

基于单频连续波的无源雷达成像研究

刘玉春* 王 俊 杨 杰 王海环 陈朝焰
(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 该文提出一种新的单频连续波无源雷达成像时域算法。该算法先建立信号匹配矩阵,再将接收到的回波信号拓展为回波信号矩阵,然后将信号匹配矩阵和回波信号矩阵的 Hadamard 积在时间维上求和,实现回波信号的匹配积累,得到散射点目标的像。给出了算法成像分辨率,分析了影响成像质量的因素并综合得到算法聚焦能力的量度。算法完全在时域中进行成像处理,避免了频域的插值处理。在理论分析的基础上,仿真实验得到了较好成像结果,验证了所提算法有效性。

关键词: 雷达成像; 无源成像; 单频连续波; 匹配积累

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)05-1108-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01148

Research of Passive Radar Imaging Based on Single-frequency Continuous Wave

Liu Yu-chun Wang Jun Yang Jie Wang Hai-huan Chen Zhao-yan
(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel passive radar imaging time-domain algorithm is presented based on single-frequency continuous wave. The signal matched matrix is builded firstly, and the echo signal is expanded into a echo signal matrix. Finally the sum in time dimension of the Hadamard product of the signal matched matrix and the echo signal matrix can be got. Then the echo signal matched integration is implemented and the scattering points are focused. The algorithm resolution and factors of affecting the imaging quality are analyzed. The algorithm is performed in time domain and the interpolation in frequency domain is avoided. Based on the theoretical analysis, simulation experiment confirms the validity of the proposed algorithm.

Key words: Radar imaging; Passive imaging; Single-frequency continuous wave; Matched integration

1 引言

无源雷达成像系统具有配置灵活、静默接收、隐蔽性强等优点,在战场上能够有效避免敌方反辐射导弹摧毁和电磁干扰,并且具有一定的反隐身能力,具有较好的军事应用前景^[1]。作为常规雷达成像技术的一大扩展,无源雷达成像技术现在越来越受到人们的关注。无源雷达外辐射源来源较为广泛,而外辐射源的选择会对成像方法产生重大影响。比如可以选用导航卫星信号为外辐射源^[2-4],由于其信号带宽较大(比如Galileo E5 信号带宽约为20 MHz)且卫星处于运动状态,所以可以采用双基SAR成像方法进行成像。另外,也可以选用地面的广播、电视等信号作为外辐射源,相对来说,由于其信号带宽较小(比如广播信号为15 kHz带宽,而电视信号也仅为6 MHz带宽),并且发射机静止,故而必须采

用新的成像方式。本文主要针对后者进行研究。依利诺斯大学选用电台和广播电台作为外辐射源研究了双基地无源成像方法和系统配置对成像质量的影响^[5]。文献[6]通过对回波信号分析,得到了目标散射分布函数和雷达接收信号之间的傅里叶变换对关系,并且在极坐标形式下,巧妙地避免了频域插值。由于成像目标为非合作目标,很难保证在其成像过程中会有一周或者大角度的转动,针对此问题,文献[7]提出了利用多个外辐射源的子孔径综合无源雷达成像算法,文献[8]从物理波方程角度出发,建立了不需要发射源波形信息无源分布式孔径探测的回波模型,文献[9]提出在多个接收机情况下,通过对不同接收机的回波相关进行滤波反投影而重建场景辐射率,而文献[10]和文献[11]分别提出了ESPRIT和压缩感知超分辨成像算法。

在已有研究特别是文献[6]的研究基础上,本文提出一种发射机和接收机均固定的基于单频连续波的无源雷达时域成像算法。文章主要是对单发单收模式进行了成像原理阐述和仿真分析。本文算法原

