基于改进 SVA 和压缩感知的 SAL 旁瓣抑制算法

尹红飞[1],郭 亮[1*],周 煜[2],孙剑锋[2],曾晓东[1],唐 禹[3],邢孟道[3]

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院,陕西 西安 710071;
2. 中国科学院上海光学精密机械研究所 空间激光信息传输与探测技术重点实验室,上海 201800;
3. 西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室,陕西 西安 710071)

摘 要:针对机载合成孔径激光雷达实测数据成像中旁瓣较高的问题,提出一种新旁瓣抑制算法。压缩感知理论表明,稀疏信号恢复重构过程的同时,信号旁瓣会被压低,但合成孔径激光雷达图像不是稀疏的。针对这一问题,提出了一种基于改进 SVA(Spatially Variant Apodization)和压缩感知重构 SAL 图像的旁瓣抑制算法。首先,利用改进 SVA 算法将 SAL 图像变稀疏,然后再利用压缩感知算法对稀疏图像进行恢复。分别对 SAL 仿真数据和实际高旁瓣 SAL 复图像进行抑制旁瓣处理。仿真结果表明:该算法能够在保证主瓣不被展宽的前提下有效抑制 SAL 旁瓣。

关键词:合成孔径激光雷达; 改进切趾滤波算法; 压缩感知; 稀疏; 旁瓣抑制

中图分类号:TN958.98 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.1230005

Sidelobe-suppression algorithm of SAL data with modified SVA and compressive sensing

Yin Hongfei[1], Guo Liang[1*], Zhou Yu[2], Sun Jianfeng[2], Zeng Xiaodong[1], Tang Yu[3], Xing Mengdao[3]

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 3. The National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A new sidelobe-suppression algorithm was proposed for the synthetic aperture ladar (SAL) with high sidelobe data. The theory of compressed sensing (CS) indicates that the sidelobe of the sparse signal can be lowered while reconstructing the signal, but the image signal of SAL is not sparse. Therefore, a sidelobe suppressing algorithm based on the modified spatial variant apodization (SVA) and SAL image reconstructed by the CS was proposed to deal with the high-sidelobe problem in real-time data imaging. SAL image signal would be converted to be sparse by the modified SVA first and the sparse signal would be reconstructed by the CS. The sidelobe of the SAL simulation data and the real high-sidelobe SAL image data were all suppressed respectively. The simulation result shows that in the

收稿日期:2018-07-10; **修订日期**:2018-08-20

基金项目:国家自然科学基金(61001211, 61303035, 61471283, 61475122);中央高校基本科研业务费专项资金(NSIY171412);陕西省自然科学基金(2017JQ6021);国家重点科学仪器设备研制项目(2013YQ310633)

作者简介:尹红飞(1993–),女,博士生,主要从事合成孔径激光雷达方面的研究。 Email: yinhongfei1212@163.com

通讯作者:郭亮(1984-),男,副教授,博士,主要从事激光雷达系统技术、光电信号处理、雷达成像和激光雷达成像、基于 FPGA 和 DSP 的信号采集、存储和处理方面的研究。 Email: lguo@mail.xidian.edu.cn

导师简介:曾晓东(1956-),男,教授,主要从事激光器光学、光纤传感与测量技术以及远轴光传播等方面的研究。 Email: xdzeng@xidian.edu.cn

premise of no broadening mainlobe, the sidelobe of the SAL image signal can be effectively suppressed by this algorithm.

Key words: SAL; modified SVA; compressed sensing; sparse; sidelobe-suppression

0 引 言

合成孔径激光雷达(Synthetic Aperture Ladar, SAL)是激光技术[1-2]与合成孔径信号处理技术的结合体,是一种新体制的激光雷达,在军事、工业生产等领域都有广泛的应用。与合成孔径雷达(SAR)的成像原理相同,它能够突破传统光学系统中镜头尺寸对成像分辨率“衍射极限”的限制,对几千公里外的目标实现厘米级分辨率的成像[3-5]。

