

# 一种有效的 UW B-SAR 成像方法<sup>\*</sup>

王顺华 黄晓涛 梁甸农

(国防科技大学电子技术系 长沙 410073)

**摘要** 在简要总结大处理角 UW B-SAR 成像处理有关难点后,本文提出将波数域成像算法( $\Omega$ -K 算法)应用于 UW B-SAR 成像处理;然后介绍了 $\Omega$ -K 算法的原理并对其中存在的 S to lt 插值等问题进行了详细分析和深入探讨;最后结合所建立的 UW B-SAR 回波模型对 $\Omega$ -K 算法进行了仿真,研究表明这种成像方法具有较好的聚焦效果。

**关键词** UW B-SAR, 波数域成像算法, S to lt 插值

**分类号** TN 959.3, TN 957.51

## An Efficient Algorithm for UW B-SAR Imagery

W ang Shunhua Huang Xiaotao Liang Diannong

(Department of Electronic Engineering NUDT, Changsha 410073)

**Abstract** After summarizing some difficulties of large processing-angle UW B-SAR imagery briefly, the wavenumber domain algorithm ( $\Omega$ -K algorithm) is used for UW B-SAR imagery in this paper. Then the theory of  $\Omega$ -K algorithm is described and the problems like S to lt Interpolating are analyzed in detail. Eventually, numerical experiments on simulated echo model are presented. All results show that this algorithm has good focusing capabilities.

**Key words** UW B-SAR, wavenumber domain algorithm, S to lt interpolating

与传统窄带 SAR 相比,工作于 UHF/VHF 波段的大处理角 UW B-SAR 成像处理显得更加困难,分析并解决成像中存在的问题以及选择有效的成像算法是 UW B-SAR 成像处理研究的主要内容。

机载 UW B-SAR 成像处理面临着诸如大距离迁移、强耦合性、空变等许多困难,必须选择能够处理和解决这些问题的成像算法才能满足要求。经过仔细分析和比较各类成像算法,我们发现波数域算法从理论上讲可以很好地解决成像问题。

波数域成像算法源于“地震偏移”方法,它是地球物理勘探中用来重建地层剖面的一种数据处理方法,它以波动方程为基础,利用地表探测器件阵所接收的自地层内向地表传播的时-空( $t-x$ )二维地震回波数据,反演出地层深处的结构。由此,我们仿照这种反射模型,建立了理论上的波数域回波模型,利用它进行了算法仿真研究。

$\Omega$ -K 算法首先要求对回波进行预处理,然后将数据变换到波数域,经过一系列处理就可得到校正了距离迁移并实现了聚焦的信号。处理中主要有两方面内容值得深入研究:(1)将 SAR 回波数据转变到波数域,其中包含了所谓的 S to lt 插值过程,是整个算法的核心;(2)选择适当的方位压缩因子,它直接决定了能否顺利实现方位向聚焦。

本文在简述了 UW B-SAR 成像处理难点和回波模型之后,介绍了 $\Omega$ -K 算法的原理及过程,然后着重于上述 S to lt 插值等两方面内容进行了分析和说明,最后借助所建模型对 LFM 体制机载 UW B-SAR 点目标回波作了处理,结果证明该算法能够较好地完成成像处理并实现聚焦。

<sup>\*</sup> 国防预研基金项目资助

1999年7月3日收稿

第一作者:王顺华,男,1970年,博士生

# 1 UW B-SAR 成像处理难点及回波信号模型

了解大处理角 UW B-SAR 成像处理难点, 对于选择合适的成像处理方法极为重要。

## 1.1 UW B-SAR 成像处理难点

大处理角和超宽带是赋予 UW B-SAR 成像处理新特点的两个前提条件, 由此给成像处理带来了许多困难, 归纳起来主要有以下几个方面的内容

(1) 大距离迁移 (Large Range Migration): 载机与目标之间相对位置的变化产生了距离迁移现象, 工作于 UHF/VHF 波段的 UW B-SAR 距离迁移相当大, 这将导致 MTRC 现象, 使得方位向处理变得相当困难 (MTRC - Motion Through Resolution Cell), 并由于不同距离的目标迁移量不等, 沿距离向变化进行方位向聚焦处理时必须适应这种差别, 从而要求采用空变的方位向参考函数

