

# 基于压缩感知算法的光栅光谱重构及其应用特性研究

蒋善超<sup>1</sup> 王 静<sup>1</sup> 隋青美<sup>1</sup> 林蓝波<sup>2</sup> 曹玉强<sup>1</sup> 王正方<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)  
(<sup>2</sup> 山东省产品质量检验研究院, 山东 济南 250102)

**摘要** 针对现有光栅光谱解调方式所需数据量较大不利于数据传输及处理的现状,应用压缩感知算法通过少量光谱数据采集实现高精度光栅光谱的重构。选取可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器解调方式(TFPDA)作为参照并以布拉格光栅(FBG)及线性啁啾布拉格光栅(LCFBG)作为研究对象,构建实验平台验证压缩感知算法光谱重构的可行性。通过TFPDA采集及压缩感知算法重构不同温度下的光纤光栅光谱并通过高斯非线性算法拟合得FBG中心波长。实验数据表明通过压缩感知采集得FBG温度敏感系数为20.3 pm/°C,与TFPDA的相对误差为0.5%。对比此两种方法所得LCFBG光谱,其3 dB带宽内的最大相对误差为1.03%,中心波长处为0.69%。上述实验结果证实压缩感知算法在光栅光谱采集重构方面具有一定的应用价值。

**关键词** 光谱学;光栅光谱;压缩感知;温度敏感系数;线性啁啾布拉格光栅

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0830002

## Research on Grating Spectrum Reconstruction Based on Compressed Sensing and Its Application Characteristics

Jiang Shanchao<sup>1</sup> Wang Jing<sup>1</sup> Sui Qingmei<sup>1</sup> Lin Lanbo<sup>2</sup> Cao Yuqiang<sup>1</sup> Wang Zhengfang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)  
(<sup>2</sup> Shandong Product Quality Inspection Research Institute, Jinan, Shandong 250102, China)

**Abstract** Based on the status that the existing grating spectrum demodulation methods require large amount of data which limited the data transformation and processing, compressed sensing is introduced to reconstruct high-precision grating spectrum through acquiring a few spectrum data. Fiber Bragg grating (FBG) and linearly chirped fiber Bragg grating (LCFBG) are selected as the research objects. Grating spectrum FBG calibration experiment platform is built with tunable Fabry-Perot (F-P) filter demodulation algorithm (TFPDA) as the reference to validate the reconstructing practicability of compressed sensing. Gaussian nonlinear curve fitting is utilized to extract the center wavelengths reconstructed by TFPDA and compressed sensing under different temperatures. TBG temperature sensitivity coefficient obtained by compressed sensing is 20.3 pm/°C. Compared with the coefficient obtained by TFPDA, the relative error is 0.5%. Comparative analysis of LCFBG spectra collected by these two methods, the maximum error in 3 dB bandwidth is 1.03% and center wavelength is 0.69%. All these experimental results confirm that compressed sensing has certain application value in grating spectrum acquisition and reconstruction.

**Key words** spectroscopy; grating spectrum; compressed sensing; temperature sensitivity coefficient; linearly chirped fiber Bragg grating

**OCIS codes** 300.6170; 070.1060; 070.2575; 070.2615

收稿日期: 2014-03-20; 收到修改稿日期: 2014-04-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61174018)、国家自然科学基金青年基金(41202206)、山东大学自主创新基金(yzcl2081)

作者简介: 蒋善超(1988—),男,博士研究生,主要从事新型光纤传感器的研制及其应用方面的研究。

E-mail: jiangshanchao88624@126.com

导师简介: 隋青美(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事检测理论与应用和光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: qmsui@sdu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

