

# 复像分析中 TSA 算法的二维扩展

杨正龙, 方大纲

(南京理工大学毫米波技术实验室, 江苏南京 210094)

摘要: 本文通过相位解模糊技术, 将雷达成像中复像分析的基本算法—两散射点算法(TSA)扩展到二维空间, 并综合利用一维 TSA 算法的思想, 对仿真的结果进行了分析。

关键词: 雷达成像; 复像分析; 二维相位解模糊; 两散射点算法

中图分类号: TN957.51 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2003)05-0756-03

## Two-Dimensional Two-Scatterer Algorithm for Complex-Image Analysis

YANG Zheng-long, FANG Da-gang

(Millimeter Wave Technique Laboratory of Nanjing University of Science and Technology Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: 2-D Two-Scatterer Algorithm(TSA) is developed which is useful for further research about radar target identification based on the 2-D complex image analysis. The approach combines the 2-D phase unwrapping method with 1-D TSA. The simple simulation result with the influence of noise is presented for illustrating the application of the 2-D TSA.

Key words: radar image; complex image analysis; 2-D phase unwrapping; TSA

### 1 引言

在现代雷达成像应用当中, 一般利用雷达的一维或二维幅度像来判断所探测目标的位置、强度等属性, 在这种情况下, 雷达像的相位信息被忽略了. 为了对目标作更细致的分析, 获得更多的目标信息, 应综合利用目标雷达像的幅度与相位信息, 使得分析的结果更加准确, 这就是近来发展起来的复像分析方法<sup>[1]</sup>. Mark Resource 公司在对此进行了深入研究<sup>[1]</sup>. 文献[1]中的复像分析方法是基于对二维雷达像进行一维划分(Image cuts)的基础上的, 在对雷达像进行区域分析时, 需要对该区域进行多次划分, 为了可以在二维空间中直接进行复像分析, 避免繁复的划分过程, 本文利用二维相位解模糊技术和一维 TSA 算法的基本思想, 提出了二维两散射点算法(TSA), 此算法是复像分析的基本算法, 对于复像分析的后续研究具有重要意义. 为了对二维 TSA 算法进行验证, 我们进行了相应的仿真和解释.

### 2 一维 TSA 算法简介

考虑两个不同频率信号的合成信号:

$$S(t) = A_1 \exp[j(\omega_1 t + \phi_1)] + A_2 \exp[j(\omega_2 t + \phi_2)] \\ = A_1 \exp[j(\omega_1 t + \phi_1)] \{1 + a \exp[j(\omega_2 t + \phi)]\} \quad (1)$$

这种形式的信号可以与目标的频率响应与多普勒频率响应对应起来. 合成信号的幅度为:

$$Amp = A_1 [1 + a^2 + 2a \cos(\omega_2 t + \phi)]^{1/2} \quad (2)$$

它是周期为  $1/|\omega_2 - \omega_1|$  的周期函数, 其中  $a = A_2/A_1$ . 当  $t + \phi =$

$(2n+1)\pi$  时, 幅度最小. 如果幅度函数中两个相邻的最小值之间的时间跨度为  $t_{12}$ , 那么两个信号之间的频率间隔为  $1/t_{12} = \pm 1/t_{12}$ , 求得  $\omega_2 - \omega_1$  后, 就可以获得  $\phi$ ; 由幅度最大值与最小值的比值  $a_{12}$ , 可以得到较弱频率分量与较强频率分量之间的相对强度  $a = (a_{12} - 1)/(a_{12} + 1)$ .