近十几年来,SAL 高分辨率成像技术研究取得了很大进展。2002 年,美国海军实验室第一个成功地实现了合成孔径激光雷达的室内二维成像[6]。2006 年, 美国 Raytheon 公司和 Northrop Grumman 公司分别采用不同的激光波长成功演示了机载 SAL 高分辨率技术[7]。2011 年,美国 Lockheed Martin 公司也开展了机载 SAL 实验, 并公开发表了机载 SAL 图像[8]。2012 年,美国蒙大拿州立大学成功演示了实验室聚束 SAL 成像和干涉 SAL 三维成像[9]。国内的研究相对较晚,2008 年,国内中国科学院上海光学精密机械研究所和西安电子科技大学分别独立地实现了合成孔径激光雷达的室内二维成像实验[10-11]。2011 年,中国科学院上海光学精密机械研究所实现了室内 14 m 的 SAL 成像实验 [12],同年, 中国科学院电子所也实现了 SAL 成像实验演示[13]。2015 年,中国科学院上海技术物理研究所搭建了基于光纤的强度编码合成孔径激光雷达实验系统[14],并于 2016 年完成了天基合成孔径激光雷达非合作目标成像实验,得到方位向分辨率为 1 mm 的目标图像[15]。预计在未来,合成孔径激光雷达将有更广阔的应用前景[16]。

SAL 冲击响应与 SAR 一致, 在方位向和距离向均为 sinc 函数,但由于激光波长较微波短三到四个数量级, 所以相对于合成孔径雷达,SAL 的回波更容易受到传输以及收发装置等因素的影响而引入噪声,进而抬高旁瓣电平,影响成像质量。从吴谨、杨兆省等人的成像结果 [17] 以及美国 Naval Research Laboratory 的成像结果[6]中,可以看出他们给出的 SAL 图像都存在较高的旁瓣。因此,对于高分辨率的 SAL 图像,旁瓣抑制显得尤为重要。

传统的抑制旁瓣方法是在频域加窗处理,但这样会使主瓣宽度被展宽, 导致图像分辨率下降,针对这一问题,文中提出一种基于改进 SVA[18]和压缩感知(Compressive Sensing,CS)抑制 SAL 旁瓣的方法,这种方法能够在不展宽旁瓣的基础上较好地抑制旁瓣。CS 理论表明,当信号具有稀疏性时,可以通过求解最优化问题,实现重要数据的重构[19-21]。但 CS 理论应用的前提是被处理的信号应该具有一定的稀疏度,而绝大多数 SAL 图像都是非稀疏的。针对这个问题,文中的解决方法是:首先,利用改进的 SVA 算法对 SAL 图像进行稀疏处理。然后,再对稀疏的 SAL 图像进行压缩感知重构。文中在第一部分介绍了改进 SVA 算法;第二部分介绍了 CS 理论; 第三部分为软件仿真结果和对实际 SAL 图像处理的结果; 仿真结果和 SAL 图像处理结果都证明了该算法的有效性。

1 改进 SVA 算法

由于传统 SVA 算法为改进 SVA 的基础,为比较清楚地说明改进 SVA 算法,首先需要对 SVA 算法进行简要的介绍。

1.1 SVA 算法

SVA 是一种时域非线性旁瓣抑制算法,它能根据图像自适应地确定加权系数,即加权函数会根据相邻采样点幅度值的不同而相应变换[22],该算法能在抑制旁瓣的同时将信号变稀疏。为方便理解,下面以一维数据为例,对 SVA 算法原理进行说明,对于二维甚至更多维数据可分维处理。

对于奈奎斯特整数采样的原始 SAL 复图像,其回波数据由实部和虚部两部分组成,假设一维回波信号中有 N 个采样点,则信号可写为[18]:

$$\boldsymbol{g}(n)=\boldsymbol{I}(n)+\mathrm{j}\boldsymbol{Q}(n)\quad n=1,2,\cdots,N \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{g}(n)$为第 n 个采样点数据;$\boldsymbol{I}(n)$为实部;$\boldsymbol{Q}(n)$为虚部。SVA 算法是对回波实部和虚部分别处理,则

经过 SVA 处理后的信号为：

$$g_o(n)=I_o(n)+jQ_o(n) \quad n=1,2,\cdots,N \tag{2}$$

式中：$I_o(n)$为经过处理后的实部；$Q_o(n)$为经过处理后的虚部。

SVA 处理是对当前采样点的取值进行加权处理，以回波实部为例，具体 SVA 处理形式如下：

$$\frac{d|I_o(n)|^2}{d\alpha(n)}=0 \tag{3}$$

式中：$I_o(n)$为经过 SVA 处理后的输出；$I(n)$为当前第 n 个点的采样值；$I(n-1)$和 $I(n+1)$为前一个和后一个采样点的采样值；$\alpha(n)$为加权函数。

