

文章编号:1004-4213(2010)07-1272-6

逆合成孔径成像激光雷达数据采集技术*

何劲¹,张群^{1,2},杨小优¹,罗迎¹,吉楠³

(1 空军工程大学 电讯工程学院,西安 710077)

(2 复旦大学 波散射与遥感信息国家教育部重点实验室,上海 200433)

(3 95813 部队,福州 350001)

摘要:逆合成孔径成像激光雷达能够实现对运动目标的高分辨实时成像,但激光信号的极大带宽和目标回波信号的微弱性给雷达回波数据的接收和处理带来了较大困难.针对这一问题,提出了基于光外差探测手段和压缩感知理论相结合的信号采样方法,首先通过光外差探测降低回波信号的有效带宽,再结合压缩感知理论实现对信号的稀疏化采样和重构.仿真结果证明了运用本文所提出的采样方法,在使用远低于奈奎斯特定理所规定的采样率时,仍然能够实现对目标的高质量成像.

关键词:逆合成孔径成像激光雷达;目标探测;信号采样;光外差探测;压缩感知

中图分类号: TN957

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103907.1272

0 引言

传统的光学成像系统和雷达成像系统的空间分辨率都受波长和系统孔径的限制,要实现远距离高分辨成像需要很大的系统孔径,这在实际应用中会受到很多条件的限制^[1].合成孔径技术的出现有效解决了这一问题,它利用雷达与目标的相对运动,通过对不同位置上接收到的信号的积累,经过信号处理后可以等效为一个很大的合成孔径天线^[2].逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)就是基于合成孔径技术的一种高分辨成像雷达,它主要针对运动目标进行成像.但在对微小目标、远距离目标进行成像时,现有的基于宽带微波技术的逆合成孔径雷达已不能提供足够的距离分辨率.因此考虑将逆合成孔径技术用于带宽更大的激光波段以实现对运动目标的超高分辨实时成像^[3].

现有的激光成像雷达采用的都是真实孔径,其工作体制大致分为逐点扫描和泛光照射两种模式,它们受到扫描速率和探测器阵列元数的限制,无法完成对运动目标的高分辨成像^[4].而逆合成孔径成像激光雷达通过将逆合成孔径信号处理技术与极大带宽的相干激光信号相结合,能实现对运动目标的超高分辨实时成像,因此,在目标成像与识别等领域具有重要的应用价值^[5].但是,逆合成孔径成像激光

雷达是通过发射超大带宽的激光信号来实现成像,这给信号的采样和处理带来了很大的困难,普通的 A/D 采样系统将无法满足奈奎斯特采样定理的要求.针对这一问题,本文首先利用光外差手段进行目标探测,以降低回波信号带宽,并在此基础上,进一步引入压缩感知理论,完成了对海量目标回波信号的稀疏化采样及有效重构.实验结果证明,该方法能够在保证成像质量的情况下,实现对回波信号的有效压缩和采样.

1 逆合成孔径成像激光雷达基本原理

逆合成孔径成像激光雷达基本结构如图 1^[3].雷达的发射系统主要由控制装置、发射激光器和扩束装置组成,与普通激光成像雷达的最大区别在于,逆合成孔径成像激光雷达要利用扩束装置对发射的信号进行处理,使发射的激光信号波束在一定距离外能有效覆盖足够大的区域,并利用目标穿过波束时雷达与目标间转角的变化实现成像.由于光频段信号的相位信息难以通过直接探测来获取,回波信号很微弱且混在干扰噪音中不容易分辨,因此光波段回波信号的强度、相位信息可以通过光外差相干探测的方式来获得,利用光外差探测还能够有效降低回波信号的带宽,减少信号采样的压力,所以选择光外差手段探测回波信号^[6],并通过有效的信号处理技术和成像方法就能实现对运动目标的成像和识别.