# 1 引言

光纤光栅以其本质安全、抗电磁干扰、易组网等特性而广泛应用于煤矿、隧道、桥梁及航空等<sup>[1-4]</sup>工程监测项目。然而,在外界非均匀应力作用下,光纤光栅会出现反射光谱啁啾,这限制了单靠采集光栅中心波长的变化监测现场受力情况的应用。此时,分析完整的光栅光谱更利于分析光栅栅区的受力状况。现有可获取光栅反射光谱的解调方法所需采集的数据量较大,较难满足大型偏远工程项目的监测需求。以 SM125(美国 MOI 公司)为例说明现有光栅光谱采集方式所需数据量较大的现状。SM125 是通过可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器解调方法(TFPDA)实现光栅光谱解调的解调设备。SM125 通过采集 16001 个离散数据点,拟合得光纤光栅反射光谱。采用上述光栅光谱采集方法对于高效及时的采集、传输并重构数百上千光栅光谱的实现存在着一定的挑战。

针对上述光谱采集所需数据量较大的弊端,本文将压缩感知(CS)算法应用于布拉格光栅(FBG)及线性啁啾光栅(LCFBG)光谱采集及其重构。CS<sup>[5]</sup>自提出至今因其具有远低于 Nyquist 采样定理要求的采样速率要求的优势而广泛应用于图像及信号处理方面<sup>[5-9]</sup>。利用 CS 理论重构原始信号所需的观测个数与信号的最高频率无关,而与信号的稀疏性密切相关。只要信号是可压缩的或者是稀疏的,那么就可以使用压缩感知理论,从而大大节约了采集信号的成本。文献[10]详细讲述了 CS 算法从理论到实际应用的前景及价值。Lin 等<sup>[11]</sup>通过感知算法仅需要采集 25%~33%的离散数据即可以实现固体核磁共振光谱的重构。

文中通过与 TFPDA 对比验证了 CS 算法光谱采集重构的实用性。FBG 温度标定实验数据表明,同一温度标定系统通过 CS 光栅光谱采集并分析得到的温度敏感系数为 0.0203 nm/°C,与 TFPDA 所得温度敏感系数之间的相对误差为 0.5%。对比分析 CS 算法与 TFPDA 算法所得 LCFBG<sup>[12]</sup>反射光谱,其 3 dB 带宽内的最大相对误差为 1.03%。实验数据证实,在大大降低数据采集量的基础上,CS 算法在光栅光谱采集及其重构方面具有很大的应用前景。

## 2 基于压缩感知的光谱采集原理

### 2.1 压缩感知的基本原理

压缩感知理论<sup>[13-15]</sup>的基本流程如图 1 所示,概

述为以下三个步骤:

1) 假设一个有限长度为  $N$  的一维离散信号  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ , 可以用一组标准的正交基线性组合

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\Psi} \mathbf{s}, \quad (1)$$

式中表达基  $\boldsymbol{\Psi} = \{\boldsymbol{\psi}_1, \boldsymbol{\psi}_2, \dots, \boldsymbol{\psi}_N\}$ , 列向量  $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_N)^T$  是正交基向量的加权系数。

2) 对离散信号  $\mathbf{x}$  进行  $M$  ( $M < N$ ) 次线性测量, 可用矩阵表示为

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{x} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Psi} \mathbf{s}, \quad (2)$$

式中  $\boldsymbol{\Phi}$  为  $M \times N$  的测量基,  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_M)^T$  为长度为  $M$  的信号  $\mathbf{x}$  的线性测量值。为较完整地重构离散信号  $\mathbf{x}$ , 表达基  $\boldsymbol{\Psi}$  的列向量不能用测量基  $\boldsymbol{\Phi}$  的行向量稀疏性表示。当测量基  $\boldsymbol{\Phi}$  为随机矩阵或伪随机矩阵, 如随机高斯矩阵、0/1 伯努利矩阵或随机抽样矩阵, 通常可以满足表达基矩阵非相干性的要求。

3) 求取信号  $\mathbf{s}$  最小  $l_1$  范数, 即

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min(\|\mathbf{s}\|_{l_1}), \quad \mathbf{y} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Psi} \mathbf{s} = \boldsymbol{\Phi} \hat{\mathbf{s}}, \quad (3)$$