2012-09-06 收到, 2012-12-20 改回

国家部委基金(9140C010507100C01)资助课题

*通信作者: 刘玉春 lycdgp@163.com

理简单，能够取得较好的成像效果。由于是时域算法，所以无需频域插值处理，避免了频域算法中插值误差。在转台模型下，通过分析回波信号形式，首先建立信号匹配矩阵，然后把接收到的回波信号拓展为回波信号矩阵，把信号匹配矩阵和回波信号矩阵的乘积在时间维上求和，实现了对回波信号的匹配积累，从而得到散射点的像。所提算法的成像思想和成像模型均与文献[6]不同，在文中进行了分析比较。文章给出了算法的成像分辨率，并且对影响聚焦质量的因素进行了仔细分析，然后综合得到了影响算法聚焦能力的量度。

2 信号模型分析

假设成像目标已经完成了平动补偿，因此可以在转台模型下进行研究，转台模型如图 1 所示，其中外辐射源和接收机位置可以互换。在转台绕转动轴转动过程中，外辐射源和接收机静止，坐标系也不转动，转台转动角速度为 ω ，散射点到转动轴的距离为 r ，与 X 轴正向夹角为 φ ，发射信号为单频连续波，其频率为 f 。通常外辐射源和接收机到目标的距离远大于目标的转动半径，也即有 $r_1 \gg r$ ， $r_2 \gg r$ ，则有

$$\left. \begin{aligned} \varphi(t) &= \varphi_0 + \omega t \\ R_1(t) &\approx r_1 - r \cos(\varphi(t) - \theta) \\ R_2(t) &\approx r_2 - r \cos(\varphi(t) - \theta - \beta) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中 φ_0 为 φ 的初始值。散射点的回波信号为 $s(t) = \sigma \exp\{j2\pi f(t - \tau)\}$

$$\begin{aligned} &= \sigma \exp\left\{j2\pi f\left(t - \frac{R_1(t) + R_2(t)}{c}\right)\right\} \\ &= \sigma \exp\left\{j2\pi f\left(t - [r_1 + r_2 - r(\cos(\varphi(t) - \theta - \beta) + \cos(\varphi(t) - \theta))]/c\right)\right\} \\ &= \sigma \exp\left\{j2\pi f\left(t - \frac{r_1 + r_2}{c}\right)\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}r(\cos(\varphi(t) - \theta - \beta) + \cos(\varphi(t) - \theta))\right\} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中 σ 为散射点的散射强度， λ 为波长， c 为光速。解调式(2)，即让式(2)乘上 $\exp\{-j2\pi f(t - (r_1 + r_2)/c)\}$ ，则有

$$\begin{aligned} s1(t) &= \sigma \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}r(\cos(\varphi(t) - \theta - \beta) + \cos(\varphi(t) - \theta))\right\} \\ &= \sigma \exp\left\{j\frac{4\pi}{\lambda}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)r\cos(\varphi(t) - \theta - \beta/2)\right\} \end{aligned} \quad (3)$$

结合式(3)和图 1，如果以双基角平分线为 X 轴，以转动中心为原点，以垂直 X 轴方向为 Y 轴建立新的

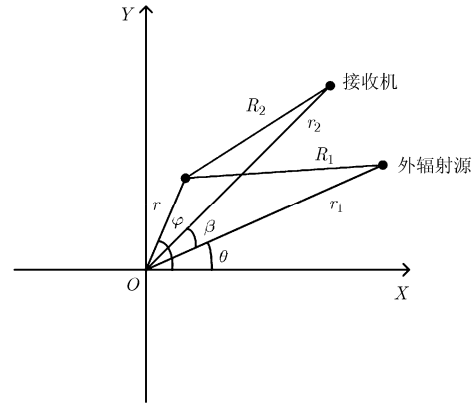


图 1 无源成像系统模型

坐标系，则可以使回波信号形式更为简洁。新坐标系下的系统模型如图 2 所示。从图 2 可以看出，在新坐标系中 $\theta = -\beta/2$ ，所以式(3)可以进一步表达为

