一种多子阵合成孔径声纳 CS 成像算法

刘 维，张春华，刘纪元，刘兴华
（中国科学院声学研究所，北京 100190）

摘要：由于方位向采样不均匀，已有的频域算法如 CS 算法（Chirp Scaling）等不能直接应用于多子阵合成孔径声纳成像，提出了一种可用于方位向不均匀采样多子阵合成孔径声纳的 CS 成像算法。此方法利用多子阵合成孔径声纳系统等间隔布阵和匀速直线运动的特点，将方位向不均匀采样的傅立叶变换分解为若干均匀采样的傅立叶变换，从而可以利用 FFT 提高计算效率。成像结果及分析表明，此方法可以很好应用于多子阵合成孔径声纳成像，并保持了标准 CS 算法快速高效的特点。

关键词：合成孔径声纳；多子阵；不均匀采样；CS 算法
中图法分类号：TB556 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2008)-05-0636-06

A multiple-receiver synthetic aperture sonar CS imaging algorithm

LIU Wei，ZHANG Chun-hua，LIU Ji-yuan，LIU Xing-hua
(*Institute of Acoustics*，*Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100190，*China*)

Abstract: Because of non-uniform sampling on azimuth direction, the standard frequency imaging algorithm like CS can′t be directly applied to multiple-receiver synthetic aperture imaging. A multiple-receiver synthetic aperture sonar imaging CS algorithm is brought out. The algorithm makes use of two characteristics of multiple-receiver synthetic aperture system, that is, equidistant deployment of physical element arrays and uniform velocity. Based on that, the azimuth direction non-uniform Fourier transform is divided into several uniform Fourier transforms, which can use FFT. Imaging Result shows that the method can be applied to multiple-receiver synthetic aperture imaging and maintains the high computing efficiency of standard CS algorithm.

Key words: synthetic aperture sonar; multiple-receiver; non-uniform sample; CS (chirp scaling) algorithm

1 引 言

合成孔径声纳(Synthetic Aperture Sonar，SAS)利用小孔径声纳基阵的移动形成虚拟大孔径，通过成像算法得到目标区域高分辨率图像[1]。受声波在水中传播速度的限制，单子阵合成孔径声纳的拖曳速度受方位向采样率的限制，测绘效率比较低。为了提高测绘效率，合成孔径声纳系统大都采用多子阵技术，但多子阵合成孔径声纳存在方位向采样不均匀的问题。对于频域成像算法来说，由于快速傅立叶变换(Fast Fourier Transform，FFT)是频域计算的基本单元，现有的频域算法(如 CS、OMEGA-K 等算法)只适用于方位向均匀采样的情况，因而方位向不均匀采样多子阵合成孔径声纳频域成像算法的研究非常有意义。

工作状态下，合成孔径声纳基阵一般是做匀速直线运动，而且多子阵合成孔径声纳接收阵大都是等间隔排列。在这种情况下，多子阵合成孔径声纳方位向不均匀采样实际上是由于多子阵相位中心重叠引起的。而多子阵相位中心重叠既是保证合成孔径声纳方位向采样率足够的必要条件，也是进行合成孔径声纳运动补偿的需要，因为在合成孔径声纳系统中普遍使用相位中心重叠运动补偿算法

收稿日期：2007-10-12；修回日期：2008-01-12
基金项目：国家 863 计划支持项目(2007AA091101)
作者简介：刘维(1980)，男，河北人，博士，助理研究员，研究方向为合成孔径声纳成像、声纳图像处理。
通讯作者：刘维，E-mail:ll_wei_1980@hotmail.com

(Displaced Phase Center Algorithm，DPCA)[2]。CS 算法(Chirp Scaling Algorithm，CS)完成距离徙动校正 (Range Cell Migration Compensation，RCMC)不需要插值，通过傅立叶变换和复乘即可完成合成孔径声纳成像，使合成孔径成像的计算效率大大提高[3]。在方位向均匀采样的情况下，傅立叶变换可以通过 FFT 来实现；但在多子阵合成孔径声纳系统中，方位向采样是非均匀的，不能直接使用 FFT。