逆合成孔径成像激光雷达运用了逆合成孔径技术来实现对目标的高分辨成像,它与真实孔径雷达

* 国家自然科学基金(60971100)、陕西省电子信息系统系统集成重点实验室基金(200903B)和陕西省自然科学基金研究计划项目(2007F28)资助

Tel: 029-84791777

Email: hjelva@163.com

收稿日期: 2009-12-01

修回日期: 2010-03-16

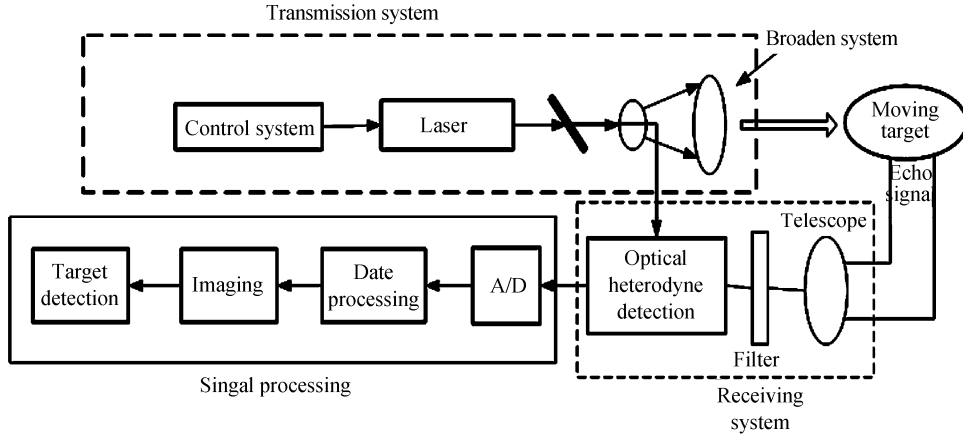


图 1 逆合成孔径成像激光雷达系统结构

Fig. 1 Inverse synthetic aperture radar imaging LIDAR system

相同之处是在距离向上两者都是利用发射宽带信号来获得高的距离向分辨率,但在方位向上,真实孔径雷达的分辨率是衍射极限分辨率,而逆合成孔径成像激光雷达是通过合成孔径原理来实现高分辨率^[7],这突破了实际孔径对方位向分辨率的限制,可以用小的发射天线孔径来获得高的方位向分辨率。

2 光外差探测技术

在逆合成孔径成像激光雷达系统中,如何实现大带宽激光信号的采样是需要解决的难题之一。本文提出了基于光外差探测技术与压缩感知理论相结合的信号采样方法,以完成对海量回波数据的采集。

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,其基本实现过程如图 2。

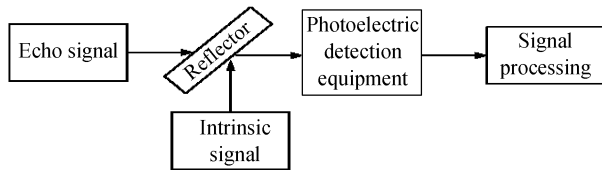


图 2 光外差探测示意图

Fig. 2 Optical heterodyne detection

假设信号光光束为 $E_s(t)$, 本振光光束为 $E_L(t)$, 均为线偏振光且偏振方向相同^[8], 则

$$E_s(t) = E_{s0}(t) \cos(2\pi f_s t + \varphi_s) \quad (1)$$

$$E_L(t) = E_{L0}(t) \cos(2\pi f_L t + \varphi_L) \quad (2)$$

两束光同方向入射到光电探测器上且在满足相干条件的情况下,光电探测器光敏面上总光强电流为

$$i(t) = D \cdot \langle [E_s(t) + E_L(t)]^2 \rangle \quad (3)$$

式中,符号 $\langle \rangle$ 表示在几个光频周期上的时间平均, D 表示光电探测器的转换因子。式中共包含四个频率

因子,首先可以滤除相位项为 $\cos^2(2\pi f_s t + \varphi_s)$ 和 $\cos^2(2\pi f_L t + \varphi_L)$ 的直流分量;而由于 $(f_s + f_L)$ 很高,相位项为 $\cos[2\pi(f_s + f_L)t + (\varphi_s + \varphi_L)]$ 的分量将会超过光电探测器的响应范围;相位项为 $\cos[2\pi(f_s - f_L)t + (\varphi_s - \varphi_L)]$ 的分量只要差频 $(f_s - f_L)$ 小于光电探测器的截止响应频率,探测器就会有相应的光电流输出,因此,可以得到

$$i_{IF} = DE_s E_L \cos[2\pi(f_s - f_L)t + (\varphi_s - \varphi_L)] \quad (4)$$

光外差探测是一种全息探测技术,振幅调制、频率调制及相位调制的光波所携带的信息,均可实现解调^[9]。更重要的是,它可以大大降低回波信号的带宽,减小信号采样的压力。假逆合成孔径成像激光雷达发射的线性调频激光信号可以表示为

$$s_i(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \cos\left(2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right) \quad (5)$$