式中  $\arg \min[f(x)]$  为使  $f(x)$  取最小值的  $x$ 。通过求解(3)式得  $\hat{\mathbf{s}}$ , 进而通过(1)式完成信号  $\mathbf{x}$  的重构。

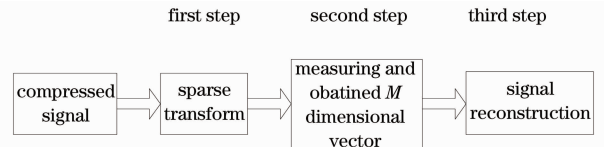


图 1 压缩感知基本流程图

Fig. 1 Fundamental flowchart of compressed sensing

### 2.2 CS 光谱采集的实现条件

与 TFPDA 获取光栅光谱不同, CS 算法要求被测信号必须是稀疏或可压缩的<sup>[16]</sup>。如果一个信号在某组基向量下的系数含有大量的零元素, 则可以称这个信号为稀疏的。以下以 SM125 采集光谱数据为例说明光栅光谱是稀疏的。SM125 通过采集 16001 个离散的光栅光谱数据点并进行高斯非线性拟合后得到光栅光谱图<sup>[17]</sup>。其中对于反演单一光栅的光谱图仅需几百个离散的数据点, 即 SM125 所采集的 16001 离散数据点中存在大量的无用数据点。通过一定的变换例如坐标轴变换后可以将 SM125 所采集的离散光谱数据中无用数据点设置为零<sup>[18]</sup>。综上所述, 以 TFPDA 所采集的光栅光谱数据作为原始数据, 其具有稀疏性。进而, 理论上讲 CS 算法可以实现光栅光谱的采集及反演。

### 3 算法验证实验及其数据分析

以 TFPDA 解调方式与 CS 算法在 FBG 温度标定实验所得光栅温度敏感系数及 LCFBG 光谱的相对误差作为评价标准,构建实验平台验证压缩感知算法对于光栅光谱采集重构的应用前景。

#### 3.1 FBG 温度标定平台

图 2 为 FBG 温度标定系统框架图,该系统主要包括光纤光栅解调仪(型号 SM125,TFPDA 解调方式,波长解调范围 1510~1590 nm,分辨率 1 pm,采样频率 1 Hz),恒温水槽,FBG 温度传感器等。

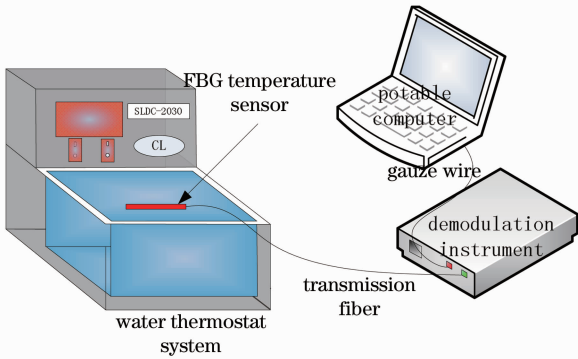


图 2 FBG 温度标定系统

Fig. 2 Temperature calibration system of FBG

选取中心波长为 1562.049 nm 的 FBG 温度传感器作为布拉格温度标定实验的标定对象,通过控制恒温水箱的温度完成 FBG 温度传感器 15 °C ~ 60 °C,步长为 5 °C 的温度标定实验。

