

逆合成孔径激光雷达鸟类目标压缩感知识别方法

朱 丰^{1,2}, 张 群¹, 冯有前³, 罗 迎¹, 李开明¹, 梁必帅¹

(1. 空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077; 2. 中国人民解放军 93508 部队, 北京 100079;
3. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051)

摘 要: 鸟类目标的实时探测与准确识别具有重要意义。提出一种基于压缩感知的逆合成孔径激光雷达鸟类目标探测、成像与识别方法。该方法先利用光外差手段和压缩感知采样来大幅降低鸟类目标逆合成孔径激光雷达回波信号距离向上的采样率, 再利用时频分析方法来判断鸟类目标运动状态, 然后利用压缩感知重构算法来获得鸟类目标高分辨二维像以及利用拟合算法来提取鸟类目标微多普勒特征。结合获得的高分辨二维像和微多普勒特征可共同进行鸟类目标的鉴别和识别。仿真结果验证了文中方法的有效性。

关键词: 鸟类目标识别; 逆合成孔径激光雷达; 压缩感知; 运动状态; 微多普勒

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0256-06

Compressed sensing identification approach for avian with inverse synthetic aperture lidar

Zhu Feng^{1,2}, Zhang Qun¹, Feng Youqian³, Luo Ying¹, Li Kaiming¹, Liang Bishuai¹

(1. Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. No.93508 Unit of PLA, Beijing 100079, China; 3. Institute of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: It is very significant to detect avian in a real time and identify them exactly. A novel approach of avian detection, imaging and identification was proposed in this paper with inverse synthetic aperture lidar (ISAIL) based on compressed sensing. The proposed approach can be stated as follows. Firstly, the optical heterodyne method and compressed sensing sampling were employed orderly to diminish sampling rate of the avian ISAIL echoes in the range. Secondly, the time-frequency analysis technique was engaged to discriminate the different moving statuses of the bird. What's more, the compressed sensing reconstruction algorithm was utilized to obtain the high resolution two-dimensional image of the bird and the fitting algorithm was used to extract the micro-Doppler feature of the bird. The avian identification and recognition can be executed based on the reconstructed high resolution two-dimensional image and the extracted micro-Doppler feature of the bird. The effectiveness of the proposed approach is validated by the simulation results.

Key words: avian identification; inverse synthetic aperture lidar; compressed sensing; moving status; micro-Doppler

收稿日期: 2012-05-22; 修订日期: 2012-06-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2010CB731905)

作者简介: 朱丰(1983-), 男, 博士生, 研究方向为雷达成像与信号处理。Email: zhufeng83@gmail.com

导师简介: 张群(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达信号与信息处理、雷达成像等方面的研究。

Email: zhangqunnus@gmail.com

0 引 言

鸟类目标的准确识别对于人类航空事业的进步、鸟类生态学的发展以及禽流感疫情的防治都具有非常重要的意义。参考文献[1]提出了利用线性调频步进信号来合成足够大的带宽以完成对鸟类目标的高分辨成像与有效识别。然而,由于线性调频步进信号需要发射和接收相当多的小带宽子脉冲来进行合成处理,这样在对鸟类目标的观测时间内,很有可能会出现子脉冲受损、被干扰、被截获等现象。

基于激光信号的逆合成孔径雷达,即逆合成孔径激光雷达 (Inverse Synthetic Aperture Imaging Lidar, ISAIL)可有效完成鸟类目标的高分辨成像^[2-4],进而实现鸟类目标的准确识别。但由于 ISAIL 是通过发射超大带宽的激光信号来实现高分辨成像的,这样会给信号的采样和处理带来很大的困难,传统的 A/D 采样系统将难以满足奈奎斯特采样定理的要求。针对这一问题,文中首先利用光外差手段进行目标探测^[4],以降低回波信号带宽,并进一步引入压缩感知 (Compressed sensing, CS)理论^[5],完成对鸟类目标回波信号的稀疏化采样以及有效重构。

