

# Synthetic Aperture Sonar Imaging Algorithm

## —The Study and Simulation of CS Algorithm

Li Chen, Fuhong Zhang

Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang  
Email: chenli255@163.com

Received: Mar. 8<sup>th</sup>, 2016; accepted: Mar. 26<sup>th</sup>, 2016; published: Mar. 29<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

### Abstract

Range Doppler algorithm is the most extensive imaging algorithm, but it has two shortcomings: Firstly, When you use a longer kernel function to improve the accuracy of distance migration, it will cause a lot of computation burden; secondly, the compression of distance is dependency for the frequency of azimuth. The CSA uses the principle of scaling proposed by Papoulis. It uses phase multiply to finish the RCMC which is changed by distance, instead of the time-domain interpolation. It also solves the dependence between the compression of distance and the frequency of azimuth.

### Keywords

Synthetic Aperture Sonar, CSA, RCMC

---

# 合成孔径声呐成像算法之CS算法仿真研究

陈 丽, 张福洪

杭州电子科技大学, 浙江 杭州  
Email: chenli255@163.com

收稿日期: 2016年3月8日; 录用日期: 2016年3月26日; 发布日期: 2016年3月29日

---

### 摘 要

距离多普勒算法是最为广泛的成像算法, 但是存在两点不足: 第一, 当使用较长的核函数提高距离徙动

精度时, 运算量较大; 第二, 距离压缩对方位频率的依赖性难解决。Chirp Scaling算法(CSA)运用Papoulis提出的Scaling原理, 通过相位相乘代替时域插值来完成随距离变化的RCMC, 同时解决了距离压缩中对方位频率的依赖问题。

## 关键词

合成孔径声纳, CSA, RCMC

## 1. 引言

合成孔径声纳成像算法(Synthetic Aperture Sonar, SAS)中原始回波信号为二维数组: 距离向和方位向。通过匹配滤波器, 可以实现数据压缩, 呈现图像。其中的难点是: 距离向和方位向存在相关性[1]。消除相关性的步骤即为距离徙动校正(Range Cell Migration Correction, RCMC)。在距离多普勒算法(Range-Doppler Algorithm, RDA) [2]-[4]中采用时域插值的方法校正, 但是这种方法精确度不高, 运算量也比较大。而在 CSA 采用相位相乘的方法, 精确性高, 运算量小。本文中简单介绍了 CS 算法的应用原理, 并将 CS 算法与距离多普勒算法进行了简单的比较。

## 2. RCMC 原理

声纳接收换能器至目标的距离是 SAS 处理中最重要的参数。它随方位时间变化, 当换能器随船的移动不断接近目标时, 距离随脉冲逐渐减小; 当换能器远离目标后, 距离随脉冲逐渐增加。这种距离变化将导致两点重要影响。首先是导致不同脉冲之间的相位调制, 最后是导致接收数据的扭曲, 即距离徙动(Range Cell Migration, RCM)。如图 1 所示:

声纳与目标的距离可由菲涅尔近似为

$$R_{rd}(\eta, R_0) = \sqrt{R_0^2 + (V\eta)^2} \approx R_0 + \frac{V^2\eta^2}{2R_0} \quad (1)$$

其中  $R_0$  是目标到声纳方位向航线的最短距离,  $V$  是声纳运动速度。

目标多普勒频率为

$$f_\eta = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR_{rd}(\tau, R_0)}{d\tau} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可推出

