



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

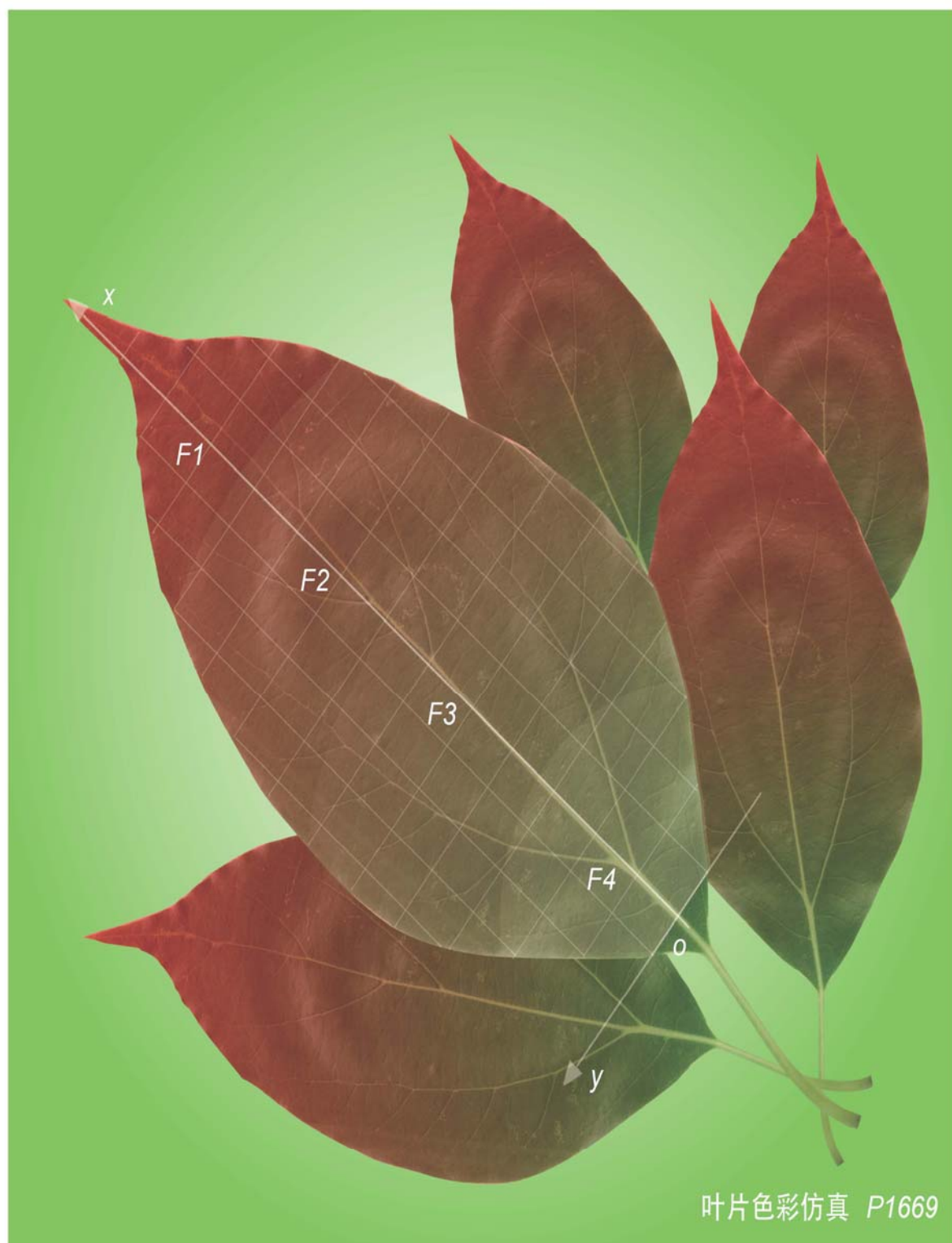
2014

11

VOL.19

ISSN1006-8961

CN11-3758/TB



叶片色彩仿真 P1669



第19卷第11期（总第223期）

2014年11月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

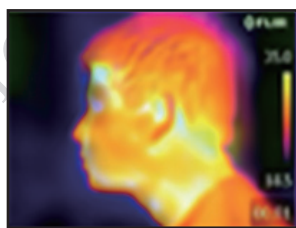
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

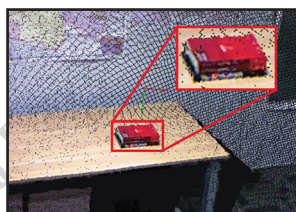
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

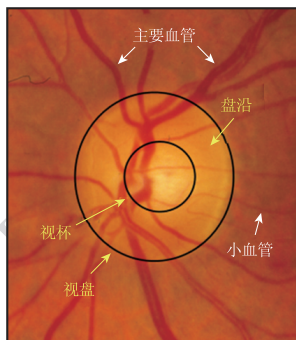
国内定价 50.00元



红外热像视频的细微变化放大(第1577页)



Kinect传感器的彩色和深度相机标定(第1584页)



多相主动轮廓模型的眼底图像杯盘分割(第1604页)