通常,鸟类目标的运动状态包括滑翔状态和振翅状态^[1]。不同的运动状态阶段都可以为鸟类目标的识别工作提供有益的结果。文中在对鸟类目标处于不同状态时的 ISAIL 回波信号进行理论分析的基础上,针对稀疏采样后回波信号,提出一种基于时频分析和波形熵的鸟类目标运动状态判别方法。进一步,对于鸟类目标滑翔阶段的稀疏采样信号,利用 CS 理论重构高分辨谱图,并完成高分辨二维成像;对于鸟类目标振翅阶段的稀疏采样信号,同样利用 CS 理论重构高分辨谱图,并在重构出的谱图上提取鸟类目标翅膀振动带来的微多普勒特征,以估计其振翅频率。再综合利用不同阶段所获得的处理结果来完成鸟类目标的鉴别与识别工作。

1 ISAIL 回波信号分析与处理

1.1 ISAIL 成像模型

假设鸟类目标与 ISAIL 之间的几何关系如图 1 所示,雷达固定在 XOY 平面的原点 O 处,鸟类目标

由 L 个散射点组成, Q_1, \dots, Q_L, P 为参考点, $(x_1, y_1), \dots, (x_L, y_L)$ 分别为散射点 Q_1, \dots, Q_L , 相对于参考点 P 的坐标,目标运动方向平行于 Y 轴,运动速度为 v。

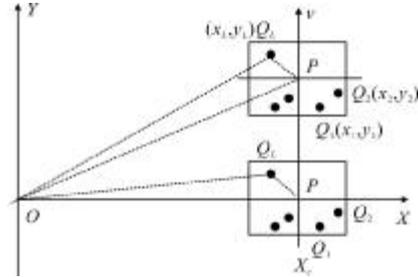


图 1 逆合成孔径激光雷达成像几何关系图

Fig.1 Imaging geometry of the ISAIL

ISAIL 通过发射极大带宽的线性调频激光信号实现对目标成像,发射信号的表达式为:

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \mu t^2\right)\right) \quad (1)$$

其中

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) = \begin{cases} 1, & -T_p/2 \leq t \leq T_p/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_c 为载频; T_p 为脉冲宽度; μ 为调频率。

1.2 基于光外差的回波信号处理

在慢时间时刻,雷达收到的回波信号为:

$$s_{\text{return}}(t, \tau) = \sum_{i=1}^L \sigma_i \text{rect}\left(\frac{t - 2R_i(\tau)/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{2R_i(\tau)}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(t - \frac{2R_i(\tau)}{c}\right)^2\right)\right) \quad (3)$$

式中: $R_i(\tau)$ 为散射点 Q_i 到雷达的距离; c 为光速; σ_i 为其对应的反射系数。假设已经完成了精确的运动补偿,其参考信号为:

$$s_r(t, \tau) = \text{rect}\left(\frac{t - 2R_{\text{ref}}(\tau)/c}{T_{\text{ref}}}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{2R_{\text{ref}}(\tau)}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(t - \frac{2R_{\text{ref}}(\tau)}{c}\right)^2\right)\right) \quad (4)$$

式中: $R_{\text{ref}}(\tau)$ 为参考点 P 与雷达之间的距离; T_{ref} 为参考信号的脉冲宽度,通常略大于 T_p 。

光外差探测技术是利用两个相干光场在探测器光敏面上的交迭相干性和探测器的平方律响应特性来实现光混频的探测技术,它能够有效保留被探测光场的相位信息。因此,可将其应用于鸟类目标 ISAIL 信号处理中来实现回波信号与参考信号的混频处理,以有效降低回波信号超高的载频。经过光外差探

测后,可得:

$$s_c(t, \tau) = s_{\text{return}}(t, \tau) s_r^*(t, \tau) = \sum_{l=1}^L \sigma_l \text{rect} \left(\frac{t - 2R_l(\tau)/c}{T_p} \right) \cdot \exp \left(j \left(-\frac{4\pi}{c} \mu \left(t - \frac{2R_{\text{ref}}(\tau)}{c} \right) R_{l\Delta}(\tau) - \frac{4\pi}{c} f_c R_{l\Delta}(\tau) + \frac{4\pi\mu}{c^2} R_{l\Delta}^2(\tau) \right) \right) \quad (5)$$