#### 3.2 FBG 温度实验数据分析

图 3 为 TFPDA 采集 FBG 光谱随着恒温箱温度的变化趋势图。高斯非线性拟合算法拟合分析该光纤光栅光谱数据得 FBG 中心波长与温度的拟合曲线公式为

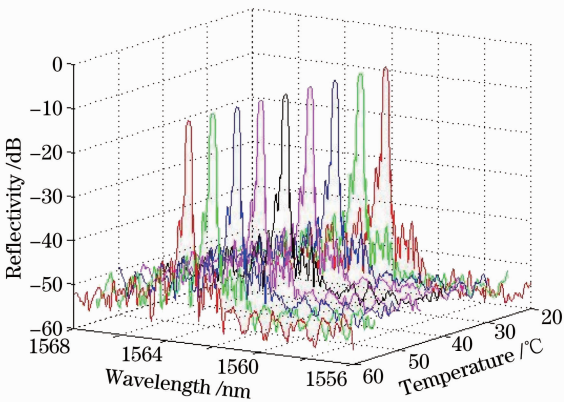


图 3 TFPDA 采集所得 FBG 光谱随着温度变化趋势图  
Fig. 3 Changing tendency of FBG spectrum following temperature sampled by TFPDA

$$\lambda_B = 0.0202T + 1561.9, \quad R^2 = 0.99. \quad (4)$$

图 4 为恒温箱温度为 60 °C 时通过高斯非线性拟合算法拟合光栅光谱峰值的示意图。

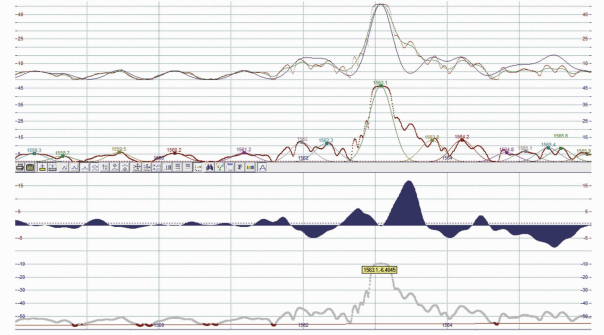


图 4 高斯非线性拟合方式拟合 FBG 光谱峰值示意图

Fig. 4 Schematic diagram of FBG spectrum peak fitted by Gaussian nonlinear curve fitting

CS 算法进行光谱重构过程中,首先对原始信号在频率域上进行稀疏,测量基  $\Phi$  选取时间域的随机抽样矩阵,最后求取信号  $s$  最小  $l_1$  范数完成对光谱数据的重构。CS 算法重构所得光谱随温度的变化趋势如图 5 所示。通过相同条件的高斯非线性拟合方法分析并拟合该重构算法所得光栅光谱中心波长与温度的对应关系为

$$\lambda_B = 0.0203T + 1562.0, \quad R^2 = 0.99. \quad (5)$$

图 6 给出了当恒温水箱为 60 °C 时,TFPDA 解调方式与 CS 算法重构所得光栅光谱对比图。观察图 6 可知,CS 算法在大大降低光谱数据采集量的基础上重构出的光栅光谱图与 TFPDA 解调方式所得光栅光谱吻合性很好。通过图 6 光栅光谱图 3 dB 带宽谱图可观测到,CS 重构所得光栅光谱与 TFPDA 采集所得光谱仅存在有限波长处所对应的反射光谱能

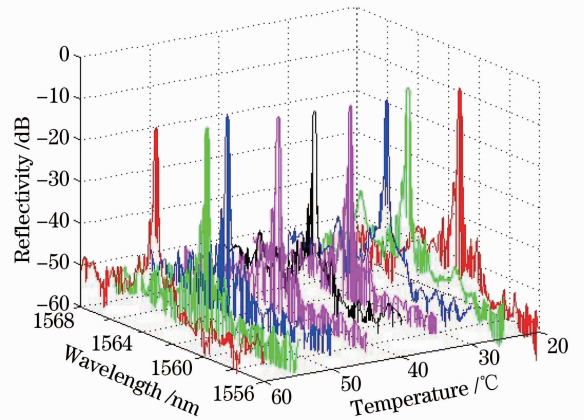


图 5 CS 重构采集所得布拉格光栅光谱随着温度变化趋势图

Fig. 5 Changing tendency of FBG spectrum following temperature reconstructed by CS