为此，提出了一种可用于等间隔匀速多子阵合成孔径声纳的 CS 成像算法。所谓等间隔是指多子阵布阵的等效相位中心之间的间隔相同，所谓匀速是指合成孔径声纳基阵的运动速度保持不变。在实际应用中，等间隔匀速多子阵合成孔径声纳系统具有相当的普遍性，因而此算法可以很好地应用于多子阵合成孔径声纳成像系统。

2　多子阵合成孔径声纳 CS 算法

2.1　等效相位中心假设

多子阵合成孔径声纳是收发分置的，为了便于进行频域处理，一般采用等效相位中心假设。如图 1 所示，假设发射阵为 T，接收阵为 R，则采用 TR 的中点 C 作为等效相位中心。等效相位中心假设使多子阵合成孔径声纳成像处理得到简化，但也会引入声程误差，声程误差的大小为 $\triangle r=|r_{TA}|+|r_{RA}|-2|r_{CA}|$，其中 r 表示两点间距离，$\triangle r$ 表示声程误差。声程误差 $\triangle r$ 受收发阵间距 $|RT|$、发射阵波束开角、目标距离等因素的影响，但一般情况下这种声程误差可以忽略[1]。为了便于处理，文中采用等效相位中心假设，所有方位向采样点位置均为等效相位中心位置。如图 2 所示，采用等效相位中心假设，多子阵的发射接收阵对可以近似为相应的等效相位中心，这样收发分置的多子阵可以简化为收发共置的单子阵的组合，便于应用频域成像算法。

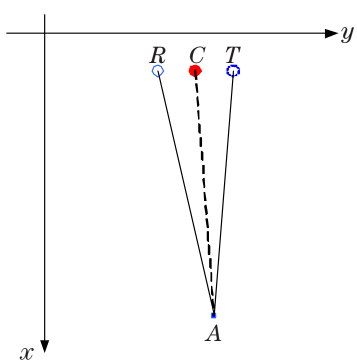


图 1　等效相位中心

Fig.1　Equivalent phase center

图 2　多子阵等效相位中心

Fig.2　Phase centers of multiple-receiver array

2.2　CS 算法

CS 算法的主要操作即复乘和傅立叶变换 (由 FFT 和 IFFT 实现)，其主要步骤如图 3 所示。本文只考虑非斜视的情况，此时参考多普勒频率为零，下文均以此为条件对 CS 算法进行简化。

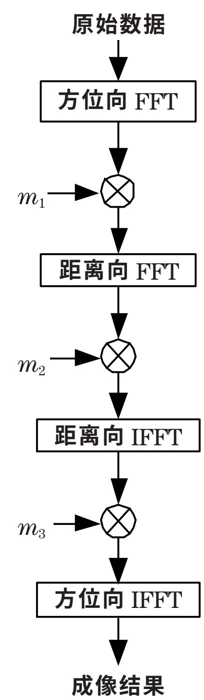


图 3　CS 算法步骤

Fig.3　Steps of CS algorithm

CS 算法各步骤分析如下：

(1) 对原始回波数据 $s(\tau,\eta)$进行方位向傅立叶变换，将原始数据变换到距离多普勒域信号$S(\tau,f_\eta)$，τ 为距离向时间，η 为方位向时间，f_η 为方位向频率。

(2) 对距离多普勒域信号 $S(\tau,f_\eta)$乘以频率变标相位因子 m_1，得到 $S_1=S\cdot m_1$，其中：

$$m_1(\tau',f_\eta)=\exp\{j\pi K_m[\frac{1}{D(f_\eta,v)}-1](\tau')^2\} \tag{1}$$

$$\tau'=\frac{2}{c}\{R+[\frac{1}{D(f_\eta,v)}-1]R_{ref}\}-\frac{2R_{ref}}{cD(f_\eta,v)} \tag{2}$$

$$K_m=\frac{K}{1-KZ} \tag{3}$$

$$Z=\frac{cRf_\eta^2}{2v^2f_0^3D^3(f_\eta,v)} \tag{4}$$

$$D(f_\eta,v)=\sqrt{1-\frac{c^2f_\eta^2}{4v^2f_0^2}} \tag{5}$$

式(1)~(5)中，R_{ref} 为参考距离，一般取成像场景中心处的距离；R 为目标距离；c 为声速；f_0 为中心频率；v 为基阵速度；K 为线性调频信号调频率。