为使输出的旁瓣最小，解方程导数：

$$\frac{d|I_{SVA}(n)|^2}{d\alpha(n)}=0 \tag{4}$$

解得权函数为：

$$\alpha(n)=-\frac{I(n)}{I(n-1)+I(n+1)} \tag{5}$$

在图像域，采样点处的幅度值可用函数表示：

$$I(n)=\mathrm{sinc}(n-n_0)=\frac{\sin\pi(n-n_0)}{\pi(n-n_0)} \tag{6}$$

式中：n_0为信号峰值点。同样有相邻两点实部表示为：

$$I(n-1)=\mathrm{sinc}(n-n_0-1)=-\frac{\sin\pi(n-n_0)}{\pi(n-n_0-1)} \tag{7}$$

$$I(n+1)=\mathrm{sinc}(n-n_0+1)=-\frac{\sin\pi(n-n_0)}{\pi(n-n_0+1)} \tag{8}$$

将公式(6)、(7)和公式(8)代入公式(5)，有：

$$\alpha(n)=-\frac{I(n)}{I(n-1)+I(n+1)}=\frac{(n-n_0)^2-1}{2(n-n_0)^2} \tag{9}$$

对权函数取极限，有：

$$\begin{cases}\alpha(n)_{n-n_0=\pm1}=0\\ \lim\limits_{n-n_0\to0}\alpha(n)=-\infty\\ \lim\limits_{n-n_0\to+\infty}\alpha(n)=\dfrac{1}{2}\end{cases} \tag{10}$$

为进一步对 SVA 进行说明，采用图形的形式来表述，其中图 1(a)为信号采样点与信号主瓣关系图，图 1(b)为采样点与权函数关系图。

由图 1 可知，当$|n-n_0|<1$ 时，有 $\alpha(n)<0$，此时采样点在主瓣内，应保留原值；当$|n-n_0|\geqslant1$ 时，有 $0\leqslant\alpha(n)\leqslant\frac{1}{2}$，此时采样点在旁瓣，为降低旁瓣，应将采样点的数据舍弃。

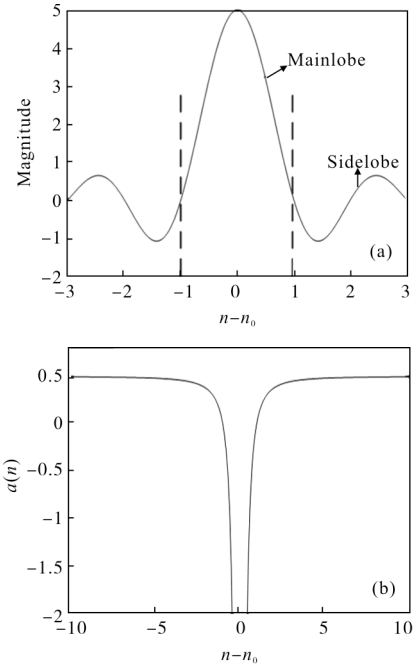


图 1 (a) 信号采样点与信号主瓣关系图；
(b) 采样点与权函数关系图

Fig.1 (a) Relationship of signal sampling points and mainlobe;
(b) Relationship of sampling points and weighting function

由此，根据权函数确定该采样点的输出即为 SVA 算法：

$$I(n_0)=\begin{cases}I(n) & \alpha(n)<0\\ 0 & 0\leqslant\alpha(n)\leqslant\dfrac{1}{2}\\ I(n)+\dfrac{1}{2}[I(n-1)+I(n+1)] & \alpha(n)>\dfrac{1}{2}\end{cases} \tag{11}$$

需要说明的是采样点虚部数据的 SVA 处理过程与上述实部相同，因此，虚部 SVA 输出为：

$$Q(n_0)=\begin{cases}Q(n) & \alpha(n)<0\\ 0 & 0\leqslant\alpha(n)\leqslant\dfrac{1}{2}\\ Q(n)+\dfrac{1}{2}[Q(n-1)+Q(n+1)] & \alpha(n)>\dfrac{1}{2}\end{cases} \tag{12}$$

采样点实部和虚部经过 SVA 处理后的最终输出为公式(2)。由以上分析可知，经过 SVA 处理后，远离峰值的采样点为旁瓣，其幅度会被置零，因此图像信号变稀疏。

1.2 改进 SVA

原始 SVA 算法是在整数 Nyquist 下实现的，文中使用的是改进的 SVA 算法，它是一种在非整数

Nyquist 下基于 SVA 重采样的算法[18]。这种算法不仅能够压低旁瓣还能使信号主瓣变窄，减少主瓣能量损失，性能较原始 SVA 有所提高。

该算法原理与原始 SVA 算法相似，不同的是输入信号的采样间隔有了改变。将信号分解为实部和虚部，两者分别处理，仍然以信号实部为例。

对于非整数 Nyquist 采样图像，第 n 个采样点的函数为：

$$I(n)=\mathrm{sinc}[N_s(n-n_0)]=\frac{\sin[\pi N_s(n-n_0)]}{\pi N_s(n-n_0)} \tag{13}$$