综述

多媒体技术研究: 2013——面向智能视频监控的视觉感知与处理

黄铁军, 郑锦, 李波, 傅慧源, 马华东, 薛向阳, 姜育刚, 于俊清 1539

图像处理和编码

基于高阶奇异值分解和均方差迭代的图像去噪

胡文锐, 谢源, 张文生 1563

小波域中双稀疏的单幅图像超分辨

杨波, 吴纪桃, 谢晓振 1570

红外热像视频的细微变化放大

付传卿, 谷小婧, 顾幸生 1577

图像理解和计算机视觉

Kinect传感器的彩色和深度相机标定

郭连朋, 陈向宁, 刘彬 1584

空间统一调制模型的轮廓检测

肖洁, 蔡超, 郭照立 1591

图像分析和识别

结合相似性拟合与空间约束的图像分割

张峥嵘, 詹天明, 韦志辉 1596

多相主动轮廓模型的眼底图像杯盘分割

郑嫻, 范慧杰, 唐延东, 王琰 1604

精确局部特征描述的表情识别

胡敏, 江河, 王晓华, 陈红波, 李堃, 任福继 1613

Gabor小波和改进LBP的零件表面粗糙度识别

胡海锋, 陈苏婷 1623

可扩展的花卉种类识别

苗金泉, 曹卫群 1630

医学图像处理

基于提升小波变换的医学图像融合

李俊峰, 姜晓丽, 戴文战 1639

遥感图像处理

基于压缩感知的SAR图像鲁棒编码传输

侯兴松, 田文文, 龚晨 1649

第11届全国智能CAD与数字娱乐学术会议专栏

大规模DVE场景对等传输机制研究新进展

王明飞, 贾金原, 张晨曦 1657

自然环境下的植物叶片智能色彩推理仿真

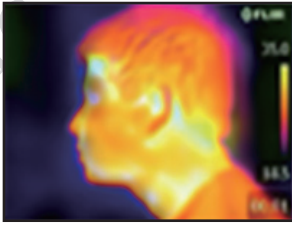
宋建文, 邱锦明 1669

3个控制顶点的类三次Bézier螺线

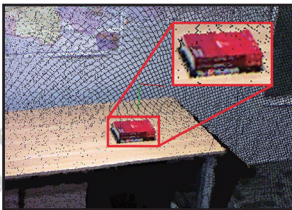
高晖, 寿华好, 缪永伟, 王丽萍 1677

CONTENTS

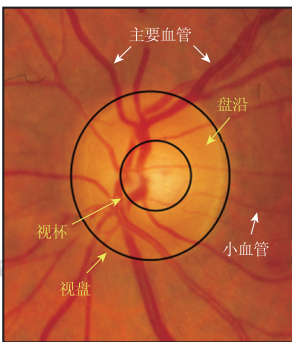
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Magnifying imperceptible variations in infrared thermal videos(P1577)



Calibration of Kinect sensor with depth and color camera (P1584)



Automatic segmentation of optic disc and cup using multiphase active contour model in fundus images(P1604)

Review

Visual perception and processing for intelligent video surveillance:a review

Huang Tiejun, Zheng Jin, Li Bo, Fu Huiyuan, Ma Huadong, Xue Xiangyang, Jiang Yugang, Yu Junqing

1539

Image Processing and Coding

Image denoising based on high order singular value decomposition and mean square error iteration

Hu Wenrui, Xie Yuan, Zhang Wensheng

1563

Single image super-resolution in wavelet domain with double sparse

Yang Bo, Wu Jitao, Xie Xiaozhen

1570

Magnifying imperceptible variations in infrared thermal videos

Fu Chuanqing, Gu Xiaojing, Gu Xingsheng

1577

Image Understanding and Computer Vision

Calibration of Kinect sensor with depth and color camera

Guo Lianpeng, Chen Xiangning, Liu Bin

1584

Contour detection based on spatially unified modulation model

Xiao Jie, Cai Chao, Guo Zhaoli

1591

Image Analysis and Recognition

Image segmentation by integrating similarity fitting and spatial constraint

Zhang Zhengrong, Zhan Tianming, Wei Zhihui

1596

Automatic segmentation of optic disc and cup using multiphase active contour model in fundus images

Zheng Shan, Fan Huijie, Tang Yandong, Wang Yan

1604

Precise local feature description for facial expression recognition

Hu Min, Jiang He, Wang Xiaohua, Chen Hongbo, Li Kun, Ren Fuji

1613

Recognition of work piece surface roughness based on Gabor wavelet and improved LBP

Hu Haifeng, Chen Suting

1623

The scalable flowers category recognition

Miao Jinqun, Cao Weiqun

1630

Medical Image Processing

Medical image fusion based on lifting wavelet transform

Li Junfeng, Jiang Xiaoli, Dai Wenzhan

1639

Remote Sensing Image Processing

Robust coding transmission for SAR image based on compressive sensing

Hou Xingsong, Tian Wenwen, Gong Chen

1649

Column of CIDE' 2014

Survey on transmission mechanism of large scale DVE scene based on P2P overlay network

Wang Mingfei, Jia Jinyuan, Zhang Chenxi

1657

Intelligent color reasoning simulation of plant leaf based on the natural environment

Song Jianwen, Qiu Jinming

1669

The quasi-cubic Bézier spirals with three control points

Gao Hui, Shou Huahao, Miao Yongwei, Wang Liping

1677

中图法分类号: TP191.81 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)11-1649-08