为了获得合成信号的频率分量的位置, 首先对合成信号的相位进行解模糊处理, 注意到式(1)中的  $\exp[j(\omega_1 t + \phi_1)]$  相位因子, 在相位解模糊后, 其相位函数为一斜率为  $\omega_1/2$ , 截距为  $\phi_1/2$  的直线. 整个合成信号的相位函数为在此直线上叠加了由  $\{1 + a \exp[j(\omega_2 t + \phi)]\}$  引起的相位  $\phi(t)$ .

$$\phi(t) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}\{1 + a \exp[j(\omega_2 t + \phi)]\}}{\text{Re}\{1 + a \exp[j(\omega_2 t + \phi)]\}} \right\} \quad (3)$$

相位的斜率代表信号的频率, 其整体斜率由较强的频率分量决定, 对合成信号幅度、相位斜率进行综合分析, 就可以确定合成信号中不同的频率分量的属性<sup>[1]</sup>. 对于单频信号, 很显然, 其幅

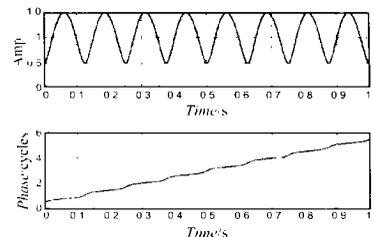


图1 合成信号的幅度、相位分布

度为常数, 相位函数为一一直线, 其斜率表示信号的频率.

设  $\omega_1/2 = 5$ , and  $\omega_2 = -3$ ,  $A_1 = 1$ ,  $A_2 = 0.5$ , 合成信号的幅度、相位如图1所示, 幅度函数中两个相邻的最小值之间的时间间隔为 0.125. 则  $|\omega_1 - \omega_2| = 8$ , 相位的整体斜率为 5, 则

较强信号的频率为 5,  $a_{12} = 1.5/0.5 = 3$ , 则较弱信号与较强信号的幅度比为  $(3 - 1)/(3 + 1) = 0.5$ , 较弱信号的频率为  $5 \pm 8$ , 符号的选取由相位函数决定, 此处取负号, 可得较弱信号的频率为 -3. 符号选取的具体方法见文献[1].

### 3 二维相位解模糊

在对雷达像进行复像分析时, 雷达像的相位要经过解模糊处理, 如果要在二维空间进行复像分析, 就要利用二维的相位解模糊技术<sup>[2]</sup>. 对于一维的相位函数, 可以对相位的梯度进行积分来解模糊. 这一思想可以扩展到  $N$  维空间中, 假设已知某一初始点  $r_0$  处的相位  $\phi(r_0)$ , 那么在其他点  $r$  处的相位为:

$$\phi(r) = \int_C \nabla \cdot dr + \phi(r_0) \quad (4)$$

$C$  表示  $N$  维空间中连接  $r_0$  和  $r$  的任意一条路径, 为相位的梯度. 在一定的条件下, 式(4)的积分结果是与积分路径无关的. 当信号中有噪声干扰时, 相位函数中就会出现奇点, 需要选择合适的积分路径来去除奇点的影响, 文献[2]中介绍了两大类二维相位解模糊的方法: Path Following 算法和最小范数法, 它们各有利弊. 为了验证二维 TSA, 本文利用其中介绍的 Gold-Stein's Branch Cut 方法来处理二维的相位解模糊.

### 4 二维 TSA

如同一维 TSA 的分析过程, 我们考虑如下的二维信号:

$$\begin{aligned} S(K_u, K_v) &= A_1 \exp[j(K_u u_1 + K_v v_1)] + A_2 \exp[j(K_u u_2 + K_v v_2)] \\ &= A_1 \exp[j(K_u u_1 + K_v v_1)] \{1 + a \exp[j(K_u(u_2 - u_1) + \\ &\quad K_v(v_2 - v_1))]\} \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $u$  和  $v$  分别代表信号在  $K_u$  和  $K_v$  方向上的频率, 为了方便起见, 略去信号的初始相位. 此信号的合成幅度为:

$$Amp = A_1 \{1 + a^2 + 2a \cos[K_u(u_2 - u_1) + K_v(v_2 - v_1)]\}^{1/2} \quad (6)$$

如同一维 TSA 算法所描述的, 幅度函数是二维空间的周期函数. 在  $K_u$  和  $K_v$  方向上的周期分别为  $1/(u_2 - u_1)$ ,  $1/(v_2 - v_1)$  当  $K_u(u_2 - u_1) + K_v(v_2 - v_1) = (2n + 1)\pi$  时, 幅度最小. 如果沿着  $K_u$  和  $K_v$  方向上, 幅度函数中两个相邻的最小值之间的跨度分别为  $K_{u12}$ ,  $K_{v12}$ , 那么在沿着  $K_u$  和  $K_v$  方向上, 两个信号之间的间隔分别为  $\pm 1/K_{u12}$ ,  $\pm 1/K_{v12}$ . 由幅度最大值与最小值的比值  $a_{12}$ , 可以得到较弱频率分量与较强频率分量之间的相对强度  $a = (a_{12} - 1)/(a_{12} + 1)$ .