式中：$1/N_s$ 为非整数 Nyquist 采样率，$0<N_s<1$。取 $n-1/N_s$ 和 $n+1/N_s$ 为当前采样点 n 的两个相邻采样点，则相邻点的 sinc 函数可表示为：

$$I(n-1/N_s)=\mathrm{sinc}[N_s(n-n_0-1/N_s)]=-\frac{\sin[\pi N_s(n-n_0)]}{\pi N_s(n-n_0-1/N_s))} \tag{14}$$

$$I(n+1/N_s)=\mathrm{sinc}[N_s(n-n_0+1/N_s)]=-\frac{\sin[\pi N_s(n-n_0)]}{\pi N_s(n-n_0+1/N_s))} \tag{15}$$

与原始 SVA 算法类似，此时权函数的计算类似：

$$\alpha(n)=-\frac{I(n)}{I(n-1/N_s)+I(n+1/N_s)} \tag{16}$$

将公式(13)、(14)和(15)代入公式(16)可得：

$$\alpha(n)=-\frac{I(n)}{I(n-1/N_s)+I(n+1/N_s)}=\frac{N_s^2(n-n_0)^2-1}{2N_s^2(n-n_0)^2} \tag{17}$$

对比公式(17)与公式(9)可知，改进算法的权函数与原始 SVA 算法的权函数类似，只是平方项中多了一个非整数 Nyquist 采样率的倒数，但它不影响权函数的取值范围和单调性，如图 2 所示。

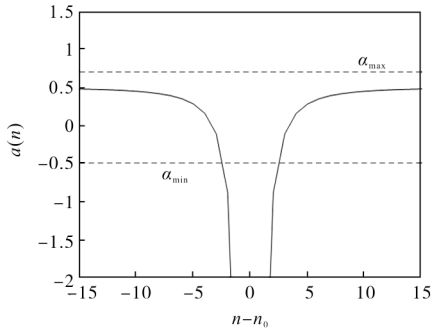


图 2 改进 SVA 加权系数与采样点关系图

Fig.2 Relationship of weighting function and sampling points of modified SVA

对公式(17)取极限，或由图 2 可以看出，此时的权函数与原始 SVA 具有相同的极限值，如公式(10)所示。为进一步压低旁瓣，抑制主瓣的展宽，需要对权函数的取值做一些改变。如图 2 所示，取 α_{min} 为小于零的数，则此时有：

$$\frac{N_s^2(n-n_0)^2-1}{2N_s^2(n-n_0)^2}=\alpha_{min} \tag{18}$$

解得：

$$n-n_0=\pm\frac{1}{N_s\sqrt{1-2\alpha_{min}}} \tag{19}$$

所以主瓣宽度为：

$$L=2(n-n_0)=\frac{2}{N_s\sqrt{1-2\alpha_{min}}} \tag{20}$$

当 α_{min} 小于零时，主瓣宽度 L 会变窄，从而提高图像分辨率。取 α_{max} 为大于 1/2 的数，这样能从多个强目标的旁瓣中有效地恢复出弱目标主瓣[18]。

则经过改进非整数 Nyquist 重采样 SVA 处理后的实部输出为：

$$I_{om}(n)=\begin{cases} I(n) & \alpha(n)<\alpha_{min} \\ 0 & \alpha_{min}\leqslant\alpha(n)\leqslant\alpha_{max} \\ I(n)+\alpha_{max}[I(n-1/N_s)+I(n+1/N_s)] & \alpha(n)>\alpha_{max} \end{cases} \tag{21}$$

以上是信号实部的计算过程，信号虚部的计算与实部类似：

$$Q_{om}(n)=\begin{cases} Q(n) & \alpha(n)<\alpha_{min} \\ 0 & \alpha_{min}\leqslant\alpha(n)\leqslant\alpha_{max} \\ Q(n)+\alpha_{max}[I(n-1/N_s)+I(n+1/N_s)] & \alpha(n)>\alpha_{max} \end{cases} \tag{22}$$