其中, $R_{l\Delta}(\tau) = R_l(\tau) - R_{\text{ref}}(\tau)$ 。以参考点时间为基准,即令 $t' = t - 2R_{\text{ref}}(\tau)/c$, 有

$$s_c(t', \tau) = \sum_{l=1}^L \sigma_l \text{rect} \left(\frac{t' - 2R_l(\tau)/c}{T_p} \right) \cdot \exp \left(j \left(-\frac{4\pi}{c} \mu R_{l\Delta}(\tau) t' - \frac{4\pi}{c} f_c R_{l\Delta}(\tau) + \frac{4\pi\mu}{c^2} R_{l\Delta}^2(\tau) \right) \right) \quad (6)$$

通过分析可知,经过光外差处理后,信号带宽降为 $\max \{2\mu R_{l\Delta}(\tau)/c\}$, 采样频率只需要达到 $2\max \{2\mu R_{l\Delta}(\tau)/c\}$ 即可,但对于鸟类目标逆合成孔径激光雷达信号而言,该采样频率的要求仍然比较高。因此,再利用 CS 理论来完成对信号的进一步降采样。

1.3 基于 CS 理论的 ISAIL 信号采样

对光外差处理后的信号(如公式(6)所示)做关于快时间 t' 的傅里叶变换,即获得 sinc 状的窄脉冲,对其进行离散采样后的窄脉冲个数($\leq L$)相对于整个频域的采样数是很少的,满足 CS 理论中需要的稀疏性。该过程所运用的傅里叶变换矩阵满足 CS 理论中需要的正交性。

假设对 $s_c(t', \tau)$ 每列利用奈奎斯特采样定律采样后得到的结果为 $s_{cr}(t'_n)$, $n=1, 2, \dots, N$, 其中 N 表示基于奈奎斯特定律的采样数。依据 CS 理论,在用模拟信息采样来代替传统的模数转换时,构造一个随机部分单位阵作为观测矩阵 $\Phi_{M \times N} = \{\phi_{m,n}\}$, $m=1, 2, \dots, M$, 即

$$\{\phi_{m,n}\} = \begin{cases} 1, & \{\phi_{m,n}, n | t'_m = t'_n\} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\phi_{1,1} = \phi_{M,N} = 1$, 可得到观测后的降维结果为:

$$s_{cr}(t'_m) = \Phi s_{cr} t'_n \quad (8)$$

观测过程如图 2 所示。

可以看出,通过利用文中所构造的随机部分单位阵进行观测后,观测结果的采样率比起原始信号有了明显的降低。定义降维比为:

$$\eta = M/N \quad (9)$$

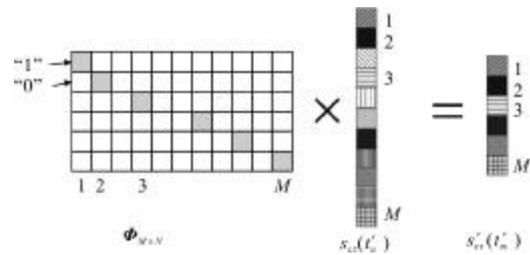


图 2 观测过程示意图

Fig.2 Chart of the measurement process

1.4 基于时频分析与波形熵的运动状态自动识别方法

进一步分析,利用 CS 理论对鸟类目标 ISAIL 信号进行降采样后,可获得 $s'_{cr}(t'_m)$, 将 $s'_{cr}(t'_m)$ 重写为矩阵形式,即

$$s'_c(t'_m, \tau) = \sum_{l=1}^L \sigma_l \text{rect} \left(\frac{t'_m - 2R_l(\tau)/c}{T_p} \right) \cdot \exp \left(j \left(-\frac{4\pi}{c} \mu R_{l\Delta}(\tau) t'_m - \frac{4\pi}{c} f_c R_{l\Delta}(\tau) + \frac{4\pi\mu}{c^2} R_{l\Delta}^2(\tau) \right) \right) \quad (10)$$

通过一些简单处理将上式中 RVP 和包络斜置项补偿掉^[1], 即

$$s'_c(t'_m, \tau) \approx \sum_{l=1}^L \sigma_l \text{rect} \left(\frac{t'_m - 2R_{l\Delta}(\tau)/c}{T_p} \right) \cdot \exp \left(j \left(-\frac{4\pi}{c} \mu R_{l\Delta}(\tau) t'_m \right) \right) \quad (11)$$