对于合成信号的相位, 经过了二维相位解模糊之后, 公式

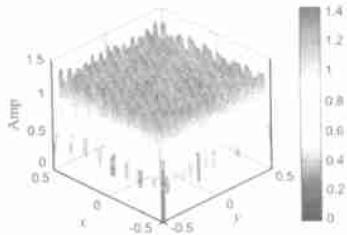


图2 两个散射点的二维空间响应

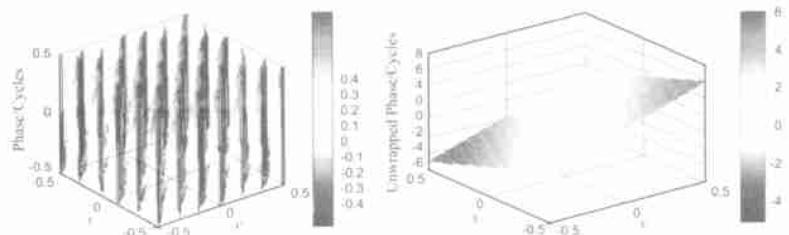


图3 两散射点的二维解模糊相位分布

(5) 中的  $\exp[j(K_u u_1 + K_v v_1)]$  相位因子的相位函数为一平面, 其沿着  $K_u$  和  $K_v$  的斜率表示了  $u_1$  和  $v_1$ , 而合成信号的相位是在此平面上叠加了由  $\{1 + a \exp[j(K_u(u_2 - u_1) + K_v(v_2 - v_1))]\}$  引起的相位变化综合而成, 相位函数沿着  $K_u$  和  $K_v$  的整体斜率由较强的信号分量决定, 通过对合成信号的幅度、相位函数进行类似于二维 TSA 的分析, 可以确定在二维空间的频率. 在下一节中利用仿真的结果来做更清楚的解释.

### 5 雷达信号的二维 TSA 仿真

二维雷达信号与式(5)有类似的形式, 以 ISAR 成像为例, 雷达接收的信号为<sup>[3]</sup>:

$$\begin{aligned} G(X, Y) &= \int_x \int_y g(x, y) \exp[j2\pi(Xx + Yy)] + u_n(X, Y) \\ &\quad X = 2f \sin \theta / c, \quad Y = 2f \cos \theta / c \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $g(x, y)$  表示目标空间的散射强度分布,  $f$  为频率,  $\theta$  为 ISAR 成像旋转角度,  $c$  为光速.  $u_n(X, Y)$  为二维空间均匀分布的噪声. 在目标空间, 假定两个散射点目标的位置分别为  $\{5, 6\}$ ,  $\{-3, -8\}$ , 幅度分别为  $\{1\}$ ,  $\{0.5\}$ . 为了计算的方便和方便地观察相位斜率, 取的范围均为  $[-0.5, 0.5]$ , 并定义信噪比如下:

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\int_x \int_y G(X, Y) G(X, Y)^* dYdX}{\int_x \int_y u_n(X, Y) u_n(X, Y)^* dYdX}$$

其中  $*$  表示信号的共轭. 当  $SNR = 27$  时, 在  $X, Y$  空间得到的响应如图 2 所示.