论文引用格式: Hou X S, Tian W W, Gong C. Robust coding transmission for SAR image based on compressive sensing[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(11): 1649-1656. [侯兴松, 田文文, 龚晨. 基于压缩感知的 SAR 图像鲁棒编码传输[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(11): 1649-1656.] [DOI:10. 11834/jig. 20141113]

基于压缩感知的 SAR 图像鲁棒编码传输

侯兴松¹, 田文文¹, 龚晨²

1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230022

摘要: **目的** 尽管传统的联合信源信道编码方案可以获得高效的压缩性能,但当信道恶化超过信道编码的纠错能力时会导致解码端重构性能的急剧下降;为此利用压缩感知的民主性提出一种鲁棒的 SAR 图像编码传输方案,且采用了一系列方法提高该方案的率失真性能。**方法** 考虑到 SAR 图像丰富的边缘信息,采用具有更强方向表示能力的方向提升小波变换(DLWT)对 SAR 图像进行稀疏表示,且为消除压缩感知中恢复非稀疏信号时存在的混叠效应,采用了稀疏滤波方法保证大系数的精确恢复,在解码端采用了高效的 Bayesian 重建算法获得图像的高性能重建。**结果** 在同等码率下,与传统的联合信源信道编码方案 CCSDS-RS 相比,本文方案可以实现更加鲁棒的编码传输,当丢包率达到 0.05 时,本文方案 DSFB-CS 获得的重建性能明显要高于 CCSDS-RS;与基于 Bayesian 重建算法 TSW-CS 的传统方案相比,本文方案可提高峰值信噪比(PSNR)3.9 dB。**结论** 本文方案 DSFB-CS 实现了 SAR 图像的鲁棒传输,随着丢包率的上升,DSFB-CS 获得的重建性能缓慢下降,保证了面对不稳定信道时,解码端可以获得相对稳定的重构图像。

关键词: 压缩感知;合成孔径雷达;鲁棒传输;方向提升小波变换(DLWT);稀疏滤波

Robust coding transmission for SAR image based on compressive sensing

Hou Xingsong¹, Tian Wenwen¹, Gong Chen²

1. School of Electronics and Information Engineering, University of Xi'an Jiaotong, Xi'an 710049, China;
 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China

Abstract: **Objective** Consider a wireless communication system with a radio station in an airborne synthetic aperture radar (SAR) system operating in a time-varying channel. Unpredictable packet loss occurs during transmission. Therefore, building a robust and efficient SAR image coding transmission scheme is necessary. Although traditional joint source-channel coding (JSCC) can achieve excellent and efficient transmission performance under fixed channel conditions, the predetermined redundancy of channel coding was adopted to achieve robustness. However, when the deterioration of channel condition exceeds the correction capacity of the channel codec in a time-varying channel, reconstruction performance declines at the decoder. In this work, we propose a robust SAR image coding transmission scheme over a time-varying channel using the democracy of compressive sensing (CS). A range of methods to improve the rate-distortion performance of the proposed scheme are also adopted. The reconstruction performance depends only on the number of measurements received and not on the actual measurements received; that is, every measurement is independent and nearly equal. **Method** Given the rich edge information of an SAR image, directional lifting wavelet transform (DLWT) is adopted as sparse representation to improve the representation of the edges of the SAR image. Although DLWT can attain good sparse representation for SAR

收稿日期: 2014-06-13; 修回日期: 2014-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(61373113); 中央高校基本科研业务费专项资金(xjj2012023)

第一作者简介: 侯兴松(1972—), 男, 副教授、博士生导师, 2005 年于西安交通大学获信息与通信工程专业博士学位, 主要研究方向为视频/图像编码、小波分析、稀疏表示、压缩感知以及雷达信号处理。E-mail: houxs@mail.xjtu.edu.cn

images, this method cannot ensure strict sparse representation in CS; that is, representation coefficients still contain small coefficients that would interfere in the recovery of large coefficients. Thus, sparse filtering (setting small coefficients to zero) is also adopted in this study to eliminate the interference of small coefficients. Compared with the deterministic model-based CS reconstruction algorithms, the Bayesian model-based CS reconstruction algorithm is more reliable in a random signal scenario. Thus, we adopt an efficient Bayesian reconstruction algorithm called tree structured wavelet that exploits the structure dependencies of wavelet coefficients to attain high-performance image reconstruction. **Result** The proposed scheme achieves more robust SAR image coding transmission compared with the traditional JSCC scheme, CCSDS-RS, at the same rate. When the packet loss rate (PLR) reaches 0.05, the reconstruction performance of DSFB-CS is higher than that of CCSDS-RS. Therefore, CCSDS-RS is highly sensitive against packet loss and can easily lead to the cliff effect with channel deterioration. By contrast, the R-D performance in DSFB-CS decreases gracefully with channel deterioration. As the proposed scheme is based on reconstruction algorithm TSW, DSFB-CS is compared with the traditional scheme based on TSW without sparse filtering that uses DWT as sparse representation. DSFB-CS can improve the peak signal-to-noise ratio (PSNR) up to 3.9 dB. **Conclusion** The proposed DSFB-CS achieves more robust transmission for SAR images compared with the traditional JSCC scheme, CCSDS-RS. The reconstruction performance of the proposed scheme declines slowly with the channel deterioration. Even under a time-varying channel, the robustness of DSFB-CS can still ensure that the decoder side can attain a relatively stable reconstructed image. Compared with the traditional CS scheme based on TSW, the proposed scheme exhibits significantly improved PSNR. The percentage of the reserved large coefficients in all coefficients and the bits of every measurement are both key parameters.