式中 $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数, f_c 表示信号的载频, μ 表示信号的调频斜率。假设 i 为目标上任一散射点,在 t 时刻点 i 的雷达距离 R , 则接收到的回波信号为

$$s_r(t) = \text{rect}\left(\frac{t - 2R/c}{T_p}\right) \cdot \cos\left(2\pi\left(f_c(t - 2R/c) + \frac{1}{2}\mu(t - 2R/c)^2\right)\right) \quad (6)$$

式中 c 表示电磁波的传播速度。假设能够准确地估计回波信号的运动参量,则目标的参考信号可以表示为

$$s_0(t) = \text{rect}\left(\frac{t - 2R_0/c}{T_{ref}}\right) \cdot \cos\left(2\pi\left(f_c(t - 2R_0/c) + \frac{1}{2}\mu(t - 2R_0/c)^2\right)\right) \quad (7)$$

式中 R_0 表示在 t 时刻参考点到雷达的距离, T_{ref} 表示参考信号的持续时间,它要稍长于发射信号的持续时间 T_p 。经过光外差探测处理,可以得到

$$s_c(t) = \text{rect}\left(\frac{t - 2R/c}{T_p}\right) \cdot$$

$$\cos\left(\frac{4\pi\mu}{c^2}(R^2 - R_0^2) - \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R - \frac{4\pi\mu}{c}\Delta Rt\right) \quad (8)$$

式中 $\Delta R = R - R_0$.

假设发射信号的带宽 $B = 100$ GHz, 持续时间 $T_p = 10$ μ s, 目标尺寸范围为 $[R_0 - R_{\max}, R_0 + R_{\max}]$, $R_{\max} = 5$ m, 如果直接对回波信号进行采样, 根据奈奎斯特采样定理, 采样率需要达到 200 GHz, 现阶段这根本不可能在硬件中实现. 但经过外差处理后, 信号带宽为降为 $4\mu R_{\max}/c$, 采样频率只需要达到 $8\mu R_{\max}/c$ 或者 $8BR_{\max}/(T_p c)$, 即 1.33 GHz. 但由于激光信号的带宽通常会达到上千 GHz, 因此, 仅依靠外差探测仍难以完全满足采样的要求, 所以, 我们进一步采用了压缩感知理论来完成对信号的采样.

3 基于压缩感知理论的 ISAIL 回波信号采样及目标重构

3.1 压缩感知理论

压缩感知理论 (Compressed Sensing, CS) 是由 Candes^[10]、Donoho^[11] 等人于 2004 年提出的, 它的核心思想是只要信号在某一个正交空间具有稀疏性, 就能以较低频率的采样信号高概率重构原信号. 因此, 可以有效减低信号的采样率. 压缩感知理论的实现过程如图 3.

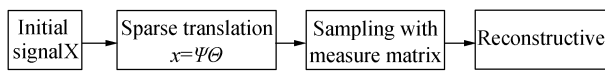


图 3 压缩感知理论

Fig. 3 Compressed sensing theory

假设实信号 $X \in R^{N \times 1}$, 它的稀疏正交基为 $\Psi = \{\psi_i\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, 且稀疏基中共有 K 个稀疏表示点, $K \ll N$, 则实信号 X 可以表示为

$$X = \sum_{i=1}^N \theta_i \psi_i = \sum_{i=1}^K \theta(i_l) \psi_{i_l} \quad (9)$$

式中, $\psi_{i_l} \in \Psi$, 系数 $\theta(i_l)$ 可以表示为矩阵形式 Θ , 它是一个包含 K 个非零元素的 $N \times 1$ 的列向量.

令 Φ 表示一个随机正交测量矩阵, Y 表示信号 X 被测量后的观测向量, 可以说观测过程就是利用 $M \times N$ 观测矩阵 Φ 的 M 个行向量 $\{\varphi_j\}_{j=1}^M$ 对稀疏向量进行投影, 计算 Θ 和各个观测向量 $\{\varphi_j\}_{j=1}^M$ 之间的内积, 得到 M 个观测值 $y_j = \langle \Theta, \varphi_j \rangle$ ($j = 1, 2, \dots, M$), 则观测向量 Y 可以表示为^[12]

$$Y = \Phi \Theta = \Phi \Psi^T X \quad (10)$$

式中 Φ 是一个 $M \times N$ 的矩阵, M 表示测量矩阵的测量数, 且 $K < M \ll N$.