$$R_{rd}(f_\eta, V) = R_0 + \frac{\lambda^2 R_0}{8V} f_\eta^2 \quad (3)$$

RMC 由式(3)的第二项给出。在距离多普勒域中的每一条水平线具有相同的  $f_\eta$ , 因而通常在该方向上逐行进行 RCMC。

更为精确的一种距离表达式为

$$R_0 = R_{rd} \cos \theta = R_{rd} \sqrt{1 - \sin^2 \theta} \quad (4)$$

其中,  $\sin \theta = \frac{V\eta}{R_{rd}}$ 。由式(4)和式(2)可以推出

$$R_{rd}(f_\eta, V) = \frac{R_0}{D(f_\eta, V)} \quad (5)$$

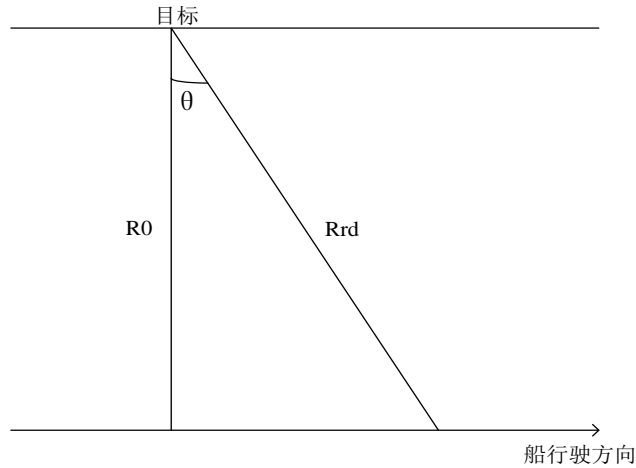


Figure 1. The approximation of the distance by linear geometry  
图 1. 直线几何对距离的近似

其中  $D(f_\eta, V) = \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_\eta^2}{4V^2}}$  是二维频域中的徙动因子。

由式(3)或式(5)中可以发现距离弯曲程度和目标到系统的距离、方位向频率有关, 因此距离多普勒算法中将距离压缩后的二维回波矩阵进行方位向傅里叶变换后进入距离多普勒域, 依照公式进行数据的搬移, 以完成距离弯曲校正。而 CS 算法运用原理则在下节中进行了详细的介绍。

### 3. CSA 变标原理

CSA 的变标原理是将一个线性相位与频率匹配滤波器相乘。由于信号频率的线性偏移特性, 相当于在时域上乘以一个线性相位。该时域相位是对声呐信号频率的调整或变标, 被称为变标方程。

RCM 是最短斜距  $R_0$  的线性函数, 也是方位频率  $f_\eta$  的二次线性函数。对于原始回波数据中每行具有相同的  $f_\eta$ , 由于 RCM 是距离的线性函数, 因此对其校正方法可以有变标方程实现。

如果直接使用 Chirp Scaling 校正 RMC 可能会造成信号移出距离基带上的匹配滤波器频带。因此可以将 RCM 分为两部分: 表示参考目标 RCM 的“一致 RCM”以及去除参考目标 RCM 的“补余 RCM”。对于所有目标而言, 一致 RCM 都是相同的, 而补余 RCM 与目标距离是相关的, 相对于一致 RCM 要小得多。为了进一步减小补余 RCM 分量, 一般将参考目标选在场景中心位置[5]。

RCM 各个分量表达为

整体 RCM: 相对于参考方位频率的整体距离徙动为

$$RCM_{total}(R_0, f_\eta) = \frac{R_0}{D(f_\eta, V)} - \frac{R_0}{D(f_{\eta_{ref}}, V)} \quad (6)$$

一致 RCM: 参考斜距  $R_{ref}$  上的式(5)

$$RCM_{bulk}(f_\eta) = \frac{R_{ref}}{D(f_\eta, V)} - \frac{R_{ref}}{D(f_{\eta_{ref}}, V)} \quad (7)$$

补余 RCM: 整体 RCM 减去一致 RCM

$$RCM_{diff}(R_0, f_\eta) = RCM_{total} - RCM_{bulk} \quad (8)$$

对原始回波信号进行方位向傅里叶变换后,

$$S_{rd}(\tau, f_\eta) = AW_1 \left\{ \tau - \frac{2R_0}{cD(f_\eta, V)} \right\} W_a(f_\eta - f_{\eta c}) \times \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0 R_0 D(f_\eta, V)}{c} \right\} \exp \left\{ j\pi K_m [\tau - \tau_a]^2 \right\} \quad (9)$$

其中  $\tau_a = \frac{2R_0}{cD(f_\eta, V)}$  为 RCM 的所用时间。由于信号路径为双程，因此所耗时间为双倍。

变标方程为：

$$S_{sc}(\tau', f_\eta) = \exp \left\{ j\pi K_m \left[ \frac{D(f_{\eta_{ref}}, V)}{D(f_\eta, V)} - 1 \right] (\tau')^2 \right\} \quad (10)$$

其中  $\tau' = \tau - \frac{2R_{ref}}{cD(f_\eta, V)}$ 。

式(10)与式(9)相乘，去除补余 RCM，将所有目标轨迹曲率调整为参考目标的曲率得

$$S_1(\tau, f_\eta) = \exp \left\{ j\pi(1+\alpha) K_m \left[ \tau' - \frac{1}{1+\alpha} (\tau'_a) \right]^2 \right\} \exp \left\{ j\pi \frac{\alpha}{1+\alpha} K_m (\tau'_a)^2 \right\} \\ = \exp \left\{ j\pi(1+\alpha) K_m \left[ \tau - \frac{1}{1+\alpha} \tau_a + \frac{2R_{ref}}{c} \left( \frac{1}{D(f_{\eta_{ref}}, V)} - \frac{1}{D(f_\eta, V)} \right) \right]^2 \right\} \\ \times \exp \left\{ j\pi \frac{\alpha}{1+\alpha} K_m (\tau'_a)^2 \right\} \quad (11)$$