(2) 菲涅耳近似不成立: 在传统窄带 SAR 中采用菲涅耳近似后, 相位项中就只存在线性项和二次项, 而不存在距离向和方位向的耦合项, 两个方向可以分别单独处理 但在大处理角和超宽带条件下, 菲涅耳近似不再成立, 三次项或更高次项已不能忽略, 这不但导致了方位向多普勒频率变化的非线性现象, 而且使得距离向与方位向之间出现严重耦合, 加大处理复杂性和运算负担。

(3) 非矩形数据采集单元: 在一定分辨率  $d_r$  时, 波束角  $\theta$  与波长  $\lambda$  之间存在着非线性关系, 且频率越高则  $\theta$  越小。在超宽带条件下这种非线性现象更为明显 常取某一频率对应的  $\theta$  为处理角, 这样就产生了非矩形数据采集单元现象, 它将导致非正交旁瓣, 从而会降低分辨率或出现伪目标。

(4) 数据量: 这里以一定参数示例说明: 取最短斜距  $R_0 = 8\text{km}$ , 信号瞬时带宽  $B = 300\text{MHz}$  信号起始频率  $f_0 = 200\text{MHz}$  持续时间为  $t = 25\mu\text{s}$  载机速度  $V = 100\text{m/s}$  测给带宽为  $1\text{km}$ , 处理角为  $30^\circ$ , 距离向采样率  $f_s = 2B$  脉冲重复频率  $\text{PRF} = 2\text{kHz}$  则对于一个合成孔径长度的回波数据矩阵而言:

距离向采样点数:  $N_r \approx 1.8 \times 10^4$  (个);

方位向采样点数:  $N_a \approx 8 \times 10^4$  (个);

若仅考虑距离向一个点目标, 那么  $N_r \approx 1.5 \times 10^4$  (个)。

对于这样大的数据矩阵要在耦合情况下直接处理是不可能的, 这是一个非常严重的实际问题

## 1.2 回波信号模型

这里建立的模型主要是为了研究波数域成像算法, 这样可集中精力进行算法研究, 而不必过多地考虑各种偶然因素及固定相差等所造成的影响, 尤其可以避免陷入大数据量的困境。下面具体介绍点目标模型的建立及其参数符号。

首先建立如图 1 所示的自然坐标系,  $x$  方向为载机运动方向 (与速度  $V$  同向),  $r$  方向为合成孔径中心  $o$  与点目标  $P$  的连线方向, 其距离为  $R_0$ ,  $r_{\min}$  与  $r_{\max}$  为距离波门范围 (第三坐标轴方向垂直向纸里为  $x$  至  $r$  的右手系方向),  $\text{PRF}$  为脉冲重复频率, 若  $f_0$  为信号起始频率, 带宽为  $B$ , 持续时间为  $t_b$  的线性调频 (LFM) 信号, 调频斜率为  $k = B/t_b$ , 则发射信号可以用 (1) 式表示:

$$S(t) = \exp(j2\pi(f_0 t + 0.5kt^2)), \quad 0 \leq t \leq t_b \tag{1}$$

若载机在位置  $x$  且与目标距离为  $r$  时有回波延时  $t_r$  则回波信号为:

$$S_r(x, r) = W(x_0, R_0) \exp(jH_{(x, r)}) \\ = \frac{W(x_0, R_0)}{r} \exp[j2\pi(f_0(t - t_r) + 0.5k(t - t_r)^2)], \quad t_r \leq t \leq t_r + t_b \tag{2}$$

其中: 延时  $t_r = 2r/c$ ,  $r = \sqrt{R_0^2 + x^2}$ ,  $x$  为载机当前位置到合成孔径中心的距离,  $W(x_0, R_0)$  是位于  $(x_0, R_0)$  处的点目标后向散射系数

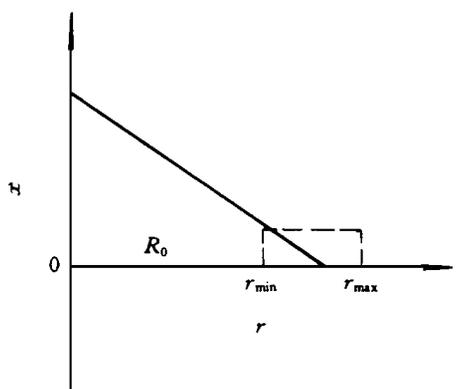


图 1 SAR 平面图

上面采用的是“停-走-停”模式,它认为载机的脉冲发射和地域回波接收都是在静止状态下完成的,只要载机运动速度  $V$  远小于电磁波传播速度  $C$ ,就可以使用这种模式