量不符。与 TFPDA 数据相比,CS 算法所得温度敏感系数为 0.0203 nm/℃,相对误差为 0.5%,此误差主要来源于 CS 重构所得光栅光谱存在一定的分峰现象,并非与 TFPDA 所采集的光谱数据完全一致,可以通过调整 CS 算法的压缩比进行相应的调整。以实验中所用数据为例,通过 CS 算法后光栅光谱数据在传输时需要传输的数据点个数为 500,这与 TFPDA 算法所需的 16001 个数据点相比,所需传输的时间仅为 1/30。综上可得,在大量降低数据采集量的前提下,CS 算法可以实现 FBG 的采集及重构且满足工程测量精度的要求。

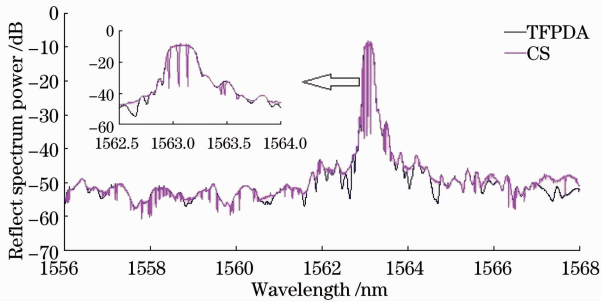


图 6 恒温水箱为 60 ℃时,TFPDA 解调方式与 CS 算法重构所得光纤光栅光谱对比图

Fig. 6 Comparison diagram of FBG spectra reconstructed by TFPDA and CS algorithms when the temperature of thermostatic water is 60 ℃

### 3.3 多 FBG 光谱对比分析

图 7 给出了 TFPDA 解调方式与 CS 算法在多光纤光栅光谱采集重构的对比图。由图 7 可得 CS 算法可以重构出的多光纤光栅光谱数据存在一定的多峰效应,计算可知,其反射光功率的相对误差小于 5%,即 CS 算法在多光纤光栅光谱重构方面具有一定的实用性。

### 3.4 LCFBG 光谱对比分析

光谱对比实验中所采用的 LCFBG 中心波长为 1550.178 nm,光栅长度为 5.5 mm,3 dB 带宽为 5.33 nm。假设 LCFBG 光谱数据为离散信号  $\lambda_c$ , SM125 所采集 LCFBG 光谱数据为  $\lambda_{SM}$ ,CS 算法重构数据为  $\lambda_{CS}$ 。该光谱对比实验中选取光谱 3 dB 带宽内及中心波长处最大的相对误差(MRE)作为实验的评价指标。相同实验条件下,CS 算法所重构的光谱数据与 TFPDA 数据之间的均方根误差及最大相对误差越小,表明 CS 算法重构 LCFBG 光谱的能力越强。MRE 计算公式可表示为

$$E_{MR} = \max |[\lambda_{SM}(i) - \lambda_{CS}(i)] / \lambda_{SM}(i)|. \quad (6)$$

图 8 给出了 TFPDA 与 CS 光谱数据的对比图。

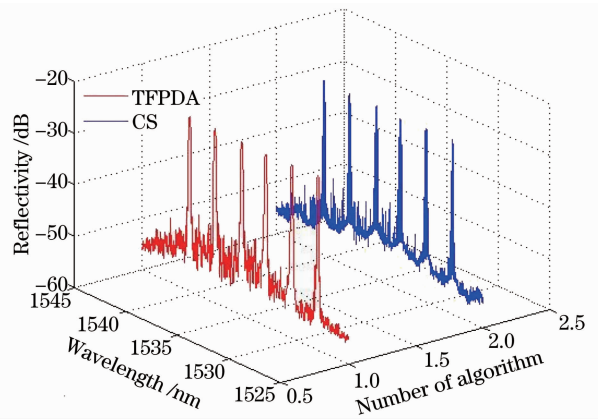


图 7 TFPDA 解调方式与 CS 算法重构所得多光纤光栅光谱对比图

Fig. 7 Comparison diagram of multi fiber Bragg grating spectra reconstructed by TFPDA and CS algorithms