则最终的输出图像为实部和虚部加和：

$$g_{om}(n)=I_{om}(n)+jQ_{om}(n) \tag{23}$$

由公式(21)和公式(22)可知，改进 SVA 算法中有大量的数值被置零，也就是说原始 SAL 图像相对变稀疏了。

2 压缩感知理论

近年来由于压缩感知能够对信号进行压缩重构的优点，被广泛研究和应用[23-24]。压缩感知基于信号的可压缩性，通过建立一个观测矩阵将信号压缩，再通过求解最优化问题实现信号的重构。CS 恢复数据的前提是被恢复数据应该是稀疏的，但实际上的 SAL 回波信号都是非稀疏的，所以需要将 SAL 原始回波数据进行稀疏处理，前面改进 SVA 运算就是这个作用。经过改进 SVA 处理后，信号已经相对稀疏，所以可直接利用 CS 重构信号。下面对 CS 理论进行简要说明：

对于任意信号 $\mathbf{x}\in\mathbf{C}^{N}$[19],构造稀疏矩阵 χ 使得:

$$\mathbf{x}=\chi^{*}\theta \tag{24}$$

式中:θ 即为 $\mathbf{x}$ 的稀疏表示也称为变换域表示。构造压缩矩阵 $\phi\in\mathbf{C}^{M*N}$,其中 $\mathbf{K}*\log\mathbf{N}\leqslant\mathbf{M}<\mathbf{N}$,$\mathbf{K}$ 为 θ 的长度,则压缩信号 $\mathbf{s}$:

$$\mathbf{s}=\phi^{*}\mathbf{x}=\phi^{*}\chi^{*}\theta=\mathbf{A}^{*}\theta \tag{25}$$

式中:$\mathbf{A}\in\mathbf{C}^{M*N}$,$\mathbf{A}=\phi^{*}\chi$ 为传感矩阵。

在变换域根据 $\mathbf{s}$ 恢复 θ,由于 $\mathbf{A}$ 为非奇异矩阵,不能直接求得 $\mathbf{A}^{-1}$,所以需要求 θ 的最小二乘解:

$$\min(\|\theta\|_{1})\ \text{subject to}\ \mathbf{s}=\mathbf{A}^{*}\theta \tag{26}$$

最后根据变换域中的 θ 即可近似恢复出时域信号 $\mathbf{x}$。

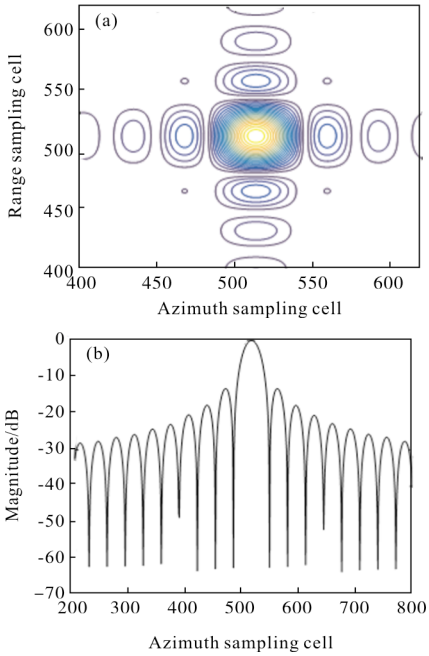
由于 CS 只对信号中的有用部分进行恢复,舍弃了较多无用信息,因此该算法在抑制旁瓣的同时还能够有效地降低数据量。

3 试验结果及性能分析

该节将通过点目标的仿真和中国科学院高旁瓣 SAL 图像的处理结果,来检验该算法的有效性。

3.1 点目标仿真

Matlab 仿真中设置一个点目标,点目标直接成像的 contour 图如 3(a)所示,其中 contour 图的等级为 20,中间的最亮点为回波主瓣,周围为回波旁瓣。图 3(b)和图 3(c)分别为该点目标方位向和距离向的剖面图。



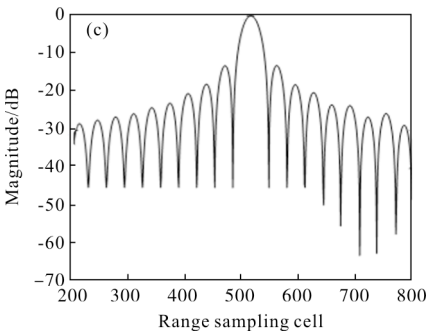


图 3 点目标原始成像结果

Fig.3 Original imaging result of point target

图 3(a)中间最大椭圆为主瓣剖面图,周围较小的椭圆为旁瓣。由图 3(b)和 3(c)可知,点目标方位向和距离向的峰值旁瓣比为 -13 dB,说明此时回波旁瓣较高。