既然机载 UW B-SAR 成像处理面临着诸如大距离迁移、强耦合性、空变等许多困难,必须选择能够处理和解决这些问题的成像算法才能满足要求。而从下文的  $\Omega$ - $k$  算法可以看出它无需利用距离——多普勒观点,所以不存在多普勒近似所带来的问题;在二维域进行方位向处理又能够解决耦合问题;最重要的是它通过在波数域的精确内插很好地解决了距离迁移带来的问题。该算法通过将回波数据变换到二维波数域而使得成像区域内的所有的目标都具有相同的距离迁移特性,从而能够对所有目标同时精确成像。这里数据变换到二维波数域需要完成二维 FFT 及 S to It 插值两个过程,其中后者还包括了坐标变换和逐点精确插值两项内容,这必然增大了计算量,这是一种代价,然而这种代价与获得大区域同时精确成像的能力相比,是非常值得的,许多算法即使付出了同样的计算量也难以获得这一优点。可见, $\Omega$ - $k$  算法比较适合于 UW B-SAR 成像处理。

## 2 $\Omega$ - $k$ 算法

本节首先简单介绍  $\Omega$ - $k$  算法的原理和成像过程,然后对存在的问题进行较深入的分析 and 探讨以解决将它用于 UW B-SAR 成像处理理论上的问题。

### 2.1 算法模型及原理

成像就是根据回波数据估计成像区域内各点的后向散射系数幅度值。波数域算法回波模型一般建立如下:设成像区域为一辐射波场,波场内各点源在同一时刻  $t = -2z_0/c$  激发脉冲波 ( $z_0$  为聚焦距离),并以  $c/2$  的速度向  $z = 0$  处的各采样点传播,由于  $c$  值恒定,这一模型产生的回波数据将准确复现反射波场,实现成像。

为了方便研究  $\Omega$ - $k$  算法,通常用  $z$  表示聚焦距离并用它代替图 1 中的距离  $r$ ,这样假设位于  $(z_0, x_0)$  处的点目标具有后向散射系数  $W_{(x_0, z_0)}$ ,于是可将回波表示为:

$$S_{r(x, r)} = W_{(x_0, z_0)} \exp [j\omega(t - f) + \pi k(t - f)^2] \quad k \leq k_0 \leq k_1 \quad (3)$$

这时  $f = 2R(x, x_0)/c$  仍表示双程延时,  $S_{r(x, r)}$  实际是  $z = 0$  位置的波场。

设  $z = z_N$  点为成像区域中心,即参考聚焦距离选为  $z = z_N$ ,这样  $\Omega$ - $k$  算法的原理及处理过程叙述如下。

对于位于  $(x_0, z_0 + z_N)$  点目标回波,要进行两个方向的聚焦处理,距离向参考函数为发射信号的相应延时,采用脉冲压缩方法处理,方位向处理较复杂,是  $\Omega$ - $k$  算法的主体部分。(3)式回波经空不变脉压处理后得到  $z = 0$  位置波场采样的  $x$ - $t$  域表达式: (为了便于区分记号,用  $d$  代替  $S_r$ )

$$d_{r(x, t, z)} = \frac{W_{(x_0, z_0 + z_N)}}{2x_A} \text{sinc} [k_x(t - f)] \exp(-jk_0 t), \quad -x_A \leq x - x_0 \leq x_A \quad (4)$$

其中:  $2k_x = 2\pi B$ ,  $f = \frac{2(z_0 + z_N)^2 + (x - x_0)^2 - z_N^2}{c}$ ,  $2x_A$  为合成孔径长度

然后进行方位向处理,先将上述信号变到  $x - k$  域,再使用相位驻定原理变到  $k_x - k_z$  域:

$$D(k_x, k_z, z=0) = A W_{(x_0, z_0 + z_N)} \exp[-j((z_0 + z_N) \sqrt{4(k_x + k_0)^2/c - k_x^2} - (2(k_x + k_0)z_N/c - k_x x_0))] \quad (5)$$