当 $s'_c(t'_m, \tau)$ 取定一个 t'_m 时,为 τ 的一维函数,可写为 $s'_{ct_m}(\tau)$, 下面针对鸟类目标处于不同状态时的进一步分析,有效判断鸟类目标的不同运动状态。

对于滑翔状态,由于目标可以假设为刚体,因此, $s'_{ct_m}(\tau)$ 中 $R_{l\Delta}(\tau)$ 对于任何一个 l 都可以假设为常数,这样, $s'_{ct_m}(\tau)$ 的频率个数由取定的 t'_m 所在距离单元内的目标散射点个数所决定,且在不同慢时间时刻,该频率是不变的。

对于振翅状态,由于翅膀的振动会带来大量的微多普勒效应,因此, $s'_{ct_m}(\tau)$ 中的 $R_{l\Delta}(\tau)$ 对于任何一个都不能再假设为常数,它是慢时间 τ 的一个函数^[1], 即

$$R_{l\Delta}(\tau) = R_{l\Delta 0} + v\tau \quad (12)$$

这样 $s'_{ct_m}(\tau)$ 的频率个数与慢时间 τ 有关,且随着慢时间 τ 的变化而改变。

因此,可以通过对 s'_{ct_m} 做时频分析来为鸟类目标不同运动状态的判别提供有效依据,文中采用重排

维格纳分布 (Reassign Smoothed Pseudo Wigner Ville Distribution, RSPWVD)来完成^[6],即

$$P_{S_{ct_m}'}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\Delta\tau, \Delta f) WVD_{S_{ct_m}'}(\tau - \Delta\tau, f - \Delta f) d\Delta\tau d\Delta f \quad (13)$$

其中, $\Phi(\Delta\tau, \Delta f)$ 为时频平面的二维低通滤波器; $WVD_{S_{ct_m}'}(\tau, f)$ 为传统的维格纳分布 (Wigner Ville Distribution, WVD), 表达如下

$$WVD_{S_{ct_m}'}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{ct_m}'(\tau + \frac{\Delta\tau}{2}) S_{ct_m}^{*'}(\tau - \frac{\Delta\tau}{2}) \exp(-j2\pi f\Delta\tau) d\Delta\tau \quad (14)$$

将鸟类目标处于滑翔阶段时的 $P_{S_{ct_m}'}(\tau, f)$ 记为

$P_{gliding}(\tau, f)$, 振翅阶段时的 $P_{S_{ct_m}'}(\tau, f)$ 记为 $P_{flapping}(\tau, f)$, 进一步分析, 由于 $P_{gliding}(\tau, f)$ 中的频率个数是常数, 不随慢时间 τ 的变化而变化, 因此, 当取定 $P_{gliding}(\tau, f)$ 中一个 τ 时, $P_{gliding}(\tau, f)$ 波形仅具有数个较大的峰值, 即聚焦效果较好。然而 $P_{flapping}(\tau, f)$ 中的频率个数随慢时间 τ 的变化而变化, 因此, 当取定 $P_{flapping}(\tau, f)$ 中一个 τ 时, $P_{flapping}(\tau, f)$ 波形中不具有明显的较大峰值, 即聚焦效果较差。

这样, 可以通过衡量 $P_{S_{ct_m}'}(\tau, f)$ 中每个慢时间时刻 τ 所对应波形的聚焦效果来有效判别鸟类目标的不同运动状态, 文中采用波形熵函数来完成。波形熵函数是一种对波形的评价函数, 其值越小, 波峰越尖锐, 聚焦效果越好, 针对取定 $P_{S_{ct_m}'}(\tau, f)$ 中一个 τ 值后的 $P_{S_{ct_m}'}(\tau, f)$, 定义为^[7]:

$$E = \sum_{f=0}^{F-1} P_f \cdot \log_{10} P_f \quad (15)$$

其中

$$P_f = \frac{|P_{S_{ct_m}'}(\tau, f)|}{\|G\|}, \|G\| = \sum_{f=0}^{F-1} |P_{S_{ct_m}'}(\tau, f)|, f=0, 1, 2, \dots, F \quad (16)$$

式中: F 为时频分析处理时的频率采样个数。对于波形熵结果 E , 给定门限 g , 判断: 当 $E < g$, 即鸟类目标处于滑翔状态, 当 $E > g$, 即鸟类目标处于振翅状态。