Key words: compressive sensing (CS); synthetic aperture radar (SAR); discrete lifting wavelet transform (DLWT); sparse filtering

0 引言

高分辨合成孔径雷达(SAR)以其大场景、全天候的优点在灾害评估、环境监测、资源勘察等领域具有广泛的用途^[1]。然而,SAR(尤其机载 SAR)图像编码传输往往面临着带宽窄以及信道变化剧烈等问题,特别在采用电台传输时,无线信道的特性随着载机的运动而不断变化。因此,如何构建高效且适合信道变化的 SAR 图像编码传输方案具有重要的应用价值。

目前为止,图像的鲁棒编码传输已取得了一些进展^[2-6]。文献[2]对 SAR 图像目标区域采用 COTCQ 与信道编码结合的方式,减小目标区域的误码影响来提高 SAR 图像的传输质量;文献[3]根据小波系数的统计特性,着重关注 SAR 图像的细节部分,设计了基于小波变换的编码器,并将其应用于航海中海上浮冰的 SAR 图像传输;文献[4]在信源编码前采用 BCH 码提高图像传输的鲁棒性;文献[5]在信源编码与信道编码之间采用了抗误码熵编码(EREC)获得额外的抗误码能力。尽管这些方法取得了一定的效果,但并没有考虑到传输信道的多变性。传统的联合信源信道编码方案可以获得高效的传输性能,并可以通过增加信道编码的冗余度提高方案的鲁棒性。

但当信道条件不能预知时,增加过多的信道冗余会降低方案的编码效率;相反,若选取过低的信道冗余,当丢包率超过信道编码纠错能力时,解码端得到的重建性能会急剧下降,甚至产生峭壁效应。

为解决上述问题,利用压缩感知的鲁棒性构建了一种鲁棒的能适应信道变化的 SAR 图像编码传输方案 DSFB-CS。在该方案中,利用压缩感知中的随机测量所具有的鲁棒性来实现其鲁棒传输。通过随机矩阵对 SAR 图像的稀疏表示进行随机测量,此时,获得的测量值之间是相互独立的,且几乎是同等重要的,经过信道丢包后,解码端利用获得的部分测量值通过压缩感知的重建算法重建原始信号。实验结果表明,在信道变化的情况下,与传统的联合信源信道 SAR 图像编码传输方案 CCSDS-RS 相比,本文方案对随机丢包容错性能强,图像的重构质量随着信道状况的下降而线性缓慢下降,而 CCSDS-RS 对随机丢包较敏感,很容易导致重构图像质量发生突变。这是由于基于测量值之间的独立性及同等性,解码端获得的率失真性能仅仅和测量值的个数有关,与接收到哪个测量值无关^[6],在此前提下,即使不能预先知道传输的信道条件,传输中产生的丢包错误也不会传播,解码端可以获得稳定的重建性能^[7-8]。

然而,相比较传统的联合信源信道编码,通过压缩感知实现 SAR 图像编码传输鲁棒性的同时,率失

真性能较低, 仅仅能与 JPEG 相当^[9]。本文方案在实现 SAR 图像鲁棒编码传输的前提下, 采取了一系列工作提高方案 DSFB-CS 的编码效率: 考虑到 SAR 图像复杂的边缘信息, 本文利用 DLWT 获得更好的稀疏表示, 并且利用稀疏滤波的方法消除大量小系数对大系数恢复的干扰; 同时, 解码端充分利用小波系数尺度间相关性, 采用了高效的 Bayesian 重构算法获得图像的高性能重建。最后将本文方案 DSFB-CS 与传统的联合信源信道编码方案 CCSDS-RS 进行对比, 验证了本文方案的可行性。

1 压缩感知基本理论

压缩感知理论是一种新的在采样的同时实现压缩目的的理论框架^[10]。设实数集 $\mathbf{R}^N$ 空间的任何离散信号 $\mathbf{f}$ 都可以用 $N \times 1$ 维的基向量 Ψ 的线性组合表示: $\mathbf{f} = \Psi\mathbf{x}$, 若向量 $\mathbf{x}$ 中非零元素个数为 k , 则认为信号 $\mathbf{f}$ 是 k -稀疏信号。如果用一个与变换基 Ψ 不相关的观测基 $\Phi: M \times N (M \ll N)$ 对系数向量 $\mathbf{x}$ 进行线性变换, 得到观测集 $\mathbf{y} = \Phi\Psi^T\mathbf{f} = \Phi\mathbf{x}$, 则可以利用

1-范数意义下的优化问题求解 $\mathbf{x}$ 的精确或近似逼近 $\tilde{\mathbf{x}}$, 即

$$\tilde{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{x}\|_1 \quad \text{s. t.} \quad \Phi\mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (1)$$