$k_x \approx \frac{x_A k_0}{z_N A}$ ,  $-K_x \leq k_x \leq K_x$ ,  $-k_0 \leq k_z \leq k_0$ , 所有与成像关系不大的项均纳入  $A$  中。

接着令  $k_z = 2k_0/c$  并利用  $k_x + k_0 = 0.5c \sqrt{(k_x + k_z)^2 + k_x^2}$  变到  $k_x - k_z$  域:

$$D(k_x, k_z, z=0) = A W_{(x_0, z_0 + z_N)} \exp[-j(z_0 + z_N)(k_x + k_z)] \exp[j(\frac{2k_x}{c} z_N + k_0 z_N - k_x x_0)] \quad (6)$$

再乘上方位压缩因子:

$$F(k_x, k_z) = \exp[-jN(\frac{2k_x}{c} - k_z)] \quad (7)$$

最后对于聚焦距离  $z_N$  利用 IFFT 将  $D(k_x, k_z, z=0)$  变换回  $x$ - $t$  域得重建波场 (即求  $t = -2z_N/c$  时刻的波场):

$$d(x, z, t = -\frac{2z_N}{c}) = A W_{x_0 z_0 z_N} \text{sinc}[\frac{2k_x}{c}(z - (z_0 + z_N))] \text{sinc}[2K_x(x - x_0)] \tag{8}$$

其包络即为最终成像结果,且从(8)式可以看出在两个方向都是  $\text{sinc}(x)$  函数包络形式,故其分辨力都分别由发射信号带宽  $B$  和空域带宽  $K_x$  决定,或者说图象质量仅由发射信号及合成孔径长度决定,所有的相位误差(包括大距离迁移及其影响)都被消除了。

如果不是单个点目标,而是一片成像区域:  $x = (-x_A \rightarrow x_A)$ ,  $z = (z^N - z^A \rightarrow z^N + z^A)$ ,则重建波场只需在  $x$  及  $z$  对(8)式积分即可:

$$d(x, z, t = -\frac{2z_N}{c}) = A \int_{-x_A}^{x_A} \int_{-z_A}^{z_A} W_{x_0 z_0 z_N} \text{sinc}[\frac{2k_x}{c}(z_a - z_0)] \text{sinc}[2K_x(x - x_0)] dx_0 dz_0 \tag{9}$$

至此,从算法原理可以看出,它的一般处理过程就是:预处理回波数据(将运动补偿后的数据进行距离向匹配滤波)——二维傅氏变换——坐标变换(Slot插值)——乘以方位压缩因子——二维傅氏逆变换,其中最重要的问题是:坐标变换及方位向压缩因子的选取。

### 2 2 问题分析

坐标变换及方位向压缩因子的选取是决定聚焦成败的关键,必须仔细研究

#### 2 2 1 坐标变换

数据从  $k_x - k$  域变换到  $k_x - k_z$  域,意味着将坐标  $k$  变成  $k_z$ ,相应的回波数据必须通过精确的内插才能实现,这就是 Slot插值的由来和具体内容。其必要性有二:(1)  $k$  与  $k_z$  之间不是线性关系,均匀的  $dk$  将导致不均匀的  $dk_z$ ,但为满足 FFT 处理的均匀采样要求,必须将数据插值到均匀变化的  $k_z$  域中去,(2)从图 2至图 3(阴影部分表示理论上不为 0的数据)可以看到经坐标变换后,在数据矩阵中,同一  $k_z$  对应的数据位置随  $k_x$  变化而不再呈一直线,而是沿一双曲线分布,且在图 3右上角和右下角缺少了数据,这就不得不通过插值来弥补这些数据并校正其位置,以使得数据阵中对应于同一  $k_z$  的所有数据位于同一列中。

