

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^[1]。Mark Resource 公司在对此进行了深入研究^[1]。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:

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

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

$(2n+1)\pi$ 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 ω_2 后, 就可以获得 ϕ ; 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^[1]。对于单频信号, 很显然, 其幅度为常数, 相位函数为一

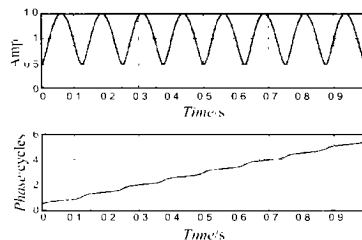


图1 合成信号的幅度、相位分布

相位函数为一斜率为 $\omega_1/2$ 的直线, 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 ± 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^[2]. 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:

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

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 Goldstein'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:

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

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:

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

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

(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^[3]:

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

其中 $g(x, y)$ 表示目标空间的散射强度分布, f 为频率, 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:

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{\int \int |G(X, Y)|^2 dX dY}{\int \int |u_n(X, Y)|^2 dX dY}$$

其中 $*$ 表示信号的共轭. 当 $\text{SNR} = 27$ 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 的结果经过一中值滤波器 (滑动窗为 9×9) 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

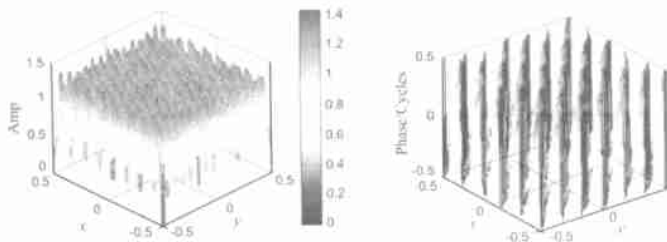


图 2 两个散射点的二维空间响应

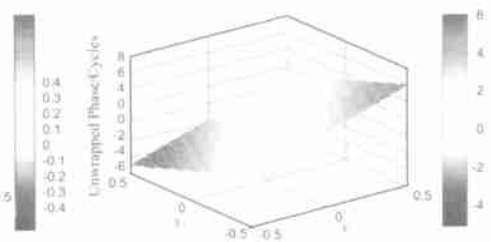


图 3 两散射点的二维解模糊相位分布

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.

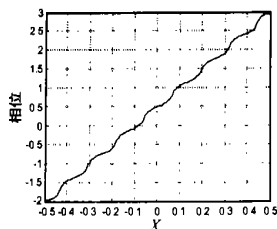


图 4 沿 X 方向的相位分布

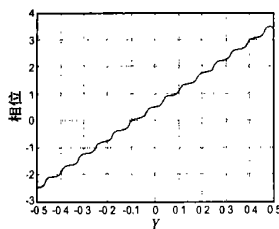


图 5 沿 Y 方向的相位分布

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.