其中  $\alpha = \frac{D(f_{\eta_{ref}}, V_\tau)}{D(f_\eta, V_\tau)} - 1$ 。

对式(11)进行距离向傅里叶变换，进入距离多普勒域，得

$$S_2(f_\tau, f_\eta) = A_1 W_\tau(f_\tau) W_a(f_\eta - f_{\eta c}) \times \exp \left\{ -j \frac{4\pi R_0 f_0 D(f_\eta, V_\tau)}{c} \right\} \\ \times \exp \left\{ -j \frac{\pi D(f_\eta, V_\tau)}{K_m D(f_{\eta_{ref}}, V_\tau)} f_\tau^2 \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi R_0}{cD(f_{\eta_{ref}}, V_\tau)} f_\tau \right\} \\ \times \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} \left[ \frac{1}{D(f_\eta, V_\tau)} - \frac{1}{D(f_{\eta_{ref}}, V_\tau)} \right] R_{ref} f_\tau \right\} \\ \times \exp \left\{ j \frac{4\pi K_m}{c^2} \left[ 1 - \frac{D(f_\eta, V_\tau)}{D(f_{\eta_{ref}}, V_\tau)} \right] \times \left[ \frac{R_0}{D(f_\eta, V_\tau)} - \frac{R_{ref}}{D(f_{\eta_{ref}}, V_\tau)} \right]^2 \right\} \quad (12)$$

式(12)相位系数的第一项为方位向匹配滤波器，第二项为距离向匹配滤波器，第三项为目标的相位信息，第四项为 RCMC，第五项为附加相位。

对式(12)进行相位相乘，可同时完成距离压缩以及一致 RCM，得

$$\begin{aligned}
 S_2(f_\tau, f_\eta) = & A_1 W_\tau(f_\tau) W_a(f_\eta - f_{\eta c}) \\
 & \times \exp\left\{-j \frac{4\pi R_0 f_0 D(f_\eta, V_\tau)}{c}\right\} \times \exp\left\{-j \frac{\pi D(f_\eta, V_\tau)}{K_m D(f_{\eta_{ref}}, V_\tau)} f_\tau^2\right\} \\
 & \times \exp\left\{j \frac{4\pi K_m}{c^2} \left[1 - \frac{D(f_\eta, V_\tau)}{D(f_{\eta_{ref}}, V_\tau)}\right] \times \left[\frac{R_0}{D(f_\eta, V_\tau)} - \frac{R_{ref}}{D(f_{\eta_{ref}}, V_\tau)}\right]^2\right\}
 \end{aligned} \tag{13}$$

### 4. CSA 仿真研究

运用 MATLAB 进行 CSA 仿真研究。参数预设：载频  $F_c$  为 3000 Hz，平台高度 300 m，航速 5 m/s，发射调频信号脉宽为 10 ms，声呐实际孔径尺寸为 0.2 m。假设场景中有 3 个理想点目标，坐标分别为 [10,125]、[10,175]、[40,175]。图 2 描述了未经过 RCMC 处理直接成像结果，图 3 进行了距离多普勒算法和 CS 算法的最终成像结果比较。