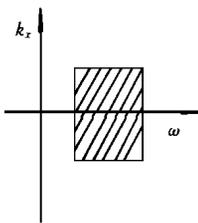


图 2

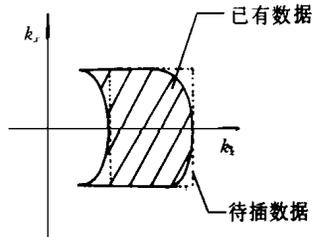


图 3

#### 2 2 2 方位向压缩因子的选取

这是一个随聚焦距离变化的复数因子(又叫聚焦因子),在 UW B-SAR 成像处理中显得尤其重要,它的表达式见(7)式,关于它的详细推导可参见文献[6]在选择方位向压缩因子时,有两个问题需要注意:一是如果逐点改变聚焦距离而采用不同的聚焦因子会加大计算量,但如果采用统一的聚焦因子,对于较大区域成像,那些具有同样后向散射系数而位于不同距离上的目标,成像后幅度会引起差别,甚至散焦,因此,为减少这种影响而又不致计算量太大,可选择适当的聚焦距离变化间隔,比如  $1m$ ,  $4m$ ,  $10m$  等,只要同样后向散射系数而成像幅度差别不明显且不散焦即可。另一问题是距离向脉冲压缩预处理对方位向聚焦距离选择的影响,其表现在于对处在  $R_0$  的点目标,则最佳聚焦距离并不是  $R_0$  而是在  $R_0 - 0.5c\tau$  处,原因在于进行距离向脉冲压缩时使用了延时因子,其延时值等于  $\tau$ ,这样根据辐射模型可知对应距离变化为  $0.5c\tau$ ,为消除它的影响就必须对聚焦距离作相应的调整,即将聚焦距离  $R_0$  减少  $0.5c\tau$ ,否则会降低分辨力。

弄清了  $\Omega - K$  算法的原理和实现思路,并解决了上述几个问题之后,就可以结合所建立的 UW B-SAR 点目标模型进行算法仿真研究以证明上述结论的正确性和方法的有效性。

### 3 计算机仿真研究

本节主要利用所建模型对  $\Omega$ - $K$  算法进行仿真,各参数分别为:起始频率  $f_0=200\text{MHz}$ , 带宽为  $B=300\text{MHz}$ , 时宽为  $t_p=0.1\mu\text{s}$ , 点目标距离合成孔径中心为  $R_0=300\text{m}$ , 载机速度  $V=100\text{m/s}$ , 方位向采样频率  $\text{PRF}=20\text{Hz}$ , 方位向理论分辨力为  $2\text{m}$ , 处理角  $\theta=8.5^\circ$ , 聚焦距离为  $485\text{m}$ , 插值方法使用多相位滤波器方法。我们对一个和五个点目标的情况进行了仿真(沿方位向三个点相距  $5\text{m}$ , 沿距离向三个点相距  $2\text{m}$ ), 结果示于图 4~图 7 中, 所有平面坐标分别表示距离向和方位向采样点数, 高度坐标表示后向散射系数幅度。其中图 4 示意的是单个点目标预处理后(仅距离向脉压之后)的等高线图, 数据值较大的地方则曲线密集, 可以看到数据在方位向的轨迹是沿一曲线分布的, 这就是距离迁移现象; 图 5 示意的是单个点目标利用  $\Omega$ - $K$  算法处理之后的立体图, 其聚焦效果是非常明显的, 它的等高线图示于图 6 中, 可以看到点目标的聚焦情况; 图 7 画的是五个组成“十”字的点目标聚焦后的等高线图, 五个点都被显著地区分开了。

从仿真结果可以看出我们所选用的  $\Omega$ - $K$  算法对于 UWB-SAR 成像具有很好的效果, 而且能达到较高的分辨力。在仿真中的方位向并没有采用更大的处理角, 这是由于处理角的增大会导致数据量的倍增; 此外, 脉冲持续时间  $t_p$  仅取  $0.1\mu\text{s}$ , 这也是为避免较大的数据量。