由图 8 可以看出,CS 算法能够比较完美地重构出 LCFBG 光谱,其在某些波长处的光谱数据存在着一定的瑕疵。图 8 给出了 LCFBG 3 dB 带宽内不同波长所对应的光栅光谱图。TFPDA 与 CS 在 LCFBG 光谱 3dB 带宽之内的最大相对误差为 1.03%,在 LCFBG 中心波长处的相对误差为 0.69%,即 CS 算法在远低于 TFPDA 数据采集量的基础上重构所得 LCFBG 光谱 3 dB 带宽内的相对误差不超过 1.03%。上述误差对于分析应力外界作用下 LCFBG 光谱特性研究影响较小,即 CS 算法在 LCFBG 光谱采集重构方面具有一定的应用价值。

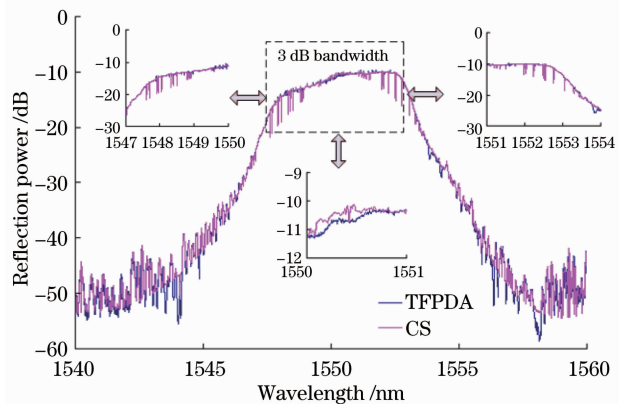


图 8 TFPDA 与 CS 算法所得 LCFBG 光谱数据的对比图  
Fig. 8 Comparison diagram of LCFBG spectrum data between TFPDA and CS

## 4 结 论

1) 应用 CS 算法解决现有光栅光谱采集所需数据量较大的弊端。理论上分析了应用 CS 算法可以

实现少量实验数据的采集及高精度光栅光谱的重构。选取 TFPDA 所得光栅光谱作为参照标准并以 FBG 及 LCFBG 作为研究对象,验证了 CS 算法于光栅光谱采集重构的应用前景。

2) 搭建 FBG 温度标定实验平台对 FBG 温度传感器进行温度标定实验并通过高斯非线性拟合算法拟合分析同一温度下的 FBG 温度传感器中心波长与温度之间的对应关系。FBG 温度标定实验数据表明 CS 算法重构光谱所得 FBG 温度传感器温度敏感系数为  $20.3 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ,相对可调谐 F-P 滤波器解调方式所得温度敏感系数的相对误差为  $0.5\%$ ,这满足工程监测对温度监测精度的要求。