经过改进 SVA 处理后的点目标如图 4 所示,其

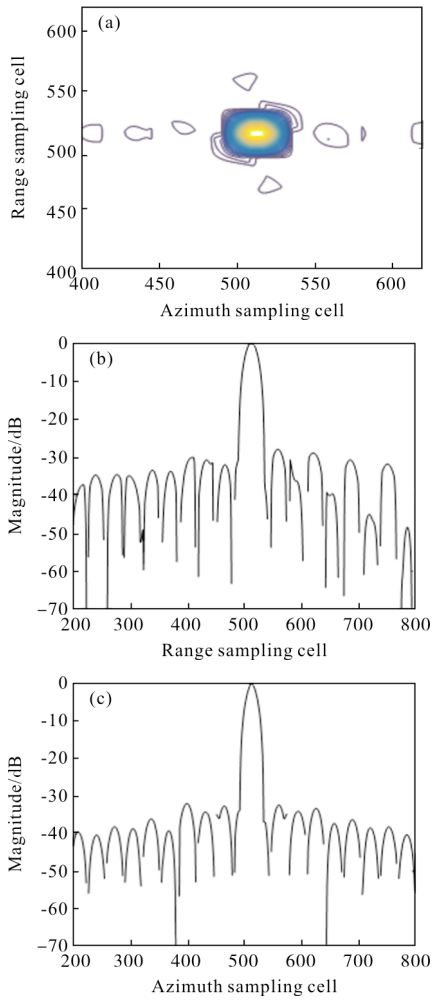


图 4 经过改进 SVA 算法处理后点目标的成像结果

Fig.4 Imaging result of point targer after SVA processing

中 4(a)为成像结果 contour 图，当 contour 等级为 20 时旁瓣完全消失，所以，为方便后续对比，此时取 contour 等级为 40，与图 3(a)相比，大多数回波旁瓣消失。图 4(b)和图 4(c)为其距离向和方位向剖面图，由图可知，经过改进 SVA 处理后的信号旁瓣相对被压低，第一旁瓣幅度低于主瓣幅度 -30 dB，可以认为信号变稀疏了。

图 5 为经过稀疏处理后，又经过 CS 重构的图像，图 5(a)为等级取 40 时的 contour 图，图 5(b)和图 5(c)分别为其距离向和方位向剖面图，由图可知，经过该算法处理后，点目标回波距离向旁瓣被压低到 -34 dB，方位向旁瓣被压低到 -32 dB，效果较好。

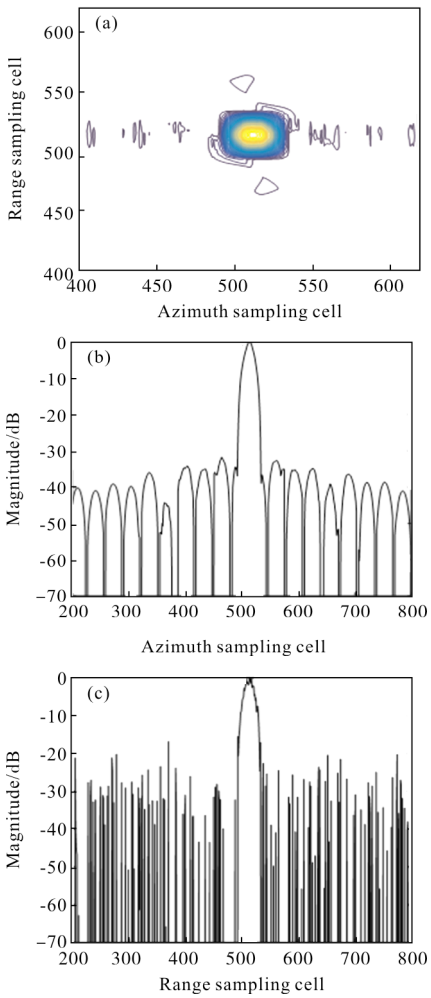


图 5 经过 CS 处理点目标的成像结果

Fig.5 Imaging result of point target after processing CS

对比图 3、4、5 可知，经过改进 SVA 处理后的图像信号变稀疏，再经过 CS 恢复后的信号旁瓣明显被压低，最终距离向第一旁瓣低于主瓣 -34 dB，方位向第一旁瓣低于主瓣 -32 dB。

