B-SAR 数据进行仿真,同样也证明了大时宽大处理角 UW B-SAR 数据的有效性,获得了很好的实验结果

仿真中取中心频率 $f_c = 350\text{MHz}$, 带宽为 $B = 300\text{MHz}$, 时宽为 $t = 250\text{ns}$, 点目标距离合成孔径中心为 $R_0 = 50\text{m}$, 载机速度 $v = 100\text{m/s}$, 方位向重复采样频率 $prf = 200\text{次/秒}$

方位理想分辨率为 2m , 利用频率细分方法, 倍频率 $k = 8$ 可以得出以下良好的点目标回波成像效果如图 5 所示。

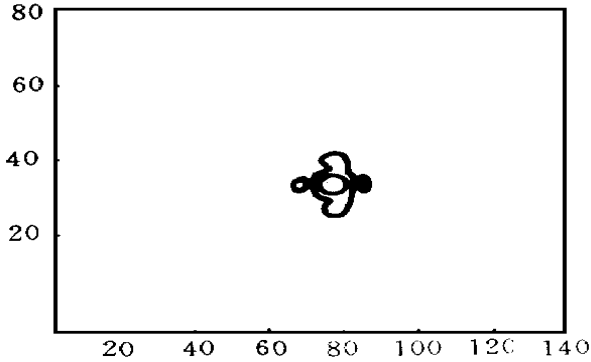


图 5 利用频率细分的方法的点目标回波成像图

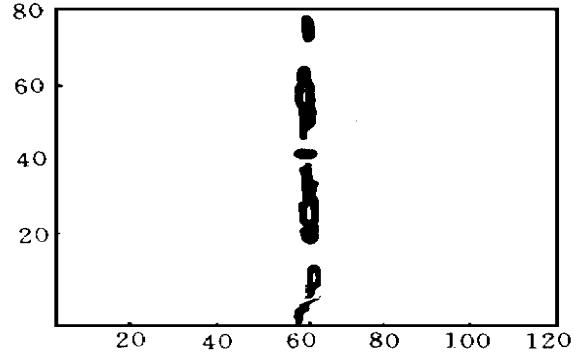


图 6 利用频移插值方法的点目标回波成像图

方位理想分辨率为 0.75m , 利用频移插值方法, 可以得出以下良好的点目标回波成像效果

4 结束语

本文针对 UW B-SAR 成像算法中的插值问题作了细致的分析和研究, 主要分析了波数域成像算法中插值的实现方法, 通过计算机仿真, 使单目标回波能够很好的在其所在位置成像。对于仿真参数, 通过两种方法的比较, 可以得到这样的结论: 这两种插值计算方法的高效性和快速性使之都能满足 UW B-SAR 实时成像的要求, 但是由于方法原理的不同而具有不同的特性。频率细分插值方法产生的成像结果旁瓣低但主瓣较宽, 频移插值方法产生的成像结果主瓣很窄但旁瓣较高。实验结果表明, 这两种插值方法简便而非常有效。

参考文献

- 1 张澄波. 综合孔径雷达原理. 系统分析与应用. 北京: 科学出版社
- 2 张直中. 微波成像术. 北京: 科学出版社
- 3 Harold F. Engler, Jr. Technical Issues in Ultrawideband radar. Journal of Electronic Defense, Jan, 1995, Supplement, 54-60
- 4 Ron Goodman, Sreenilhi Tummalakonda, Walter Carrara. Issues in Ultra-Wideband Widebeam SAR Image Formation. IEEE International Radar Conference, 1995, 479-485
- 5 C. Cafforio, C. Prati and E. Rocca. SAR Data Focusing Using Seismic Migration Techniques. IEEE Trans. on AES, 1991, 27(2): 194-206
- 6 Fowler C., Jenseninger and J. Cozm. Assessment of Ultrawideband (UWB) Technology. IEEE AES Magazine, Nov, 1990, 45-49
- 7 John W. M. Cokle. Focusing of Synthetic Aperture Ultra-Wideband Data. IEEE CH3051-0/91/0000-0001-1-5
- 8 Shane C. Bude, Paul Smith. A Geometric Analysis of Time-Normalized Ultra-Wideband Radar Signals. SPIE Vol. 1631, Ultrawideband Radar, 1992, p111-122