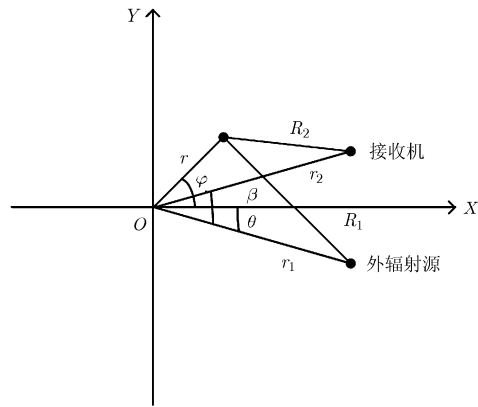


图 2 坐标系变换后的无源成像系统模型

$$\begin{aligned} s1(t) &= \sigma \exp\left\{j\frac{4\pi}{\lambda}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)r\cos(\varphi(t))\right\} \\ &= \sigma \exp\left\{j\frac{4\pi}{\lambda}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)r(\cos\varphi_0\cos(\omega t) - \sin\varphi_0\sin(\omega t))\right\} \\ &= \sigma \exp\left\{j\frac{4\pi}{\lambda}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)(x_0\cos(\omega t) - y_0\sin(\omega t))\right\} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中 $x_0 = r \cos \varphi_0$ ， $y_0 = r \sin \varphi_0$ 分别为散射点 0 时刻在坐标系中的横坐标和纵坐标。

3 基于单频连续波的无源雷达成像算法

下面根据式(4)给出的回波信号形式进行算法研究。假设在成像过程中，转台匀速转动一周。以成像的初始转台位置为成像区域，因为算法在直角坐标系中进行，因此所选区域为矩形区域。

假设在成像区域内，均匀分布着 $M \times N$ (M 行 N 列) 个散射点，每列 M 个散射点，其纵坐标分别为

$y_i, i = 1, \dots, M$, 每行 N 个散射点, 其横坐标分别为 $x_i, i = 1, \dots, N$ 。转台转动过程中共采样 K 次, 每次采样步长为 $2\pi/K$ rad。根据式(4), 第 m 行第 n 列的散射点在第 k 次采样时的回波信号为 $\sigma_{m,n} \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) (x_n \cos(2\pi k/K) - y_m \sin(2\pi k/K))\right\}$, $\sigma_{m,n}$ 为此散射点的散射强度。

根据上面的分析, 建立一个 3 维 $M \times N \times K$ (M 行 N 列 K 页) 矩阵。本文定义此矩阵为信号匹配矩阵, 即

$$\mathbf{G}(m, n, k) = \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) (x_n \cos(2\pi k/K) - y_m \sin(2\pi k/K))\right\}, \quad m = 1, \dots, M, \\ n = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, K \quad (5)$$

假设在第 i 行第 l 列存在一个散射点, 在成像过程中接收到的此散射点的回波采样为

$$g(k) = \sigma_{i,l} \exp\left\{j \frac{4\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) (x_l \cos(2\pi k/K) - y_i \sin(2\pi k/K))\right\}, \quad k = 1, \dots, K \quad (6)$$

为了便于处理, 将此回波采样拓展为一个与信号匹配矩阵相同大小的 3 维矩阵, 本文定义此矩阵为回波信号矩阵, 即

$$\mathbf{g}(m, n, k) = \sigma_{i,l} \exp\left\{j \frac{4\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) (x_l \cos(2\pi k/K) - y_i \sin(2\pi k/K))\right\}, \quad m = 1, \dots, M, \\ n = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, K \quad (7)$$

从式(7)中可以看出, 回波信号矩阵中的每个元素与 m, n 取值无关, 仅与 k 取值有关, 也就是矩阵每页中的元素均相同。

本文定义回波信号矩阵与信号匹配矩阵的 Hadamard 积为回波匹配矩阵, 即

$$\mathbf{S}(m, n, k) = \mathbf{g}(m, n, k) \mathbf{G}(m, n, k) \\ = \sigma_{i,l} \exp\left\{j \frac{4\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) ((x_l - x_n) \cos(2\pi k/K) - (y_i - y_m) \sin(2\pi k/K))\right\}, \\ m = 1, \dots, M, \quad n = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, K \quad (8)$$