(3) 对 S_1 进行距离向傅立叶变换，此时信号变为二维频域信号 $S_2(f_\tau, f_\eta)$，f_τ 为距离向频率。

(4) 对二维频域信号 S_2 乘以相位因子 m_2 得到 $S_3=S_2 \cdot m_2$，其中：

$$m_2=\exp\left(\mathrm{j}\frac{\pi D(f_\eta, v)}{K_m}f_\tau^2\right)\times \exp\left(\mathrm{j}\frac{4\pi}{c}\left[\frac{1}{D(f_\eta, v)}-1\right]R_{ref}f_\tau\right) \tag{6}$$

(5) 对 S_3 进行距离向逆傅立叶变换得到信号 $S_4(\tau, f_\eta)$。

(6) 对 S_4 乘以相位因子 m_3 得到 $S_5=S_4 \cdot m_3$，其中：

$$m_3=\exp\left(\mathrm{j}\frac{4\pi R f_0 D(f_\eta, v)}{c}\right)\times \exp\left(\mathrm{j}\frac{4\pi K_m}{c^2}[1-D(f_\eta, v)]\left[\frac{R-R_{ref}}{D(f_\eta, v)}\right]^2\right) \tag{7}$$

(7) 对 S_5 进行方位向傅立叶逆变换即得到成像结果。

上述各步骤中，三个相位因子所起的作用各不同，其中相位因子 m_1 的作用是残余距离徙动矫正(Differential RCMC)；相位因子 m_2 的作用是脉冲压缩和主要距离徙动校正(Bulk RCMC)；相位因子的作用是方位向脉冲压缩和残余相位校正。

2.3 相位中心方位向不均采样处理方法

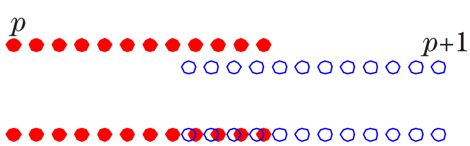


图 4 多子阵方位向不均匀采样

Fig.4 Non-uniform sampling on azimuth direction of multiple-receiver array

如图 4 所示，为了保证方位向采样率并且进行运动补偿，多子阵合成孔径声纳前后两屏相位中心之间存在重叠，这就导致了多子阵合成孔径声纳相位中心方位向的不均匀采样。在这种情况下，如果直接使用 FFT 计算傅立叶变换将会带来很大的误差。因此，需要寻找一种既能利用 FFT 又不会带来误差的处理方法。

假设声纳基阵个数为 N_a，等效相位中心间距 d_{pc}，前进速度为 v，脉冲重复周期为 prt，方位向最终均匀采样间隔为 d_o，令：

$$n_d=\frac{d_{pc}}{d_o},\quad n_{prt}=\frac{prt\times v}{d_o} \tag{8}$$

假设数据屏数为 P，则方位向数据点数为 $M=N_aP$，各数据对应的方位向位置为 x_i，方位向不均匀采样信号 f_i 的方位向傅立叶变换可表示为：

$$F(k)=\sum_{i=0}^{M-1}f_i\exp(-\mathrm{j}2\pi k\triangle_{fs}t_i) \tag{9}$$

其中 $t_i=t(x_i)=x_it_{coef}$，t_{coef} 为方位向的时间比例系数，$\triangle_{fs}$ 为最小频率单元。N 为频域采样点数，方位向时间比例系数 t_{coef} 与方位向频率存在关联，满足 $f_s=1/t_{coef}$ 的关系，且：

$$\triangle_{fs}=\frac{f_s}{N}=\frac{1}{Nt_{coef}} \tag{10}$$

则：

$$F(k)=\sum_{i=0}^{M-1}f_i\exp\left(-\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}x_i\right) \tag{11}$$