对于给定的 Y , 从式(10)中求出 Θ 是一个非线性规划的问题, 但由于 $M \ll N$, 所以一般情况下无法得到确定的解. 但如果在 Θ 中, $K \ll M$, 只要能确定给出 Θ 中的 K 个非零系数 θ_i 的合适位置, 就可以求

出确定的解. 因为, 观测向量 Y 是非零系数 θ_i 对应 Φ 的 K 个列向量的线性组合, 所以可以形成一个 $M \times K$ 的线性方程组求解非零项^[13]. 对此, 有限等距性质 (Restricted Isometry Property, RIP) 给出了存在确定解的充要条件^[14]. 由于观测矩阵 Y 具有 RIP 性质, 因此, 从 M 个观测值中精确恢复信号完全可以实现.

3.2 基于压缩感知理论的 ISAIL 信号采样

在常规的信号处理系统中, 完成对信号的外差处理后, 应该利用奈奎斯特采样定理对信号进行模数转换. 对外差处理后的信号 $s_c(t)$ 进行希尔伯特转换后, 可以得到解析表达式为

$$s'_c(t) = \text{rect}\left(\frac{t - 2R/c}{T_p}\right) \exp\left(j \frac{4\pi\mu}{c^2}(R^2 - R_0^2)\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R\right) \exp\left(-j \frac{4\pi\mu}{c}\Delta Rt\right) \quad (11)$$

对(11)式进行傅里叶变换, 可以得到

$$S_c(\omega) = \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R\right) \exp\left(j \frac{4\pi\mu}{c^2}(R^2 - R_0^2)\right) \cdot \exp\left(-j \frac{2\omega R}{c}\right) \text{psf}\left(\omega + \frac{4\pi\mu}{c}\Delta R\right) \quad (12)$$

式中

$$\text{psf}(\omega) = \text{FT}\left[\text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right)\right] \quad (13)$$

可以发现 $|S_c(\omega)|$ 是一个 sinc 函数, 其峰值处于 $\omega = -4\pi\mu\Delta R/c$. 峰值反应的就是目标的散射点, 并且可以得知这些散射点是离散的, 完全满足信号稀疏化的要求, 因此, $S_c(\omega)$ 恰好就是光外差探测后信号的稀疏化表示, 可以将 CS 理论运用于信号的采样中. 正交基 $\Psi = \{\psi_i\}$ 可以选择为傅里叶矩阵

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{N}} \text{FT}[I_{N \times N}] \quad (14)$$

这里 $\text{FT}[\cdot]$ 表示傅里叶变换, I 表示单位矩阵.

测量矩阵 Φ 要符合标准的高斯白噪音分布. 利用 CS 进行信号采样时, 用模拟信息采样 (Analog Information Conversion, AIC) 代替传统的模数转换 (Analog digital Conversion ADC)^[15]. 在 ISAIL 系统中, AIC 将主要由三个部分组成, 包括一个随机高斯解调器 (Gaussian pseudorandom demodulator) $p_c(t)$, 一个模拟滤波器 (Analog Filter) $h(t)$, 一个低速率采样的模数转换器.

存在稀疏域的信号 $s_c(t)$ 可以表示成一组系数与稀疏正交基的乘积

$$s_c(t) = \sum_{i=1}^N \theta_i \psi_i, \theta_i, t \in R \quad (15)$$

式中, 仅有向量 θ 中包含的是非零元素. 信号输入 AIC 后, 输出信号可以表示为

$$y[m] = \int_{-\infty}^{\infty} s_c(\tau) p_c(\tau) h(t-\tau) d\tau |_{t=m\Delta_t} \quad (16)$$

式中 Δ_t 表示 A/D 转换器的采样间隔, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$, 由式(15)和式(16)可以得到

$$y[m] = \sum_{i=1}^N \theta_i \int_{-\infty}^{\infty} \psi_i(\tau) p_c(\tau) h(t-\tau) d\tau \quad (17)$$