目前为止, 重构算法分为确定型模型方法和 Bayesian 统计概率模型方法。与确定型模型方法比较, 基于 Bayesian 的压缩感知算法 TSW 利用离散小波变换 (DWT) 系数的尺度间衰减性, 通过贝叶斯统计概率推理实现了图像的压缩感知重构, 取得了比确定型模型方法更好的重建图像质量。

2 基于 CS 的 SAR 图像鲁棒编码传输

基于压缩感知的 SAR 图像鲁棒编码传输方案 DSFB-CS 框图如图 1 所示。首先将测试图像分成大小相同的图像块, 并对每个图像块依次进行 DLWT、稀疏滤波, 然后利用高斯随机矩阵对小波系数进行测量、量化、打包。在仿真传输信道时, 添加了随机丢包。接收到数据包后, 进行相应的逆操作: 组包、反量化、重构、小波逆变换等。最后, 将恢复的所有小图像合成与原始图像大小相同的图像。

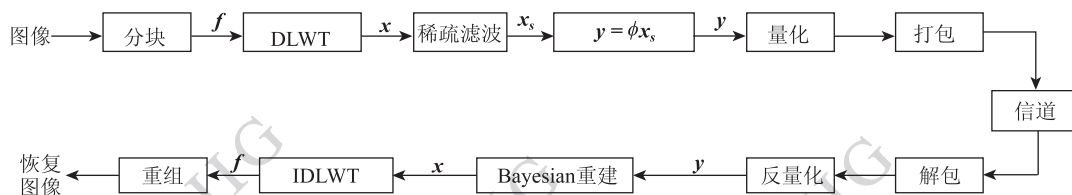


图1 本文方案 DSFB-CS 框图

Fig. 1 Block diagram of the proposed DSFB-CS

采用 B9/7 滤波器进行了 3 级小波变换。测试图像为 4 幅从美国 Sandia 国家实验室 <http://www.sandia.gov/radar/imagery.html> 下载而来的 256×256 像素 SAR 图像, 如图 2 所示。

2.1 基于 DLWT 的 SAR 图像稀疏表示

传统的 DWT 小波变换是对图像在水平方向和竖直方向相继做一维小波变换的处理, 将图像的基本信息集中到低频, 使得小波系数具有一定的稀疏性, 然而它只能反映图像中的水平和竖直方向信息, 由于缺乏方向性, 稀疏效果不理想。与 DWT 相比, DLWT 具有更好的方向信息表示能力, 可压缩性更强^[11]。

实验用 K 项非线性逼近性能来比较 DWT 和 DLWT 的可压缩性能。将测试图像分成 64×64 的图像块, 图 3 给出了 Img1 与 Img4 按照幅度大小保留相

同 K 个 DLWT 和 DWT 系数来重构图像块所获得的峰值信噪比 (PSNR) 平均值。 K 相同时, 重构图像的 PSNR 越高说明非线性逼近性能和可压缩性能越好。

由图 3 可以看到, DLWT 获得的平均峰值信噪比均高于 DWT 获得的平均峰值信噪比。比如, 在 $K=800$ 时, DLWT 的非线性逼近性能比 DWT 高 1.43 dB。

2.2 稀疏滤波

SAR 图像经过 DLWT 后得到的小波系数仍含有大量的小系数, 严格意义上讲, 此时的小波系数仍然是非严格稀疏的。将 Img1 分成 64×64 的图像块, 图 4 画出了对所有图像块进行 3 级 DLWT 后小波系数幅度的平均分布直方图。由图中可以看出, 小系数在整个系数分布直方图中占有很大比例, 例如分布在范围 $2^{-0.5} \sim 2^{+0.5}$ 之间的小波系数占有比例为 10% 左右。