将回波匹配矩阵在时间维上求和(各页相加)

$$\mathbf{S}(m, n) = \sigma_{i,l} \sum_{k=1}^K \exp\left\{j \frac{4\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) ((x_l - x_n) \cos(2\pi k/K) - (y_i - y_m) \sin(2\pi k/K))\right\} \\ = \sigma_{i,l} K J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \sqrt{(x_l - x_n)^2 + (y_i - y_m)^2}\right) \\ m = 1, \dots, M, \quad n = 1, \dots, N \quad (9)$$

式(9)中的 $J_0(\cdot)$ 为贝塞尔函数。从式(9)可以看出, 在最后得到的结果中, 当 $x_l = x_n$ 且 $y_i = y_m$ 时, 其结果为 $\sigma_{i,l} K$, 否则的话则以贝塞尔函数形式衰减, 从而达到匹配效果, 所以式(9)重建了散射点的位置信息, 也即完成了对散射点的聚焦成像。

由上述内容可知, 本文的算法步骤为:

步骤 1 根据式(5), 由信号波长、双基角构造信号匹配矩阵;

步骤 2 根据式(7), 把回波信号拓展为回波信号矩阵;

步骤 3 根据式(8), 回波信号矩阵与信号匹配矩阵相乘得到回波匹配矩阵;

步骤 4 根据式(9), 回波匹配矩阵在时间维上求和实现对散射点位置的重构。

4 算法性能分析

根据式(9)能够得到系统归一化的冲激响应图, 如图 3 所示。由贝塞尔函数性质可知, 算法的峰值旁瓣比为 -7.9 dB, 而分辨率为 $\rho = 0.179\lambda / \cos(\beta/2)$, 因为采用了单频连续波转台模型成像, 所以其距离维和方位维的分辨率相同。

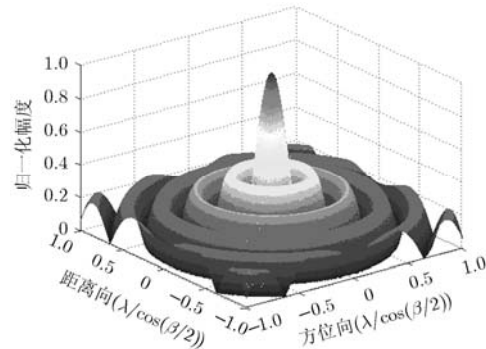


图3 归一化的冲激响应

信号频率越高、双基角越小越有利于成像, 这可以从两方面来分析。

(1) 如果信号频率提高或者双基角变小, 则 ρ 降低, 分辨性能提升。特别地, 如果双基角为 π rad, 则无法成像。反之, 在单基情况下, 可以认为其双基角为 0 rad, 此时分辨率最好。这说明采用双基形式的无源雷达成像从原理上来说分辨性能是劣于单基雷达成像的。

(2) 信号频率提高或者双基角变小有利于抑制各个散射点成像结果间的相互干扰。由于信号的响应以贝塞尔函数形式递减, 第 1 旁瓣高达 -7.9 dB, 所以相邻散射点成像结果会互相干扰, 甚至会导致虚假峰值出现。如果在成像场景中存在两个散射点,

坐标分别 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ ，散射点的散射强度分别为 σ_1, σ_2 ，根据式(9)，散射点 1 的成像结果为

$$S_1 = \sigma_1 K + \sigma_2 K J_0 \left(\frac{4\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \right) \quad (10)$$

其中第 2 项为散射点 2 对散射点 1 的干扰。如果信号频率升高或双基角变小，则 $(4\pi/\lambda) \cos(\beta/2)$ 会增大，根据贝塞尔函数性质，式(10)第 2 项会衰减更快，减小了干扰的影响，从而提升成像质量。