式(11)可以分解为：

$$F(k)=\sum_{q=0}^{N_a-1}F_q(k) \tag{12}$$

其中：

$$F_q(k)=\exp\left(-\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}qn_d\right)\times G_q(k)$$

$$G_q(k)=\sum_{p=0}^{P-1}g_q(pn_{prt})\exp\left(-\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}pn_{prt}\right)$$

$$g_q(pn_{prt})=f_{p\times N_c+q}=f(qn_d+pn_{prt})$$

可以看出，在多子阵等间隔和匀速的前提条件下，式(12)将式(9)转换为 $G_q(k)$ 之和，而 $G_q(k)$ 对应的时域数据 $g_q(pn_{prt})$ 则是等间距的，这样 $g_q(pn_{prt})$ 到 $G_q(k)$ 之间的转换则可以通过 FFT 实现。由此，f_i 到 $F(k)$ 之间傅立叶变换通过式(12)可以分解为 N_a 个长度为 P 的 FFT，这样可以大大降低 f_i 到 $F(k)$ 变换的计算量。

2.4 方位向非均匀采样 CS 成像算法描述

CS 算法的第一步即做方位向傅立叶变换，对于多子阵合成孔径声纳而言，由于方位向采样不均匀，因而不能采用 FFT，但可以通过文中第 2.3 节给出的方法将方位向不均匀采样的傅立叶变换分解为 N_a 个 P 点的 FFT 来实现，其他步骤与文中 2.2 节给出的 CS 算法步骤相同。因而，下面重点给出式(12)所表示的方位向不均匀采样傅立叶变换的快速实现算法描述。

声纳回波数据为二维数组，假定行方向为距离向，列方向为方位向，数据按照阵元编号和屏数顺序排列，则方位向不均匀采样傅立叶变换的实现步骤如下：

(1) 取距离向坐标相同的采样点，即列数据 f_q。

(2) 将 f_i 分解为 N_a 个均匀采样序列，即 g_q。

(3) 利用 FFT 分别计算 g_q 的频谱 G_q。

(4) 利用式(12)计算 $F(k)$。

(5) 重复上述步骤，计算所有距离采样点的傅立叶变换。

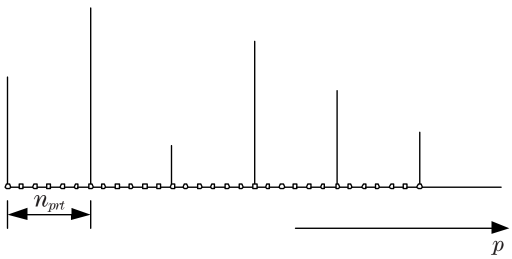


图 5　信号 $g_q(pn_{prt})$
Fig.5　Signal $g_q(pn_{prt})$

从图 5 可以看出，$g_q(pn_{prt})$ 的数据间隔为 n_{prt}，$g_q(pn_{prt})$ 实际上可以等效为 $h_q(n)$，其中：

$$h_q(n)=\begin{cases} g_q(pn_{prt}), n=pn_{prt} \\ 0, \quad n\neq pn_{prt} \end{cases} \tag{13}$$

而 G_q 则可以通过 $h_q(n)$ 的 FFT 计算得到。但是 $h_q(n)$ 的 FFT 对应的数据长度为 $n_{prt}P$，相当于计算量增加了 n_{prt} 倍。利用傅立叶变换的性质，可以降低 G_q 的计算量。这里，假设：

$$g_q'(p)=g_q(pn_{prt}) \tag{14}$$

利用傅立叶变换的性质[4]可知：

$$H_q(k)=G_q(k)=G_q'(\mathrm{mod}(k,P)) \tag{15}$$

其中 mod 表示取余运算，$G_q'(k)$ 为 $g_q'(p)$ 的傅立叶变换，$H_q(k)$ 为 $h_q(n)$ 的傅立叶变换。

式(15)表明，$G_q(k)$ 可以通过 $G_q'(k)$ 周期延拓得到，而 $G_q'(k)$ 只需要计算数据长度为 P 的 FFT，这样 $G_q(k)$ 的计算量便可大为降低。