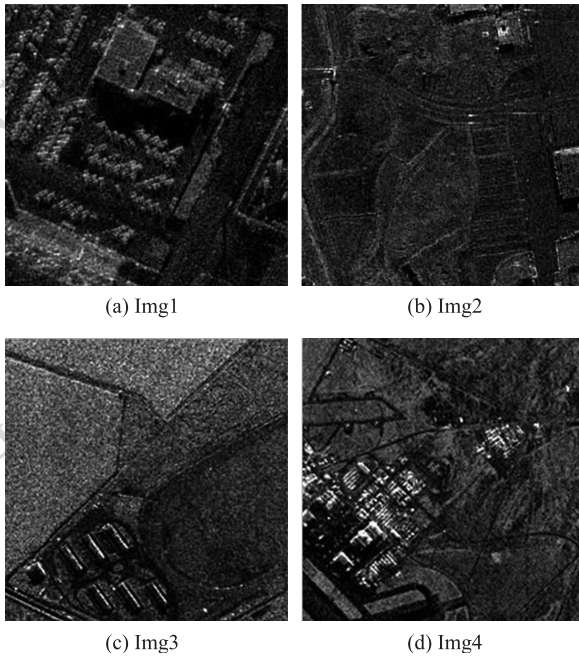


图2 256 × 256 像素测试图像

Fig. 2 256 × 256 pixel test images

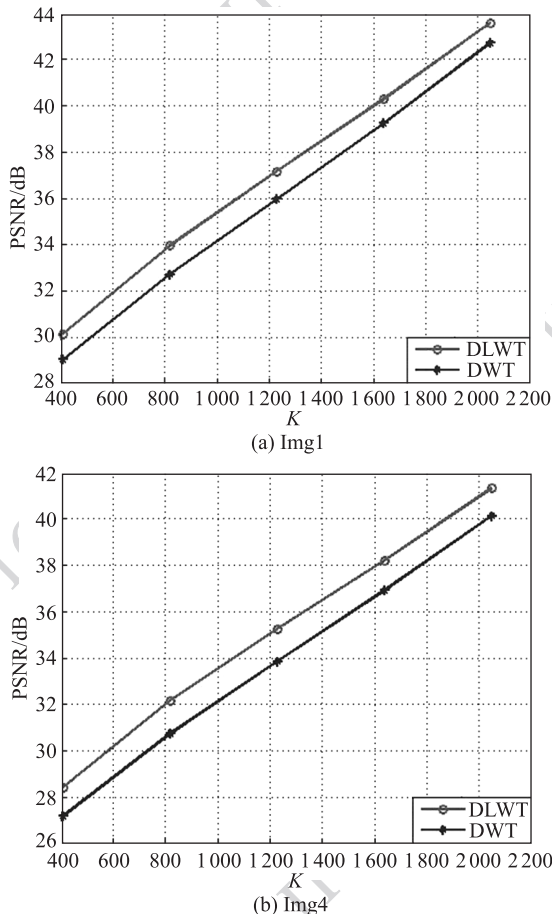
图3 DLWT 和 DWT 的 K 项非线性逼近性能比较

Fig. 3 Comparison of compressibility between DLWT and DWT

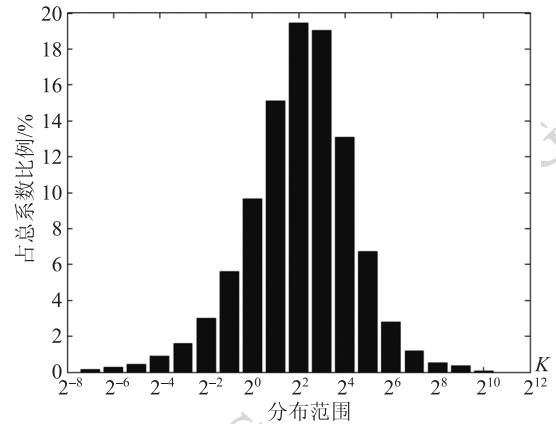


图4 DLWT 小波系数平均分布直方图

Fig. 4 The average histogram of amplitude of DLWT coefficients distribution

此时,大量小系数的影响是不容忽视的,一方面小系数不容易恢复,另一方面容易对大系数的恢复造成干扰,从而使得整体恢复性能下降。若对所有小波系数进行测量,即

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} = \Phi \mathbf{x}_s + \Phi \mathbf{x}_e = \Phi \mathbf{x}_s + \mathbf{n}_e \quad (2)$$

式中, $\mathbf{x}_s$ 表示仅保留向量 $\mathbf{x}$ 中排序后前 s 个大系数,其余系数置 0, $\mathbf{x}_e$ 表示将向量 $\mathbf{x}$ 中排序后前 s 个大系数置 0,保留其余系数。此时,利用高斯随机矩阵采样后,所有小波系数混叠在测量值中。此时不仅小系数无法精确恢复,因大量小系数存在导致的非稀疏性会影响大系数的精确恢复,因此,通过稀疏滤波(将小系数置为零)可以得到满足稀疏条件的向量 $\mathbf{x}_s$,通过高效的重建算法可以消除小系数对大系数的干扰,获得大系数的精确重构。即令 $\tilde{\mathbf{y}} = \Phi \mathbf{x}_s$,利用压缩感知重建算法可以获得重构系数 $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_s$ 。

为定量说明稀疏滤波对重建质量的影响,定义重建信噪比

$$\text{RSNR} = \frac{\|\mathbf{x}\|_2^2}{\|\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{x}\|_2^2} \quad (3)$$

在本实验中,将测试图像 Img1 分成 64×64 的图像块,并对所有图像块进行 3 级 DLWT 变换,图 5 给出了按照幅度大小排序后保留不同比例的大系数来重构图像块所获得的 RSNR 平均值。

由图 5 可以看到,通过将小系数置 0 可以明显提高 RSNR,降低小波系数的重构误差,图 5 中保留系数比例等于 1 时所对应的 RSNR 即不执行稀疏滤波情况下,对所有的小波系数进行测量时所获得的 RSNR 平均值,可见利用稀疏滤波获得的重建误差明显要低于不使用稀疏滤波获得的重建误差。