1.5 基于 CS 理论的 ISAIL 谱图重构

针对基于 CS 理论的鸟类目标 ISAIL 谱图重构问题, 构造满足正交特性的离散傅里叶变换阵为稀疏变换矩阵:

$$\Psi_N = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W_N & \dots & W_N^{N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & W_N^{N-1} & \dots & W_N^{(N-1)^2} \end{bmatrix}, W_N = \exp\left(-j\frac{2\pi}{N}\right) \quad (17)$$

通过参考文献[8]中的分析可知, 在文中所构造的观测矩阵 Φ 与稀疏变换矩阵 Ψ 的乘积 $\Phi\Psi$ 满足 RIP 性质。

依照 CS 理论构造如下最优化模型,

$$\hat{S}_{ct}(\mathbf{f}_n) = \operatorname{argmin} \|S_{ct}(\mathbf{f}_n)\|_0, \text{s.t. } S_{ct}(\mathbf{f}_n) = \Phi\Psi S_{ct}(\mathbf{f}_n) \quad (18)$$

利用平滑 l_0 (Smoothed l_0 Norm, SLO) 算法^[9], 求解出的结果 $\hat{S}_{ct}(\mathbf{f}_n)$, 即为所求的鸟类目标高分辨一维距离像。将重构出的各个慢时间时刻 τ 所对应的高分辨一维距离像排列成矩阵可写为 $\hat{S}_c(\mathbf{f}_n, \tau)$, 即为鸟类目标 ISAIL 谱图。

1.6 鸟类目标特征提取与成像识别方法

当重构出鸟类目标 ISAIL 谱图 $\hat{S}_c(\mathbf{f}_n, \tau)$ 后, 对于鸟类目标处于不同运动状态的情况分别处理, 并综合利用处理结果来完成鸟类目标的识别。

对于鸟类目标处于滑翔状态情况, 可对重构出的谱图 $\hat{S}_c(\mathbf{f}_n, \tau)$ 做关于慢时间 τ 的傅里叶变换, 即可得到鸟类目标的高分辨二维像^[1]为:

$$S_{2D}(\mathbf{f}_n, \xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{S}_c(\mathbf{f}_n, \tau) \exp(-j\xi\tau) d\tau \quad (19)$$

对于鸟类目标处于振翅状态情况, 可在重构出的谱图 $\hat{S}_c(\mathbf{f}_n, \tau)$ 上先设置出一定的门限, 取出 $\hat{S}_c(\mathbf{f}_n, \tau)$ 中大于该门限的所有元素, 并利用最小二乘拟合算法来提取由鸟类目标翅膀振动带来的微多普勒曲线^[1,10], 其中利用 Fourier 函数作为拟合函数。

假设取出 l 个元素进行拟合处理, 记为 $u_i, i=1, 2, \dots, l$, 则令:

$$S = \sum_{i=0}^l \omega_i [u_i - \varphi(i, a_1, a_2, \dots, a_2)] \quad (20)$$

拟合目标函数为 $\min\{S\}$, 其中 ω_i 为各元素的权重, 通常取值为 $1/l$, $\varphi(i, a_1, a_2, \dots, a_2)$ 为 Fourier 函数, z 为待定系数的个数。当估计出 Fourier 函数 φ , 通过计算获得鸟类目标的翅膀振动频率。

结合鸟类目标处于滑翔状态时获得的高分辨二维像和处于振翔状态时获得的翅膀振动频率来共同完成鸟类目标的识别。

2 计算机仿真实验

假设 ISAIL 的初始载频 $f_c=30\ 000\ \text{GHz}$ ，发射的线性调频激光信号的脉冲宽度为 $1\ \mu\text{s}$ ，调频斜率为 1.50×10^6 ，带宽为 $15\ \text{GHz}$ ，可获得距离高分辨率 $\Delta_R=0.01\ \text{m}$ ，假设发射信号的脉冲重复频率为 $200\ \text{Hz}$ 。

设鸟类目标模型如图 3 所示，其运动速度 $v=20\ \text{m/s}$ ，相对于雷达的径向距离为 $100\ \text{km}$ ，俯仰角为 60° ，假设 ISAIL 观测累计时间为 $5\ \text{s}$ ，其中鸟类目标在前 $2.5\ \text{s}$ 处于滑翔状态，在后 $2.5\ \text{s}$ 处于振翅状态，