3　成像结果与分析

为了验证提出的多子阵合成孔径声纳 CS 成像算法的有效性，进行仿真分析。设有三个沿方位向分布的点目标，其中主要仿真参数如表 1 所列。仿真分析包括四个方面，即与单子阵 CS 算法对比、理想情况下算法有效性分析、算法对不均匀速度的宽容性和对面目标成像分析。

(1) 与单子阵 CS 算法对比

多子阵造成方位向采样不均匀，直接应用单子阵 CS 算法造成方位向频谱计算错误，从而使方位向成像散焦。图 6 是直接使用单子阵 CS 算法的成像结果。从图 6 中可以看出，方位向的三个点目标已经散焦。

表 1　仿真参数
Table 1　The simulation parameters

参数名称	值	参数名称	值
中心频率	100kHz	接收阵宽度	0.16m
脉冲宽度	0.01s	接收阵个数	11
信号带宽	30kHz	速度	1.8m/s
采样频率	600kHz	最小采样距离	27.28m
发射阵宽度	0.16m	脉冲重复周期	0.25s

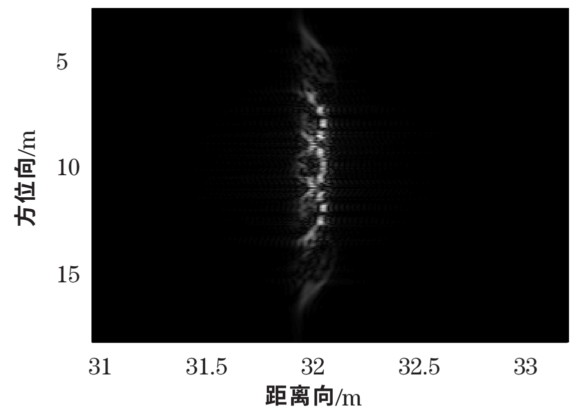


图 6　单子阵 CS 算法成像结果
Fig.6　Imaging result of single-receiver CS algorithm

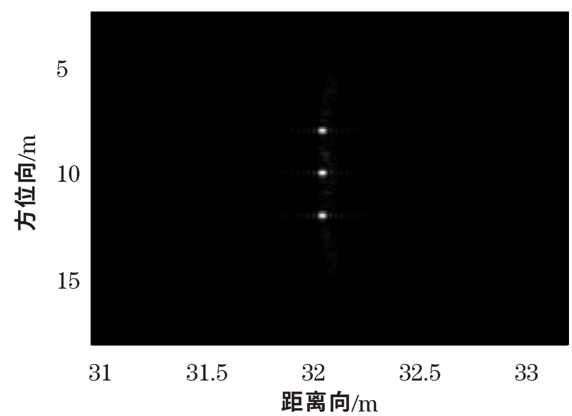


图 7　多子阵 CS 算法成像结果
Fig.7　Imaging result of multiple-receiver CS algorithm

文中提出的多子阵 CS 算法将方位向不均匀采样傅立叶变换转换为 Na 个均匀采样的傅立叶变换，从而解决多子阵合成孔径声纳的方位向不均匀采样的问题。图 7 是使用多子阵 CS 算法的成像结果。从图 7 中可以看出，方位向的三个点目标聚焦理想。

(2) 理想情况下算法的有效性

点目标的方位向和距离向剖面曲线可以很好反应出点目标的成像分辨率和旁瓣水平。图 8 和图 9(a)给出了图 7 中单个目标点的方位向和距离向剖面曲线。可以看出点目标成像距离向旁瓣和方位向旁瓣水平都比较低。距离向分辨率依靠