通过二维 TSA 对上述的幅度相位分布进行分析, 可以得到散射点的位置, 强度等属性. 为了得到两散射点的相对强度, 对图 2 的结果经过一维中值滤波器(滑动窗为  $9 \times 9$ )的平滑处理, 幅度最大值与最小值的比值  $a_{12} = 1.3/0.4 = 3.25$ , 较弱频率分量与较强频率分量之间的相对强度  $a = (a_{12} - 1)/(a_{12} + 1) = 0.53$ , 在沿着  $X$  方向上, 共有 8 个波峰, 沿着  $Y$  方向上, 共有 14 个波峰, 而  $X, Y$  的范围均为  $[-0.5, 0.5]$ , 由此可知在  $X$  方向上, 两个散射点的间隔为  $8 = |5 - (-3)|$ , 在  $Y$  方向上, 两个散射点的间隔为  $14 = |-6 - (-8)|$ . 并且波峰线在  $X - Y$  平面上的斜率为  $14/8$ , 即波峰线的方向与两个散射点的连线方向一致.

为了得到两个散射点的二维位置, 对图 2 所示的二维相位分布作二维的相位解模糊后, 二维相位分布如图 3 所示. 相位沿  $X$  和  $Y$  方向的分布分别为图 4、图 5 所示.

对于图 4 和图 5 所示的结果, 可利用一维 TSA 算法来分

析. 图 4 中相位曲线的整体斜率约为 5, 表示较强散射点的位置, 由一维 TSA 算法可得到较弱散射点的位置约为 -3. 同样, 由图 5 可得到两个散射点的位置, 较强的约为 6, 较弱的约为 -8.

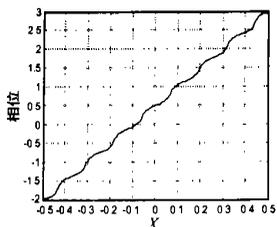


图 4 沿 X 方向的相位分布

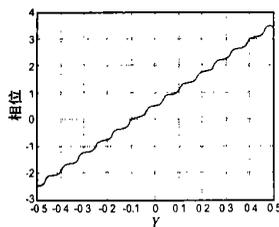


图 5 沿 Y 方向的相位分布

## 6 结论

从所作的仿真结果来看, 通过二维相位解模糊, TSA 算法可以扩展到二维空间, 综合利用一维 TSA 算法, 可以得到散射点的强度、位置等属性, 并可简化复像分析中的某些算法, 避免繁复的划分. 利用这一方法来分析雷达像中感兴趣的区域, 可判断区域中有一个或者多个散射点, 进一步利用文献[1][5]中的分析方法, 得到散射点的基本属性, 这对于目标识别方面的研究很有意义.

### 参考文献:

- [ 1 ] August W Rihaczek ,et al. Radar Resolution and Complex Image Analysis [M]. Boston London :Artech House ,1996.
- [ 2 ] Dennis C Ghiglia ,Mark D Pritt. Two-Dimensional Phase unwrapping

Theory ,Algorithms and Software [M]. USA :John Wiley & Sons ,Inc. 1998.

- [ 3 ] D L Mensa. High Resolution Radar Cross-Section Imaging [M]. Norwood ,MA :Artech House Artech ,1991.
- [ 4 ] August W Rihaczek ,Stephen J Hershkowitz ,et al. CRISP ,Complex Radar Image and Signal Processing ,Software and user 's manual [M]. Boston London ,Artech House ,2000.
- [ 5 ] August W Rihaczek ,et al. Theory and Practice of Radar Target Identification [M]. Boston London :Artech House ,2000.

### 作者简介:



杨正龙 男,1976 年生,甘肃临洮人,1997 年获得南京理工大学电磁场与微波技术专业学士学位,2002 年获得南京理工大学电磁场与微波技术专业工学博士学位,现于南京电子技术研究所攻读博士后,主要研究方向为雷达散射截面的计算,雷达目标特征建模,目标检测和识别,以及相应的软件开发.



方大纲 男,1937 年生,上海人,1966 年北京邮电学院研究生毕业,1980 - 1982 年为加拿大两所大学访问学者,1986 年任南京理工大学教授,1987 年起曾任加拿大、香港六所大学访问教授,现为 IEEE Fellow,中国电子学会会士,IEEE 高级会员,IEEE Trans. MTT 杂志编委,主要研究方向为电磁场数值计算,微波信息处理,电磁散射和目标特性等. 共出版教材、专著各一本,国际专著两章,发表论文 300 多篇.