由此可以推出测量矩阵

$$\Phi = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_i(\tau) p_c(\tau) h(m\Delta_t - \tau) d\tau \quad (18)$$

通过测量矩阵 Φ 和测量结果 y , 信号 $s_c(t)$ 就能够得到精确的重构。

这里使用工程中最常用的正交匹配追踪 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP) 算法完成对信号的重构。假设非零稀疏 $k=1$, 则唯一的非零元素 \hat{y}_q 在 \hat{y} 中对应的位置为 q 。于是 $T \hat{y}$ 就是恢复矩阵 T 的第 q 列 T_q 与 \hat{y} 中的非零元素 \hat{y}_q 的乘积, 即 $T_q \hat{y}_q = s_q$, 且 $\|s - s_q\|_2 / \|s\|_2 < \delta$ 。而 $|\langle T_q, s \rangle| = |T_q^H s| \gg |T_r^H s| = |\langle T_r, s \rangle|, r \neq q$ 。只要计算恢复矩阵的所有列与 s 的内积, 找到绝对值最大的列, 其对应的位置即为 q 。此时, 余量 $r_n = s - \frac{\langle T_q, s \rangle}{\langle T_q, T_q \rangle} T_q$ 始终与 T_q 正交, 当 $k > 1$ 时, 只要找到余量 r_n 与 T 中所有列向量最大的那个值即可。重复步骤, 就可以找到 $s_c(t)$ 中所有峰值点的位置, 完成对信号的重构。

基于光外差探测和 CS 采样理论的 ISAIL 信号采样、重构以及成像的流程如图 4。

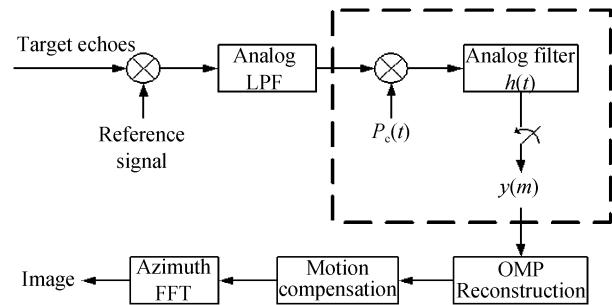


图 4 基于光外差探测和 CS 采样理论的 ISAIL 信号采样、重构以及成像的流程

Fig. 4 The flow chart of sampling, reconstruction, imaging program of ISAIL based on optical heterodyne detection and CS

4 仿真实验

本节将通过散射点模型的仿真实验分别验证 ISAIL 成像的高分辨特性和利用 CS 理论实现信号采样和成像的有效性。仿真参量设置如表 1。

目标尺寸如图 5(a), 由范围在 $[-5 \text{ m}, 5 \text{ m}]$ 内的 13 个散射点组成。图 5(b)、(c)、(d) 分别为 ISAR 成像结果、运用奈奎斯特采样得到的 ISAIL 成像结果和运用 CS 理论采样得到的 ISAIL 成像结果。从图 5(b) 中可以看出, ISAR 成像的分辨率仅能达到

表 1 仿真实验参量

Table 1 Simulation parameters

Parameter	ISAR	ISAIL
Signal frequency	3×10^{10} Hz	3×10^{13} Hz
Signal bandwidth	300 MHz	30 GHz
PRF	500 Hz	5 000 Hz
Pulse duration	$1.5 \mu\text{s}$	$1.5 \mu\text{s}$
Initialization distance	5 km	5 km
Range resolution	0.5 m	0.005 m
Azimuth resolution	0.5 m	0.005 m

0.5 m, 虽然能够分辨出大部分散射点, 但是无法有效区分中间 5 个距离较近的散射点; 而图 5(c) 反应出利用 ISAIL 能够有效分辨出所有的散射点。由于受到图像大小的影响, 中间五个散射点的区分不是很明显, 因此在右下角对其进行了放大处理, 可以看出, 5 个散射点都被有效区分。此外, 这里采用的是距离单元进行定标, 散射点之间距离单元的个数能充分反应成像的分辨率。从图 5(b) 中可以看出, 外围 8 个散射点之间间隔的距离单元不超过 5, 而图 5(c) 中, 它们间隔的距离单元达到了 200 以上, 这也证明了 ISAIL 成像分辨率的大幅提高。但是, 要满足不失真采样, 根据奈奎斯特采样定理的要求, 采样率必须至少达到 5.33 GHz, 即对每个回波需要的采样点数为 2 172, 在实际的系统设计中很难达到。基于 CS 理论采样的成像结果如图 5(d), 其效果几乎与图 5(c) 一致, 这证明了它能够很好地完成对 ISAIL 回波信号的采样并精确地重构图像, 而且, 从中间五个散射点的成像结果可以看出, 利用 CS 理论进行采样还能使散射点更好地聚焦。