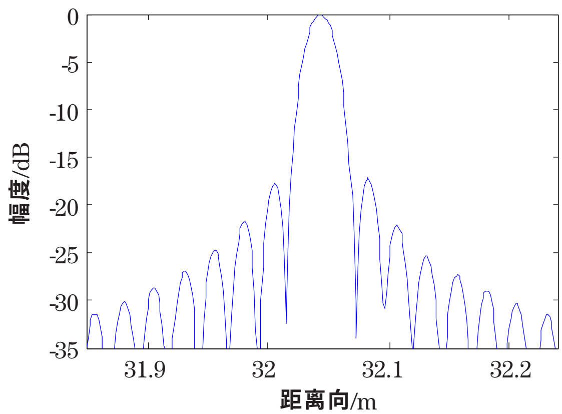
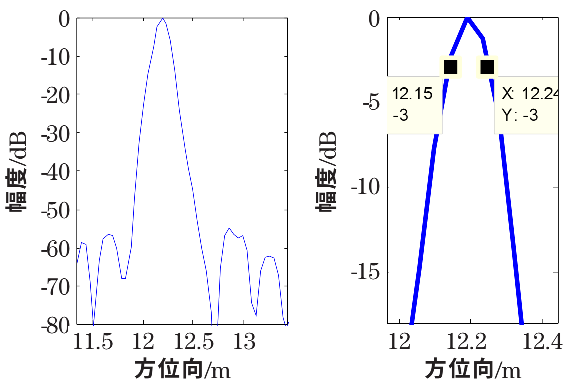


图 8　距离向剖面

Fig.8　Point target response on range direction



(a)　(b)

图 9　方位向剖面

Fig.9　Point target response on azimuth direction

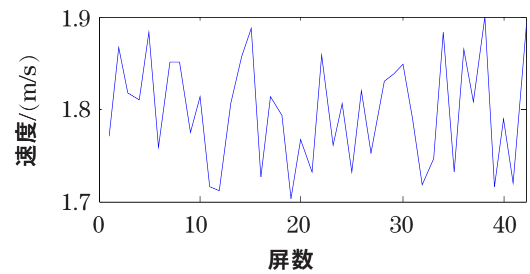


图 10　非均匀速度

Fig.10　Non-uniform velocity

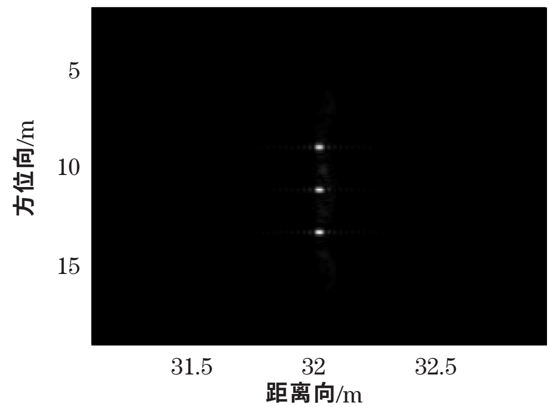


图 11　非均匀速度的成像结果

Fig.11　Imaging result with non-uniform velocity

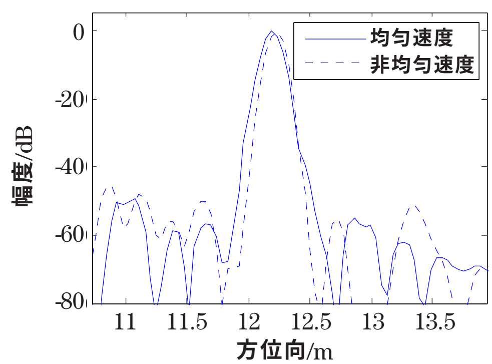


图 12　非均匀速度对方位向成像的影响

Fig.12　Impact of non-uniform velocity on azimuth imaging

脉冲压缩获得，其主要影响因素为信号的带宽。合成孔径声纳成像算法主要关注点目标的方位向分辨率（一般用方位向剖面曲线–3dB 处的宽度来表示）。图 9(b)给出了放大的方位向剖面曲线，3dB 分辨率的测量结果为 9cm，理论分辨率为 8cm，考虑到测量误差（方位向单像素尺度本例中为 0.0448cm），点目标成像结果接近理论分辨率。