3) 对比分析 TFPDA 及 CS 算法采集重构的 LCFBG 光谱,其  $3 \text{ dB}$  带宽内最大的相对误差为  $1.03\%$ 且中心波长处的相对误差为  $0.69\%$ 。综上所述在降低数据采集量重构高精度光栅光谱方面,CS 算法具有一定的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Hongyao. Coal mine disaster rescue life sign monitoring technology based on FBG and acceleration sensor [J]. Procedia Engineering, 2011, (26): 2294—2300.
- 2 Zhang Song, Wang Jian. Application in the tunnel fire monitoring of fiber Bragg grating sensor technology [J]. Laser & Infrared, 2010, 2(40): 178—180.  
张 嵩,王 剑. 光纤光栅传感技术在隧道火灾监控中的应用 [J]. 激光与红外, 2010, 2(40): 178—180.
- 3 Carlos Rodrigues, Carlos Felix, Armindo Lage, *et al.*. Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridge [J]. Engineering Structures, 2010, (32): 1993—2002.
- 4 W Ecke, M W Schmitt. Fiber Bragg gratings in industrial sensing [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2013. OM3G. 1.
- 5 D L Donoho. Compressed sensing [J]. IEEE Trans Inf Theory, 2006, 4(52): 1289—1306.
- 6 Liu Xiaoyong, Cao Yiping, Lu Pei, *et al.*. Optical image encryption technique based on compressed sensing and Arnold transformation [J]. Optik, 2013, (124): 6590—6593.
- 7 Avishy Carmi, Pini Gurfil. Sensor selection via compressed sensing [J]. Automatica, 2013, 11(49): 3304—3314.
- 8 Yuan Xiaoling, Feng Yan, Jia Yingbiao. Reconstruction of hyperspectral image based on distributed compressed sensing [J].

- Electronic Design Engineering, 2013, 14(21): 181—184.
- 袁晓玲,冯 燕,贾应彪. 一种光谱图像分布式的压缩感知重构方法[J]. 电子设计工程, 2013, 14(21): 181—184.
- 9 Zhang Shunsheng, Chang Junsheng, Li Jing. Compressed sensing for multiple azimuth beams SAR imaging [J]. Chinese J Radio Science, 2012, 5(27): 979—984.  
张顺生,常俊生,李 晶. 方位多波束合成孔径雷达压缩感知成像研究[J]. 电波科学学报, 2012, 5(27): 979—984.
  - 10 Macro F Duarte, Yonina C Eldar. Structured compressed sensing: from theory to applications [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 9(59): 4053—4085.
  - 11 Eugene C Lin, Stanley J Opella. Covariance spectroscopy in high-resolution multi-dimensional solid-state NMR [J]. Journal of Magnetic Resonance, 2013, 239: 40—48.
  - 12 Lu Shaowei, Zhang Haijun, Li Chaochua, *et al.*. Damage monitoring of the double-notched carbon fiber reinforced polymers with surface bonded chirped fiber Bragg grating sensor [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1105004.  
卢少微,张海军,李朝华,等. 外贴啁啾光栅监测带双缺口符合材料静态拉伸损伤[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1105004.
  - 13 Daito Akimura, Yoshihiro Kawahara, Tohru Asami. Compressed sensing method for human activity sensing using mobile phone accelerometers [C]. 2012 Ninth International Conference on Networked Sensing Systems (INSS), 2012. 1—4.
  - 14 Zhang Shuo, Wang Jie, Wang Jinhui, *et al.*. Simple calculation method for three-dimensional imaging based on compressed sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0111004.  
张 硕,王 杰,王金辉,等. 基于压缩感知的三维物体成像的简单计算方法[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0111004.
  - 15 Li Dong, Cang Ji, Xia Xinxing, *et al.*. Investigation on back-modulation long distance three-dimensional imaging based on compressed sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0111002.  
李 东,仓 吉,夏新星,等. 基于压缩感知的后调制远距离三维成像研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0111002.
  - 16 L W Hong, W Shu. Signal processing, an efficient and robust approach for wideband compressive spectrum sensing [C]. 2012 IEEE Conference on Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC), 2012. 499—502.
  - 17 Liu Quan, Cai Linjun, Li Zhengying, *et al.*. Research on peak-detection algorithm for high-speed and high-precision FBG demodulation [J]. Journal of Optoelectronics·Lasers, 2012, 23(7): 1233—1239.  
刘 泉,蔡林均,李正颖,等. 高速度高精度光纤布拉格光栅解调的寻峰算法研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(7): 1233—1239.
  - 18 Karsten Fyhn, Hamid Dadhahi, Macro F Duarte. Spectral compressive sensing with polar interpolation [C]. 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013. 6225—6229.

栏目编辑: 史 敏