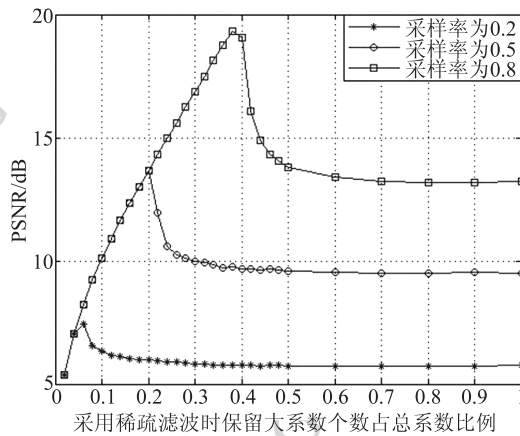


图 5 稀疏滤波对系数重建的影响

Fig. 5 Impact of sparse-filtering on wavelets reconstruction

2.3 基于 DLWT 小波系数先验模型的 Bayesian 压缩感知重构算法

本文方案采用了充分利用小波系数尺度间相关性的 Bayesian 高效重建算法 TSW-CS^[12], 其中观测矢量服从高斯分布

$$y|x, a_n \sim N(\Phi x, a_n^{-1}I) \quad (4)$$

$$a_n \sim \Gamma(a_0, b_0) \quad (5)$$

式中, x 代表小波系数, y 代表测量值, a_n^{-1} 表示噪声方差, I 为全 1 向量, $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函数; a_0, b_0 为超参数。

该算法在充分考虑小波系数尺度间相关性的基础上利用了合理的先验概率模型^[12]。假定小波系数服从 spike-and-slab 分布, 它的概率模型为

$$x_i \sim (1 - \pi_i)\delta(0) +$$

$$\pi_i N(0, \alpha_s^{-1}), i = 1, 2, \dots, P \quad (6)$$

$$\alpha_s \sim \Gamma(c_0, d_0), s = 1, 2, \dots, L \quad (7)$$

式中, x_i 表示小波系数的第 i 个系数; π_i 是小波系数 x_i 为显著系数的概率; $\delta(0)$ 是一个在 0 点的冲击函数, 表示非显著系数; $N(0, \alpha_s^{-1})$ 是一个均值为 0, 方差为 α_s^{-1} 的高斯分布, 表示显著系数; P 为小波系数的个数; L 是小波分解级数; c_0, d_0 均为超参数。

为充分利用小波系数树结构特性, 小波系数为显著系数的概率 π_i 模型为

$$\pi_i \sim \begin{cases} \pi_r & s = 1 \\ \pi_s^0 & 2 \leq s \leq L \text{ 且 } x_{pa(s,i)} = 0 \\ \pi_s^1 & 2 \leq s \leq L \text{ 且 } x_{pa(s,i)} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\pi_r \sim \beta(e_0^r, f_0^r), \quad (9)$$

$$\pi_s^0 \sim \beta(e_0^s, f_0^s), \quad s = 2, \dots, L, \quad (10)$$

$$\pi_s^1 \sim \beta(e_0^s, f_0^s), \quad s = 2, \dots, L, \quad (11)$$

式中, π_r 是当小波系数属于尺度 $s = 1$ 时, 小波系数显著的概率, π_s^0 是当小波系数属于尺度 s , 其父亲系数为非显著系数时, 该小波系数显著的概率, π_s^1 是当小波系数属于尺度 s , 其父亲系数为显著系数时, 该小波系数显著的概率; $\beta(\cdot)$ 表示 beta 函数; $e_0^r, f_0^r, e_0^s, f_0^s$ 为超参数。

此外, 该算法利用基于 MCMC 的 Bayesian 推理获得重构小波系数^[12]。

3 实验结果及分析

3.1 本文方案与联合信源信道编码方案比较

CCSDS-IDC (国际空间数据系统咨询委员会-图像数据压缩) 是 NASA 制定的空间图像数据压缩标准, 适用于合成孔径雷达 (SAR) 幅度图像及各类遥感图像的压缩, 具有高效压缩和低复杂度的特性^[13]。RS (reed-solomon) 码是一类纠错能力很强的特殊的非二进制 BCH 码。该编码方式对于信道中出现的随机误码与突发误码具有很强的纠错能力。本部分实验将本文方案 DSFB-CS 与联合 CCSDS-IDC 与 RS 信源信道编码方案 (CCSDS-RS) 进行对比。

测试图像如图 2 所示, 采用峰值信噪比 (PSNR) 作为图像质量评价标准。仿真实验中, 采用码率为 4.0 bit/像素。考虑到传输条件为可变信道, 方案 CCSDS-RS 采取了不同的信道编码冗余。方案 DSFB-CS 中, 量化位数选取为 5 位, 选用包大小为 129 bit, 其中包括头信息 1 比特 (图像块索引以及包索引), 每个图像块码流包含 16 个包, 实际码率为 4.03 bit/像素。对比方案 CCSDS-RS 采用 RS (255, k), k 为信息位符号长度。该方案信道冗余分别选取为 25%, 50%, 100%。仿真随机丢包时, 信道添加随机丢包。设置丢包率 (PLR) 变化范围为 0 ~ 0.7。检测当前传输包是否丢失时, 首先随机产生 [0, 1] 的均匀随机数, 如果该随机数小于丢包率 (PLR), 则表示当前包丢失。图 6 中列出来不同丢包率下的实验结果。

由图 6 可以看出, DSFB-CS 实现了更加鲁棒的 SAR 图像编码传输, 该方案获得的重建 PSNR 随着丢包率的上升缓慢下降, 且当丢包率超过 0.05 后, 获得的重建性能要明显高于 CCSDS-RS。即使增加 CCSDS-RS 的信道冗余, 由于丢包达到 0.05 时, 信道误码超过 RS 信道编码的纠错能力, 方案 CCSDS-