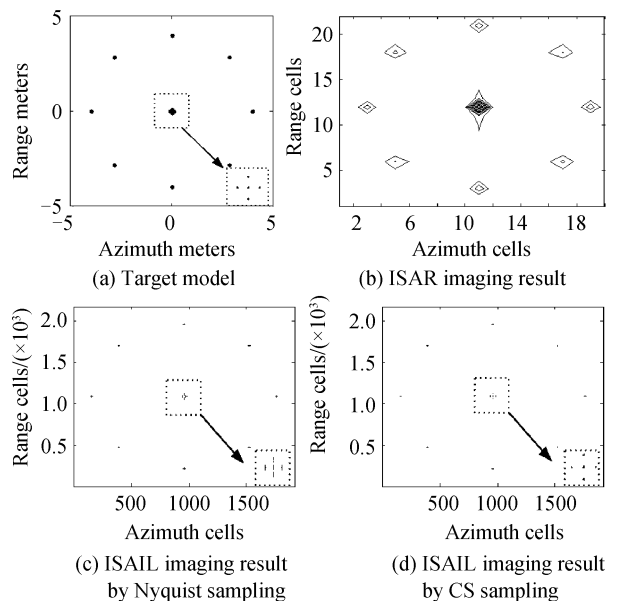


图 5 成像结果

Fig. 5 The results of imaging

图 6 为基于两种采样理论的距离像成像结果,

可以发现图 6(b)中的峰值要比图 6(a)中更尖锐,其中旁瓣已经被剔除,这也从另一个方面证明了 CS 采样理论的优势所在。

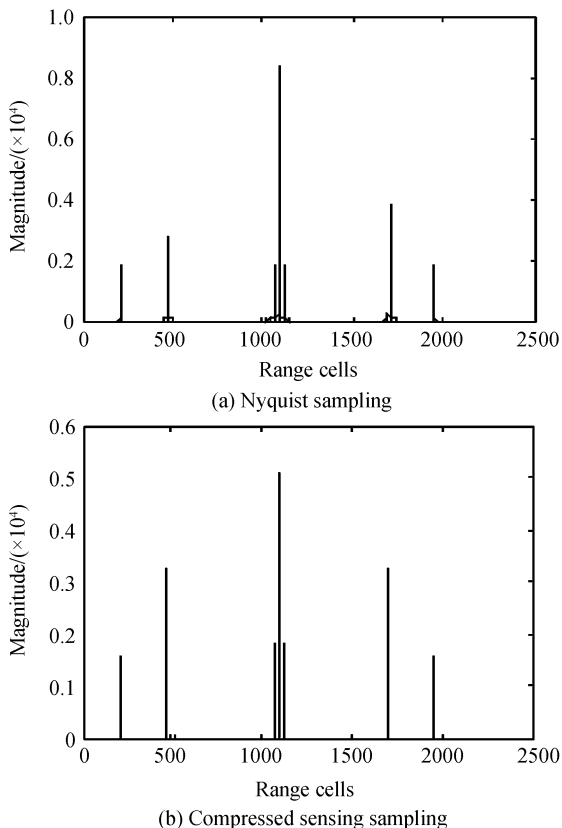


图 6 一维距离像成像结果

Fig. 6 Imaging results of one-dimension range

事实上, ISAIL 所发射的激光信号都将达到几千 GHz,此时硬件设备很难满足奈奎斯特采样定理的需求,本文的仿真实验证明了运用 CS 理论对信号进行采样是解决这一问题的有效途径. 本文所提出的采样方法通常情况下都能有效适用. 但是,当目标散射点的稀疏度很低时,利用傅里叶矩阵做稀疏基进行 CS 采样,采样的效率比利用奈奎斯特采样定理进行采样提高并不明显,这说明本文算法还有一定的局限性。