将上述两个方面综合起来，则可以得到下面的结论：

$$H = \cos(\beta/2)/\lambda \quad (11)$$

式(11)中 H 增大则取得较好效果的概率就会增加，也即其聚焦能力增加了。但是需要指出的是，因为各散射点间的互相干扰是随着距离的增加呈贝塞尔函数形式震荡衰减而不是线性递减的，所以 H 增加并不必然提升聚焦效果。所以 H 是本算法聚焦能力的量度，但不是聚焦效果的量度。

5 与文献[6]算法的相异之处

本文算法以文献[6]算法为基础，下面来比较二者的不同之处。

(1) 二者的成像思想不同 文献[6]成像算法为频域算法，而本文提出的算法为时域算法。这是两个算法之间最本质的区别。

(2) 二者的成像模型不同 在文献[6]算法成像模型中，经过运动补偿后形成了散射点和辐射源固定，而接收站绕转动中心转动的模型。而在本文中，被补偿成了接收站和发射站固定，而散射点绕着转动中心转动的模型。相对来说，本文算法的成像模型更具有普遍性，比如在诸多常规 ISAR 成像算法中均采用此模型。

(3) 采用的坐标系不同 文献[6]算法在成像过程中，推导出了目标散射强度函数和实际目标回波信号之间的 2 维傅里叶变换关系，为了避免频域插

值，坐标系采用了极坐标形式。本文算法完全在时域内进行匹配积累，进而聚焦成像，无需进行傅里叶变换，也不存在频域插值问题，在处理过程中采用直角坐标系。文献[6]算法极坐标形式的采用，必然使最后的成像结果形成内密外疏的圆形成像网格。而本文算法在直角坐标系下最后的成像网格是均匀的。相比之下，后者成像的整体效果更好。

6 仿真实验

在本节中，进行了两组仿真实验。仿真试验中均假设散射点的散射强度为 1。

在第 1 组仿真实验中，对相同的散射点分别采用文献[6]算法和本文算法进行仿真。文献[6]算法仿真中信号频率为 600 MHz，双基角采样间隔为 1° ，在 r 遍历过程中，步进间隔为 0.1 m；本文算法中所选信号频率也为 600 MHz，双基角为 $\pi/2$ ，所选矩形成像区域纵坐标和横坐标的步进间隔分布为 0.1 m，转台角度采样间隔为 1° 。所得成像结果如图 4 所示。

在第 2 组仿真实验中，利用本文算法对相同散射点进行成像，采用不同参数共进行了 3 次仿真。其中所选矩形成像区域均为纵坐标和横坐标的步进间隔分布为 0.1 m，转台角采样间隔均为 1° 。在第 1 次成像中信号频率为 300 MHz，双基角为 $\pi/2$ rad；第 2 次成像中信号频率为 450 MHz，双基角为 $\pi/2$ rad；第 3 次成像中信号频率为 300 MHz，双基角为 $\pi/8$ rad。所得成像结果如图 5 所示。

在第 1 组实验中，文献[6]算法和本文算法均对散射点进行了成功的聚焦成像，从图 4 中可以看出，二者的聚焦质量大致相当，验证了本文算法的正确性。

为了验证各因素对成像结果的影响，进行了第 2 组实验。在第 2 组试验中，在不同的参数情况下进行了 3 次成像。3 次成像的 H 值分别为： $H_1 = 0.7071$ ， $H_2 = 1.0607$ ， $H_3 = 0.9808$ 。从图 5(b)可以