由仿真结果可知，RCMC 有利于提高 SAS 最终成像的辨别度。CSA 相对于 RDA，具有更高的精确度，但所耗时间较长。

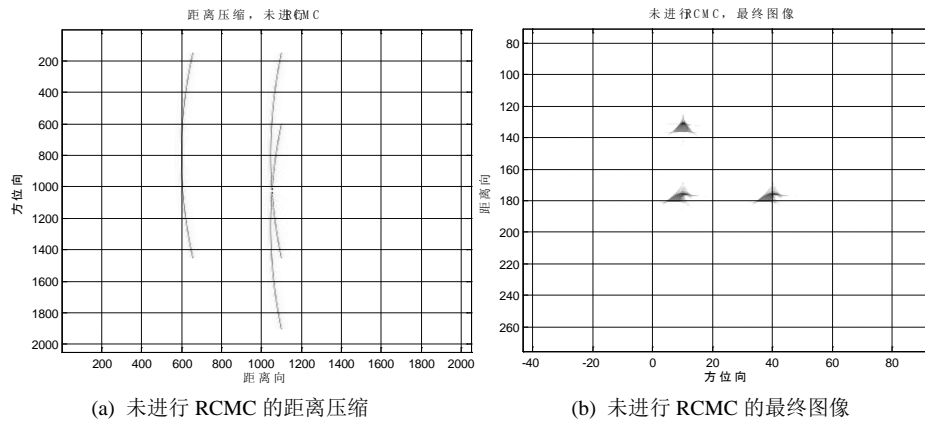


Figure 2. The distance-compression and imaging-results without RCMC  
图 2. 未经过 RCMC 的距离压缩和成像结果

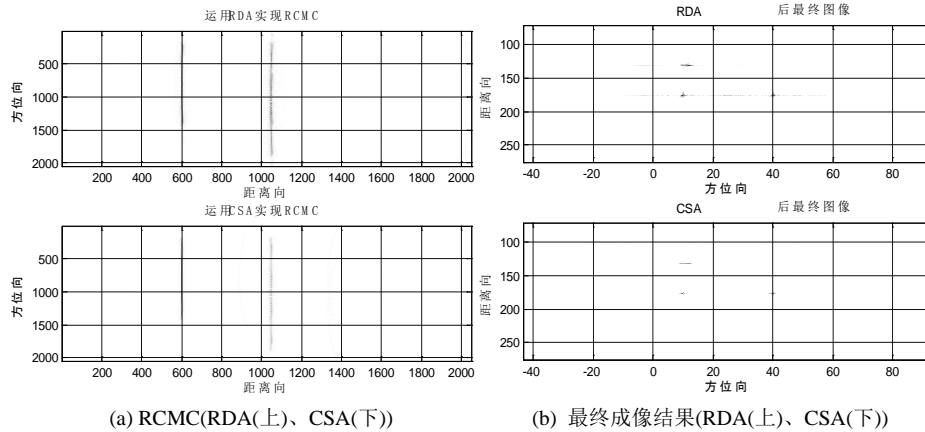


Figure 3. Comparing the RCMC and imaging-results between RDA and CSA  
图 3. RDA 和 CSA 的 RCMC 和成像结果比较

## 5. 结束语

相较于 RDA, CSA 能更为精确的计算出目标的所在位置。而且 CSA 运算过程中仅需要 FFT 和相位相乘, 所以在实现上也是很方便的。FFT 次数与 RDA 几乎相等, 但处理块之间的重叠比率会导致轻微的不同。但由于在 CS 算法中, 要求  $D^2(f_\eta, v) = 1 - \frac{(cf_\eta)^2}{4v^2 f_0^2} \gg \frac{2f_t}{f_0} + \frac{f_t^2}{f_0^2}$  的成立, 使得 CS 算法对于相对带宽较小、方位波束越窄的信号, 成像结果越精确[6]。由于声呐系统为宽带信号, 因此 CSA 处理中会产生一定的散焦现象。但是相位相乘补偿 RCMC 的方法在所有现存成像算法中是最有效的, 因此研究 CSA 就有一定的价值。比如参考文献[7]-[9]中研究的改进 CSA 可以适用于宽带和宽测绘带的信号。

## 参考文献 (References)

- [1] Ian G. Cumming, 著, Frank H. Wong, 译. 合成孔径雷达成像算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007-7-1.
- [2] 王国喜. 星载 SAR 距离——多普勒算法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [3] 王宏星. SAS 中 RD 成像算法及其基于运动补偿的改进研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2014.
- [4] 范乃强, 王英民. 合成孔径声纳成像改进距离 - 多普勒算法研究[J]. 计算机仿真, 2014(10): 25-29.
- [5] 张景涛. 合成孔径雷达 Chirp Scaling 成像算法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
- [6] 黄福贵, 杨海亮, 刘明. Chirp-Scaling 算法在宽带合成孔径声纳成像中局限性研究[J]. 舰船电子工程, 2014(11): 161-164.
- [7] 杨海亮, 唐劲松, 徐慨. 宽测绘带的合成孔径声纳宽带 Chirp Scaling 成像算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015(1): 73-77.
- [8] 张友文, 孙大军, 田坦. 基于 Chirp Scaling 成像算法的高分辨聚束式合成孔径声纳[J]. 声学技术, 2006(4): 271-275.
- [9] 袁鹏, 陶杰武, 汪海涛. 宽带宽波束 SAS 成像研究[J]. 舰船科学技术, 2009(5): 91-94.