5 结论

ISAIL 能够实现对运动目标的高分辨率实时成像,因此具有重要的应用价值. 本文针对 ISAIL 回波信号带宽极大,接收和处理困难的情况,提出了光外差探测与压缩感知理论相结合的信号采样方法,有效地完成了对回波信号的稀疏化采样和目标高精度重构,对雷达的系统设计和成像处理奠定了坚实的基础。

在实际的信号采样过程中,运用光外差探测技术还可能会遇到许多困难,包括需要考虑大气衰减对信号的能量的影响,大气湍流对信号相干性的破

坏等等,这些将在以后的工作中进一步解决. 而当分辨率极高,散射点不足够稀疏时,如何寻求更有效的稀疏基,以使运用压缩感知理论进行采样时具有更高的采样效率也是下一步需要完成的工作。

参考文献

- [1] XING Meng-dao, 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): 128-132.
- [2] HAYWOOD B, KYPRIANOU R. ISARLAB-inverse synthetic aperture radar simulation and processing tool[R]. Australia: DSTO Formal Reports, 1999.
- [3] HE Jin, LUO Ying, FENG Tong-an, *et al.* Inverse synthetic imaging LIDAR: no targets can hide[C]. *Workshop for Space, Aeronautical and Navigational Electronics*, 2009, **11**: 177-181.
- [4] STEPHEN M, COLELLA B D, GREEN T J. Solid-state laser synthetic aperture radar[J]. *Appl Opt*, 1994, **33**(6): 960-964.
- [5] BUELL W F, MARECHAL N J. Synthetic-aperture imaging radar[C]. *SPIE*, 2005, **22**(5): 661-668.
- [6] ZHANG Wen-rui, ZENG Xiao-dong, MAN Xiang-kun. Study on optical heterodyne detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2): 146-147.
- [7] BAO Zheng, XING Meng-dao, WANG Tong. Technologies of radar imaging[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005.
- [8] ZHANG Hai-yang, ZHAO Chang-ming, JIANG Qi-jun, *et al.* Detection of doppler signal of moving target using 1.06 μm coherent detection lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 507-511.
- [9] JELALIAN A V. Laser radar systems[M]. Boston: Artech House Publisher, 1991.
- [10] CANDÈS E, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 2006, **52**(2): 489-509.
- [11] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 2006, **52**(4): 1289-1306.
- [12] BARANIUK R. A lecture on compressive sensing[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, **24**(4): 118-121.
- [13] SHI Guang-ming, LIU Dan-hua, GAO Da-hua, *et al.* Advances in theory and application of compressed sensing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, **37**(5): 1070-1081.
- [14] CANDÈS E. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing [J]. *Académie des Sciences*, 2006, **346**(1): 598-592.
- [15] SHI Guang-ming, LIN Jie, CHEN Xu-yang, *et al.* UWB echo signal detection with ultra-low rate sampling based on compressed sensing [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems-II: Express briefs*, 2008, **55**(4): 379-383.

Sampling Technology of ISAIL

HE Jin¹, ZHANG Qun^{1,2}, YANG Xiao-you¹, LUO Ying¹, JI Nan³

(1 *Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China*)

(2 *Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433, China*)

(3 *PLA No. 95813 Troop, Fuzhou 350001, China*)

Abstract: Inverse Synthetic Aperture Imaging LADAR can realize the instantaneous high-resolution imaging for moving target. However, the ultra-wide bandwidth of the laser signal and the weakness of the echo signal brings some difficulties in the signal sampling. A method which combines the optical heterodyne detection technique and compressed sensing theory is proposed to solve this problem. The optical heterodyne detection technique is utilized to reduce the bandwidth of echo signal, then the compressed sensing theory is developed to realize sampling and reconstruction of the signal. Simulations demonstrate that high-quality images can be reconstructed even though the sampling rate is much lower than the Nyquist rate.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Imaging LADAR; Target detection; Signal sampling; Optical heterodyne detection; Compressed sensing



HE Jin was born in 1984. Now he is pursuing the Ph. D. degree, and his research interests focus on signal processing and ATR in SAR and ISAR.



ZHANG Qun was born in 1964. He received the Ph. D. degree in electrical engineering from Xidian University, in 2001. Now he works as a professor at Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, and an associate professor at Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education), Fudan University. His main research interests focus on signal processing, and its application in SAR and ISAR.