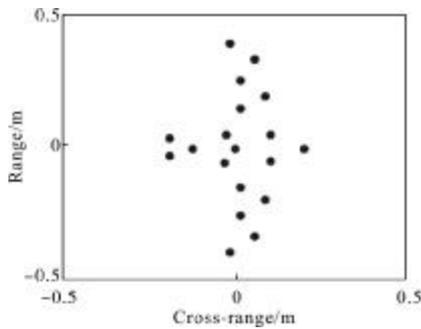


图 3 鸟类目标模型图
Fig.3 Avian model

且振翅频率为 $1\ \text{Hz}$ 。这样，鸟类目标处于两个状态时所获得的横向距离高分辨率均为 $\Delta_c=0.01\ \text{m}$ 。当距离向降维比为 50% 时，利用 CS 采样方法获得的降采样结果如图 4 所示。图 5 为利用重排维格纳分布对图 4 中第 99 个距离单元信号进行时频分析的结果图，可以看出，当鸟类目标处于滑翔阶段时，即前 $2.5\ \text{s}$ 时，时频图具有较好的聚焦效果，而当鸟类目标处于振翅阶段时，即后 $2.5\ \text{s}$ 时，时频图不具较好的聚焦效果，这与前文的分析是一致的。进一步对图 5 中各个慢时间时刻对应的信号数据计算其波形熵值，结果如图 6 所示，可以看出，给定门

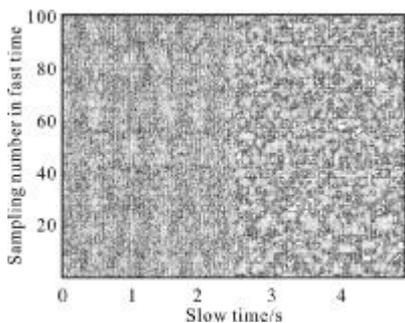


图 4 CS 采样方法获得的降采样结果
Fig.4 Down sampling result by CS method

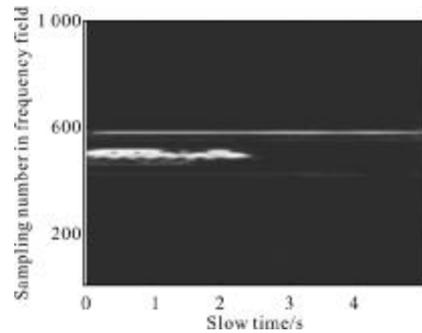


图 5 CS 采样信号时频分析结果

Fig.5 Time-frequency analysis for CS down sampling result

限 2.4 ，当波形熵值小于门限 2.4 时，鸟类目标处于滑翔阶段，当波形熵值大于门限 2.4 时，鸟类目标处于振翅阶段。

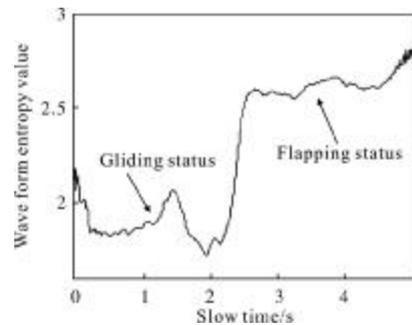


图 6 时频分析图中各慢时间时刻信号的波形熵值
Fig.6 Waveform entropies of signals corresponding to each slow time in time-frequency analysis result

利用 SLO 算法重构出的鸟类目标高分辨谱图如图 7 所示，可以看出，鸟类目标滑翔阶段的谱图是由一条条平整的直线所组成的，而振翅阶段的谱图是由一条条曲线所组成的。针对滑翔阶段的谱图，对其做关于慢时间的傅里叶变换，即可得到鸟类目标高分辨二维像如图 8 所示。针对振翅阶段的谱图，利用