(3) 算法对速度不均匀的宽容度

文中提出的多子阵 CS 算法利用了声纳基阵的匀速直线运动假设。实际应用中，受各种因素的影响，合成孔径声纳基阵方位向的运动速度很难保持绝对匀速，会有一定的速度误差。为了验证多子阵 CS 算法对速度不均匀的宽容性，进行了仿真。仿真场景与上述相同，但生成仿真数据时采用了非均匀速度（最大误差为±0.1m/s），非均匀速度如图 10 所示。对非均匀速度仿真数据的成像结果如图 11 所示，目标聚焦良好，可以看出多子阵 CS 算法对速度不均匀有很好的宽容度。另外，图 12 给出了均匀速度和非均匀速度点目标方位向剖面曲线的对比。对比结果表明，一定范围内速度的非均匀性对合成孔径成像方位向分辨率和旁瓣水平影响很小。对于非均匀速度，多子阵 CS 成像算法仍采用匀速运动假设，并采用平均速度作为成像速度，这便会在方位向引入一定的相位误差。图 12 中，峰值在方位向发生了微小移位，正是这种原因。

(4) 算法对面目标的成像

合成孔径声纳实际成像场景的大部分目标为面目标，为了验证多子阵 CS 算法对面目标成像的有效性，对圆柱体目标（如图 13 所示）的仿真数据进行了成像，成像结果如图 14 所示。多子阵 CS 算法对圆柱体目标的成像结果阴影清晰，聚焦良好，说明此算法可以很好的应用于合成孔径声纳面目标成像。

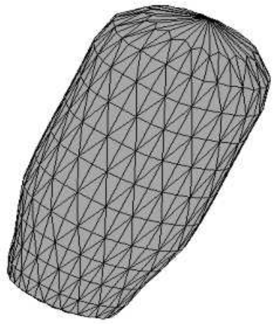


图 13　圆柱目标

Fig.13　Cylinder target

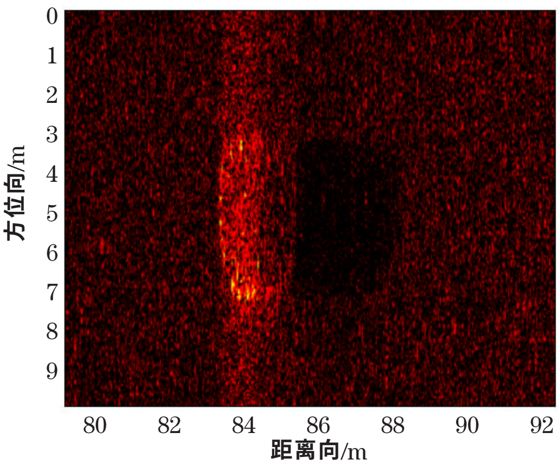


图 14　圆柱目标的成像结果

Fig.14　Imaging result of cylinder target

4　结　论

为了提高测绘效率，大多数合成孔径声纳系统都是多子阵系统，文中提出了一种可用于方位向非均匀采样多子阵合成孔径声纳系统的 CS 成像算法。此方法将非均匀采样数据的方位向傅立叶变换分解为均匀采样数据的傅立叶变换，从而可以使用 FFT 提高方位向傅立叶变换的计算效率，解决了方位向不均匀采样多子阵系统应用 CS 算法的问题。通过点目标和面目标仿真数据的成像结果分析可以看出，目标成像质量较好，并没有因为新增加的方位向不均匀采样的处理造成成像质量的下降。此方法提出的多子阵等间隔布阵和匀速运动的条件符合合成孔径系统的设计要求和工作环境，仿真结果也表明多子阵 CS 算法对速度的非均匀性有较好的宽容度。综合来看，文中提出的多子阵 CS 成像算法可以应用于合成孔径声纳成像系统，具有很好的应用价值。

参　考　文　献

[1] Hayden J Callow. Signal processing for synthetic aperture sonar image enhancement[D]. University of Canter-bury, Christchurch, New Zealand. 2003, 4: 32-34.

[2] Andrea Bellettini, Marc A. Pinto. Theoretical accuracy of synthetic aperture sonar micronavigation using a displaced phasecenter antenna[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering(S0364-9059), 2002, **27**(4): 780-789.

[3] Ian G. Cumming, Frank H. Wong. Digital processing of synthetic aperture radar data[M]. Boston: Artech House, 2002, 283-319.

[4] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schafer, John R. Buck. Discrete-time signal processing(2nd edition)[M]. Prentice Hall, February, 1999, 510-530.