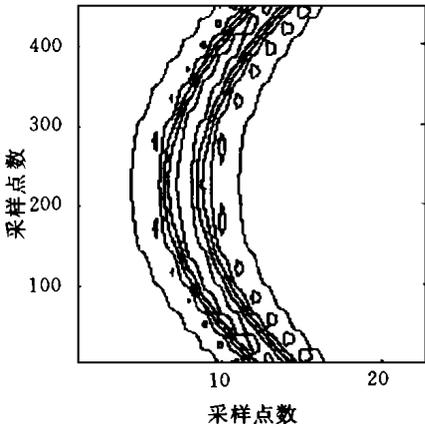


图 4 经距离向脉压

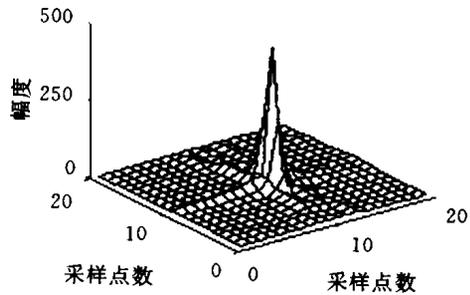


图 5 两个方向均聚焦

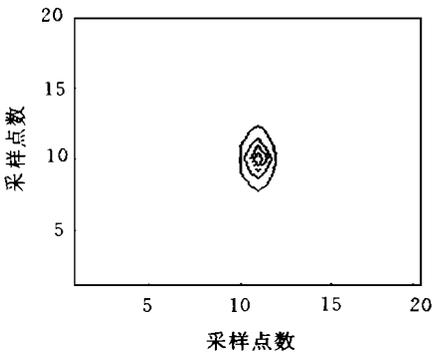


图 6 单点目标聚焦后等高线图

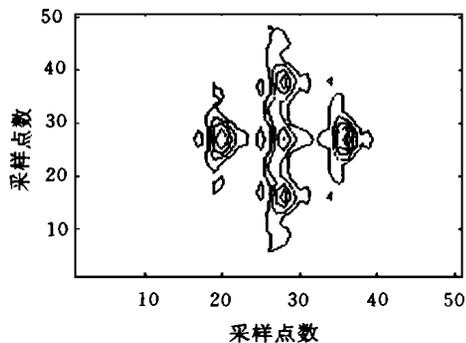


图 7 五个点目标聚焦后等高线图

### 4 结束语

前面主要简单地总结了 UWB-SAR 成像处理中的困难; 然后根据其工作原理建立了适合于计算机仿真的回波信号模型; 接着在介绍了波数域成像算法 ( $\Omega$ - $K$  算法) 的原理之后, 对其中存在的 Stolt 插值等问题进行了详细分析和深入探讨。在此基础上将该算法引用到 UWB-SAR 成像处理中来, 从理论上

扼要地分析了其有效性;最后结合所建立的回波模型对  $\Omega$ - $K$  算法进行了仿真,研究表明这种成像方法具有较好的聚焦效果

当然,为对所有目标同时高分辨成像,该算法必须逐点精确插值以校正聚焦深度带来的空变距离迁移影响,这必然增大了计算量.不仅如此,二维 FFT 及距离向匹配滤波等处理过程都会导致更大的数据量,这也会增大计算量.但是,这些计算量代价是有价值的,而且可以采用一些有效的办法降低数据量,进而降低数据量.作者在另文中已对此做了详细叙述.需要指出的是:其它许多算法(如距离—多普勒算法等)尽管不必插值,因而它们也就无法实现大区域高分辨成像,往往需要采取一些特殊办法以校正距离迁移的影响,与  $\Omega$ - $K$  算法相比,这些改进的算法就没有了任何计算量优势,作者也已对此做了详细叙述,并比较了各类成像算法

## 参考文献

- 1 张直中.微波成像术.北京:科学出版社,1990
- 2 张澄波.综合孔径雷达.北京:科学出版社,1989
- 3 林茂庸,柯有安.雷达信号理论.北京:国防工业出版社,1981
- 4 Chaenbout J.F. Imaging the Earth Interior Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985
- 5 Wehner D.R. High Resolution Radar. Norwood, MA: Artech House, 1987
- 6 Cafforio C, Prati C, Rocca F. SAR data focussing using seismic migration techniques. IEEE Trans on Aero and Ele Sys, 1990, 27: 194-207
- 7 Chia lin Wu, Michael Jin. Modeling and a Correlation Algorithm for Spaceborne SAR Signals. IEEE Trans on Aero and Elec Sys, 1982, 18: 563-573
- 8 Richard Baner. A Comparison of Range-Doppler and Wave number Domain SAR Focusing Algorithms. IEEE Trans on GRS, 1992, 30: 706-713
- 9 Stolt R.H. Migration by Fourier Transform. Geophysics, 1978, 43: 23-48