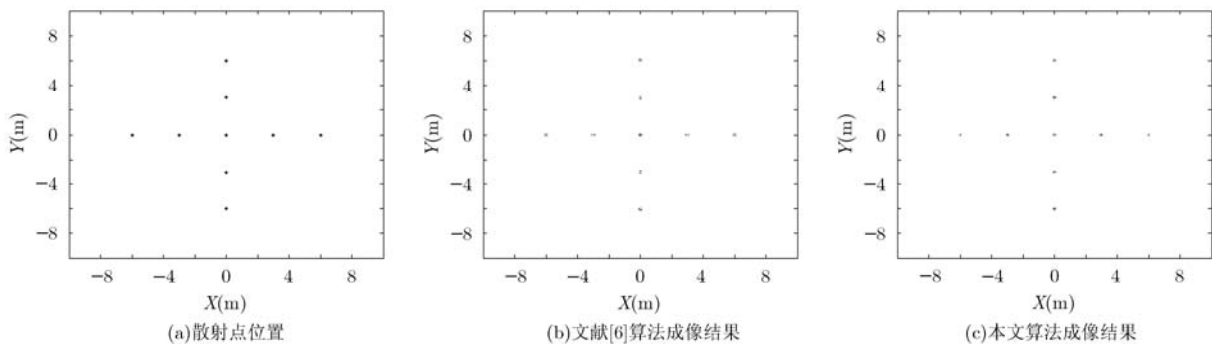


图 4 第 1 组仿真实验成像结果

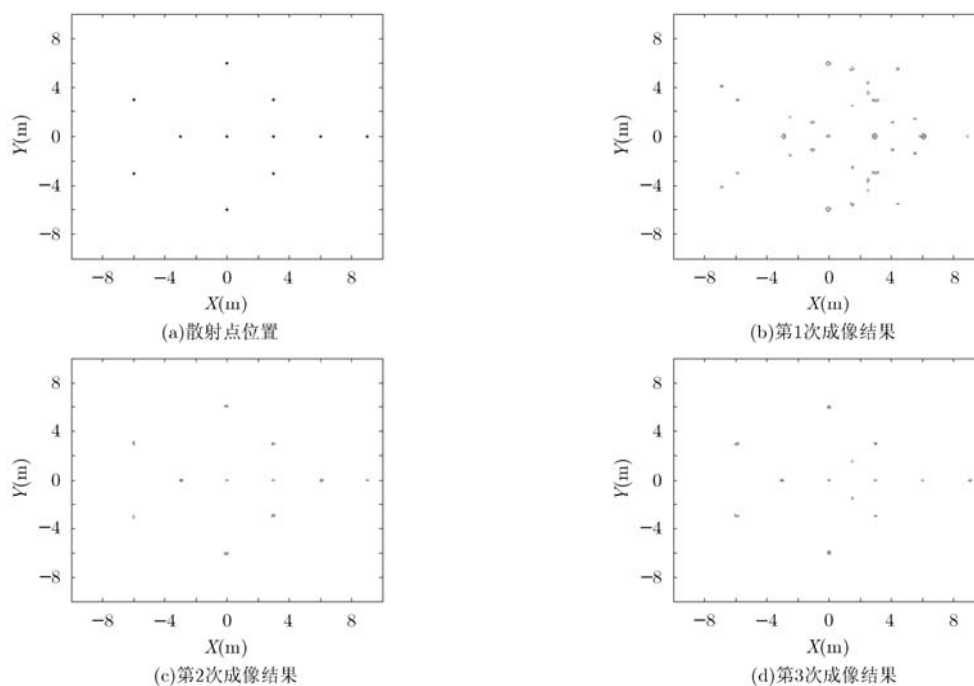


图5 第2组仿真实验成像结果

看出,在第1次成像中,虽然各个散射点已被聚焦,但是成像效果不佳,在图像中出现了很多虚假点图像,这是由散射点成像结果之间的干扰造成的。对比图5(c)和图5(b)可以看出,当信号频率由300 MHz升高至450 MHz时,散射点聚焦效果更好,表现为散射点成像结果更加细锐,而且对干扰有了很好的抑制,总体成像效果良好。对比图5(d)和图5(b)可以看出,保持信号频率为300 MHz不变而双基角由 $\pi/2$ rad减小至 $\pi/8$ rad时,成像效果也有了较大提升,散射点成像结果比较细锐,而且虚假点图像数目大大减少。对比图5(c)和图5(d)可以看出,第2次成像质量要好于第3次成像质量,这是由 $H_2 > H_3$ 造成的。由第2组实验可知聚焦能力受到 H 影响, H 越大则聚焦能力越强,其原因正如在第4节中所讨论。