总之，无论是在方位向还是在距离向，经过该算法处理后点目标旁瓣明显被抑制。

3.2 实际高旁瓣 SAL 图像处理结果

原始高旁瓣 SAL 图像如图 6 所示，利用文中提出的旁瓣抑制算法对该原始高旁瓣 SAL 图像进行处理。

图 6(a)为原始 SAL 成像结果，6(b)为经过改进 SVA 稀疏处理后的结果，图 6(c)为对稀疏图像再进一步压缩感知恢复的结果。图中“中国科学院”为回波成像主瓣，而其主瓣上下亮散斑为回波旁瓣，对比图 6(b)、6(c)与 6(a)可知，经过该算法处理后的图像回波旁瓣明显减少，说明该方法压低旁瓣的效果较好。

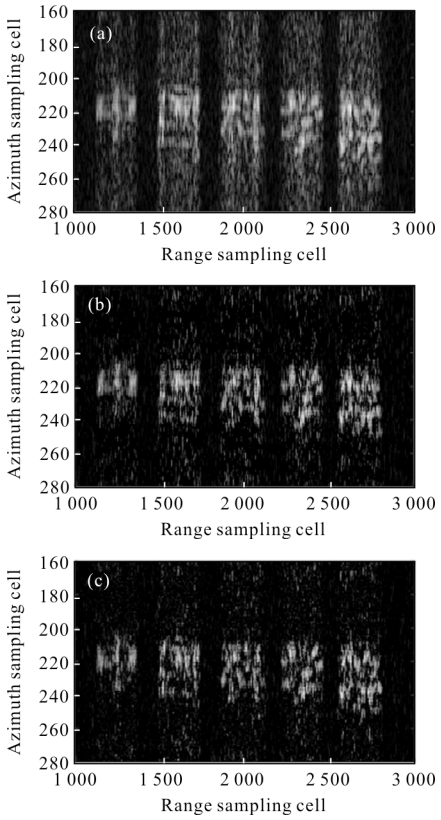


图 6 SAL 实测数据处理结果

Fig.6 Processing result of SAL real data

图像参数对比：

(1) 稀疏程度，取图 6 中三幅图像中的同一行数据进行灰度直方图统计，结果如图 7 所示。

对比图 7(a)和图 7(b)，发现经过改进 SVA 处理

后,较多元素灰度值变为零,说明改进 SVA 算法能够将信号变稀疏;图 7(c)表示经过压缩感知恢复的图像稀疏度更大,说明多数回波旁瓣被置零,旁瓣抑制效果较好。

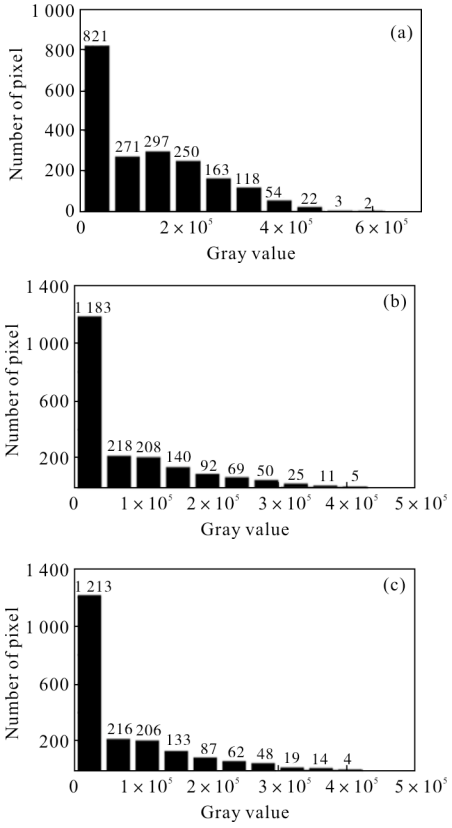


图 7 抑制旁瓣前后图像灰度直方图

Fig.7 Image histograms of gray value before and after sidelobe suppression

(2)图像对比度

图像对比度被定义为:

$$c=\sum r^2(i,j)p(i,j) \tag{27}$$

式中:$r(i,j)=|i,j|$为相邻像素间的灰度差;$p(i,j)$为 r 的像素分布概率。原始图像、经过改进 SVA 处理图像和经过 CS 恢复图像的对比度如表 1 所示。

表 1 实测数据图像对比度

Tab.1 Contrast values of real data

Image	Original image	After modified SVA processing	Restored image
Contrast	1.623 2	2.034 7	2.132 6