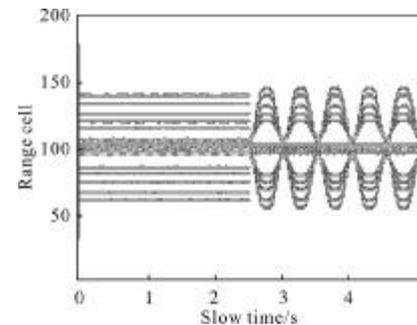


图 7 重构出的高分辨谱图
Fig.7 Reconstructed high-resolution spectrogram

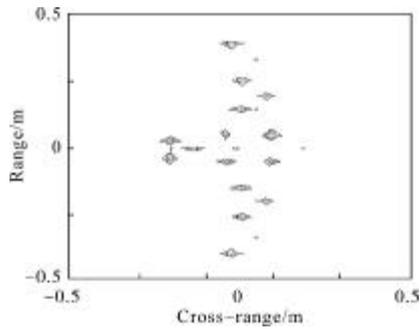


图 8 滑翔阶段谱图获得的鸟类目标高分辨二维像
Fig.8 Avian high-resolution two-dimensional image
in gliding status

图像处理方法,通过设置一个门限值可以提取出谱图中振翅微多普勒特征的轮廓信息;再通过基于 5 阶 Fourier 函数的拟合处理可以获得振翅微多普勒特征曲线,如图 9(a)、(b)所示,估计该曲线的周期为 1 s,即获得鸟类目标的振翅频率为 1 Hz,这与原始假设是一致的。综合利用图 8 所示的鸟类目标高分辨二维像和所估计出的鸟类目标 1 Hz 的振翅频率来完成不同鸟类目标的鉴别与识别。

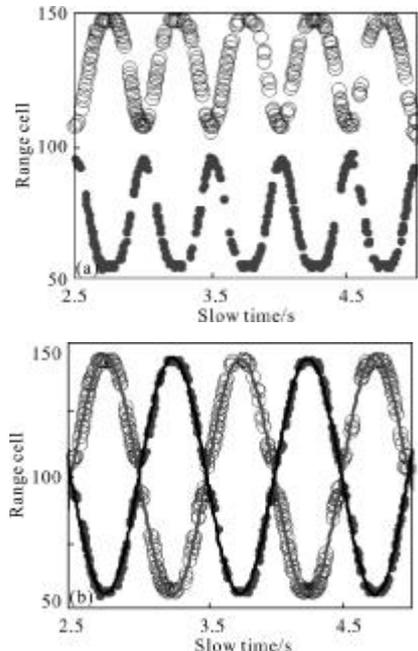


图 9 振翅谱图中微多普勒特征轮廓信息及其拟合特征曲线
Fig.9 Outline of micro-Doppler feature and its fitting curves
in flapping spectrogram

3 结 论

文中提出利用逆合成孔径激光雷达来对鸟类目

标进行探测、成像和识别。首先利用光外差手段和压缩感知理论大幅降低鸟类目标逆合成孔径激光雷达回波信号采样数据。当该压缩采样数据,提出一种基于时频分析和波形熵的鸟类目标运动状态自动判别方法。在此基础上,针对鸟类目标处于滑翔阶段,对其进行高分辨二维成像处理;当鸟类目标处于振翅阶段,对其进行微多普勒特征提取处理,并估计振翅频率;再综合利用两个阶段所获得的处理结果来完成鸟类目标的鉴别与识别。文中的研究工作可为鸟类目标的准确识别提供新的思路和技术支撑。

参考文献:

- [1] Feng C, Zhu F, Li S. Avian micro-Doppler feature extraction based on frequency-stepped chirp ISAR [C]//The International Conference on Signal and Image Processing, 2010: 1-4.
- [2] Li Fan, Wu Shuangyang, Zheng Yongchao, et al. Overview of the development of synthetic aperture lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(1): 55-65. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] Zhang Wenrui, Zeng Xiaodong, Man Xiangkun. Study on optical heterodyne detection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 146-147. (in Chinese)
- [5] Donoho D. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [6] Liang Hong, Hu Xujuan, Zhu Yunzhou. Multi-component LFM signal detection based on reassign-smooth-pseudo-Wigner-Ville distribution [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(13): 3030-3033. (in Chinese)
- [7] Jeong H, Kim H, Kim H. Application of subarray averaging and entropy minimization algorithm to stepped frequency ISAR autofocus [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(4): 1144-1154.
- [8] Candes E, Tao T. Near optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52 (12): 5406-5425.
- [9] Mohimani H, Babaie-Zadeh M, Jutten C. A fast approach for overcomplete sparse decomposition based on smoothed l0 norm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(1): 289-301.