7 结束语

本文提出一种单频连续波无源雷达时域成像算法,原理简单,能够取得较好的成像效果。算法以转台模型为基础,在直角坐标系下,通过时域的匹配积累对散射点进行聚焦成像。算法完全在时域内进行操作处理,因而无需频域的插值处理,避免了插值误差。文章给出了分辨率的形式,讨论了影响聚焦质量的因素,然后综合得到了影响算法聚焦能力的量度。本文算法是在转台转动一周情况下推导的,并且各个散射点特别是临近散射点聚焦结果之间会产生严重的干扰,因此如何在转台转动小角度

情况下进行成像^[7-11]和如何抑制临近散射点之间的干扰将是我们下一步要重点研究的方向。

参考文献

- [1] Cherniakov M, Moccia A, D'Errico M, *et al.* Bistatic Radar – Emerging Technology[M]. Chichester: England, John Wiley & Sons Ltd, 2008: 248–313.
- [2] Antoniou M, Saini R, and Cherniakov M. Results of a space-surface bistatic SAR image formation algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3359–3371.
- [3] Antoniou M, Cherniakov M, and Hu C. Space-surface bistatic SAR image formation algorithms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(6): 1827–1843.
- [4] Antoniou M, Zeng Z, Liu F, *et al.* Experimental demonstration of passive BSAR imaging using navigation satellites and a fixed receiver[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(3): 477–481.
- [5] Wu Yong. Investigation of passive radar imaging using Wigner-Ville distribution[D]. [Master dissertation], Urbana: University of Illinois, 2001.
- [6] 王大海, 王俊. 单发多收模式下无源雷达成像研究[J]. *电子学报*, 2006, 34(6): 1138–1141.
Wang Da-hai and Wang Jun. Research of passive radar imaging using single external illuminator and multiple receivers[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(6): 1138–1141.
- [7] 张馨文, 王俊. 基于多电视台子孔径综合的无源雷达成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(3): 528–531.

- Zhang Xin-wen and Wang Jun. Passive radar imaging algorithm based on sub-apertures synthesis of multiple television stations[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3): 528-531.
- [8] 汪玲, 伍少华. 一种新的采用分布式孔径的无源雷达成像方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3): 616-621.
- Wang Ling and Wu Shao-hua. A novel passive radar imaging method using distributed apertures[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(3): 616-621.
- [9] 张璇, 汪玲. 一种基于回波相关的无源合成孔径雷达成像方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(6): 1511-1515.
- Zhang Xuan and Wang Ling. An echo-correlation based passive imaging method for synthetic aperture radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(6): 1511-1515.
- [10] 李岩, 王俊, 张守宏. 基于外辐射源的 ESPRIT 超分辨成像算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 143-146.
- Li Yan, Wang Jun, and Zhang Shou-hong. ESPRIT super-resolution imaging algorithm based on external illuminators[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(1): 143-146.
- [11] 徐浩, 尹治平, 刘畅畅, 等. 基于压缩感知的稀疏无源雷达成像[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2623-2630.
- Xu Hao, Yin Zhi-ping, Liu Chang-chang, et al. Sparse passive radar imaging based on compressive sensing[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(12): 2623-2630.
- 刘玉春: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为双基雷达成像.
- 王 俊: 男, 1969 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为单多基地无源雷达探测及定位、信号检测与参数估计、无源雷达成像.
- 杨 杰: 男, 1988 年生, 硕士生, 研究方向为无源雷达成像.
- 王海环: 女, 1987 年生, 博士生, 研究方向为无源雷达信号处理.
- 陈朝焰: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为双基 SAR 成像及 GMTI.