图像对比度越高,图像质量越好。由上表可知,三幅图像的对比度值在逐渐变大,说明经过 CS 恢复的图像质量较原始图像要好很多。

4 结 论

对于高分辨率 SAL 图像,旁瓣抑制起重要作用,如果图像中存在较高旁瓣电平,会带来图像模糊,图像质量变差等影响。相比于传统频域加窗抑制旁瓣的方法,文中基于压缩感知能够恢复稀疏信号的原理,提出了一种时域压低旁瓣的算法,首先利用改进 SVA 算法对原始 SAL 图像进行稀疏处理,然后利用压缩感知算法对稀疏图像进行压缩重构。点目标仿真结果和高旁瓣 SAL 图像处理结果都表明,该方法对 SAL 图像有较好的旁瓣抑制效果,经过该算法处理后,第一旁瓣能被压低到-34 dB,且该算法能有效避免主瓣被展宽的问题。同时该算法能将多余数据置零,有效地降低数据量,提高图像对比度。

参考文献:

[1] Zeng Fei, Gao Shijie, San Xiaogang, et al. Development status and trend of airborne laser communication terminals [J]. Chinese Optics, 2016, 9(1): 65-73. (in Chinese)

[2] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Advance on high power diode laser coupling [J]. Chinese Optics, 2015, 4(4): 517-534. (in Chinese)

[3] Li Fan, Wu Shuangyang, Zheng Yongchao, et al. Overview of the development of synthetic aperture lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(1): 55-59. (in Chinese)

[4] Li Daojing, Du Jianbo, Ma Meng, et al. System analysis of spaceborne synthetic aperture ladar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 1130002. (in Chinese)

[5] Hong Guanglie, Wang Jianyu, Meng Zhaohua, et al. Chirped amplitude modulation and range dimension processing of near infrared synthetic aperture ladar[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(3): 229-234. (in Chinese)

[6] Funk E, Reintjes J, Rickard L J, et al. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. Optics Letters, 2002, 27(22): 1983-1985.

[7] Ricklin J, Schumm B, Dierking M, et al. Synthetic aperture ladar for tactical imaging [R]. DARPA Strategic Technology Office, 2007.

[8] Krause B W, Buck J, Ryan C, et al. Synthetic aperture ladar flight demonstration [C]//Applications and Technology. Optical Society of America, 2011: PDPB7.

[9] Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of

interferometric and spotlight synthetic aperture ladar techniques [J]. Opt Express, 2012, 20(22): 24237-24246.

[10] Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu, et al. 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging ladar [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29 (7): 2030-2032. (in Chinese)

[11] Xing Mengdao, Guo Liang, Tang Yu, et al. Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 290-294. (in Chinese)

[12] Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Ya'nan, et al. A large-aperture synthetic aperture imaging ladar demonstrator and its verification in laboratory space[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 112-116. (in Chinese)

[13] Liu Guoguo, Wu Jin, Zhu Bingqi, et al. Nonlinear degradation and compensation on range resolution in synthetic aperture ladar experiment [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(9): 934-938. (in Chinese)

[14] Li Fei, Zhang Hongyi, Wu Jun, et al. Mechanism and experiment of code intensity-modulation on synthetic aperture ladar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (9): 2575-2582. (in Chinese)

[15] Li Fei, Zhang Hongyi, Xu Weiming, et al. Design and experiment of space borne synthetic aperture ladar for non-cooperative targets imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(10): 1030001. (in Chinese)

[16] Hu Yihua, Shu Rong. Airborne and spaceborne laser sounding technology and application [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 8-13. (in Chinese)

[17] Wu Jin, Yang Zhaosheng, Zhao Zhilong, et al. Synthetic aperture ladar imaging with one-way far-field diffraction[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(6): 514-518. (in Chinese)

[18] Xiong Tao, Wang Shuang, Hou Biao. A resample-based SVA algorithm for sidelobe reduction of SAR/ISAR imagery with noninteger nyquist sampling rate[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 53(2): 1016-1028.

[19] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2006(3): 1289-1306.

[20] Zhang Lei, Xing Mengdao, Jun Li, et al. Resolution enhancement for inversed synthetic aperture radar imaging under low SNR viaimproved compressive sensing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48 (10): 3824-3838.

[21] Dai Qionghai, Fu Changjun, Ji Xiangyang. Research on compressed sensing [J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(3): 425-434.

[22] Stankwitz H C, Dallaire R J, Fienup J R. Nonlinear apodization for side lobe control in SAR imagery [J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1995, 31(1): 267-279.

[23] Zhou Yuren, Geng Aihui, Zhang Qiang, et al. Fusion of infrared and visible images based on compressive sensing[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 855-863. (in Chinese)

[24] Zhu Qiuping, Yan Jia, Zhang Hu, et al. Real-time tracking using multiple features based on compressive sensing [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2): 437-444. (in Chinese)