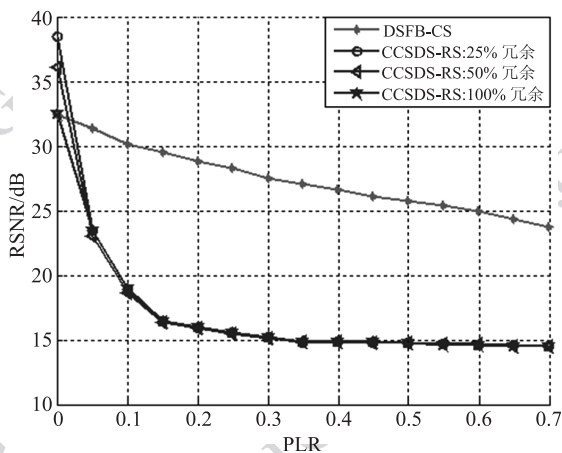


图6 不同丢包率下峰值信噪比平均值曲线图

Fig. 6 Average PSNR comparison of DSFB-CS and CCSDS-RS

RS 获得的重建性能仍会随着丢包急剧下降,甚至产生峭壁效应。

为进一步比较方案 DSFB-CS 与 CCSDS-RS 获得的重建图像,图7分别给出了丢包率为0.1时,采取 DSFB-CS 与 CCSDS-RS 获得的重建 Img1。由图7可以看出,当丢包率到达0.1时,DSFB-CS 仍然可以恢复原始图像。而采用 CCSDS-RS 时,丢包率已超过 RS 码可纠错的范围,导致测试图像部分区域不能恢复,且部分恢复区域也产生解码错误。

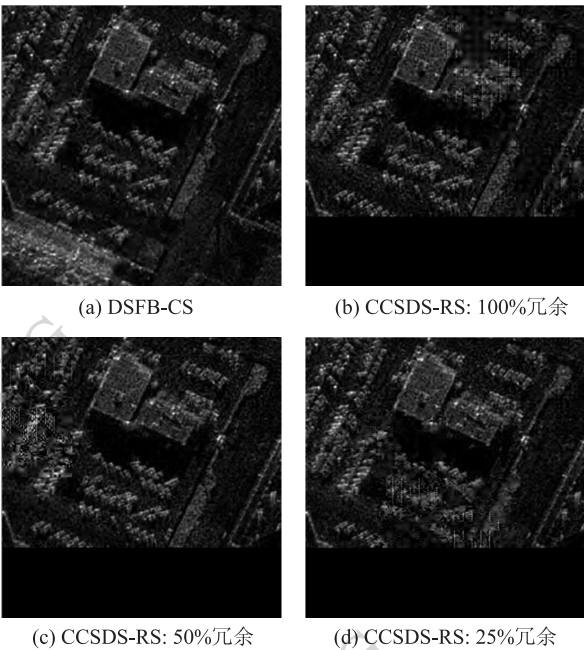


图7 丢包率为0.1时,分别采取方案 DSFB-CS 与 CCSDS-RS 获得的重建图像

Fig. 7 Reconstruction images for schemes DSFB-CS and CCSDS-RS under 0.1 PLR

3.2 本文方案与基于 TSW-CS 的传统编码方案比较

本文方案 DSFB-CS 主要从稀疏表示 DLWT,稀疏滤波,高效的重建算法 TSW 几个方面来提高重建性能。所以将 DSFB-CS 与仅利用 DWT 稀疏表示以及 TSW 算法的传统方案进行比较,如表1所示,本文方案获得的峰值信噪比明显要高于传统的方案。例如,当采用码率为4.0 bit/像素,测试图像选取 Img2 时,本文方案获得的 PSNR 相比 TSW-CS 提高了3.9 dB。

表1 方案 DSFB-CS 与基于 TSW-CS 的传统方案峰值信噪比比较

Table 1 PSNR comparison between DSFB-CS and TSW-CS-based

方案	码率/ (bit/像素)	PSNR/dB			
		Img1	Img2	Img3	Img4
DSFB-CS	1.0	26.14	26.96	23.29	23.55
TSW-CS		24.40	24.92	21.39	21.95
DSFB-CS	2.0	29.60	29.66	25.74	27.44
TSW-CS		26.42	26.68	23.30	24.55
DSFB-CS	3.0	31.71	32.11	27.97	29.43
TSW-CS		28.89	28.70	25.28	27.09
DSFB-CS	4.0	33.64	34.29	30.10	31.47
TSW-CS		31.11	30.38	27.09	29.40

为清晰比较两种方案获得的重构图像,图8给出了 Img1 及 Img4 在码率为3.0 bit/像素时,采用两种方案时获得的部分重建图像。从图8中可以看出,与基于 TSW-CS 的传统方案相比,DSFB-CS 可以获得更加清晰的边缘信息以及奇异点。

3.3 不同参数的选取

本部分实验主要讨论稀疏滤波以及量化位数对方案 DSFB-CS 的影响。令 η 表示执行稀疏滤波时保留 DLWT 大系数占总系数的比例,表2分别给出了选取码率为2.0 bit/像素及4.0 bit/像素,量化位数为5时,保留不同比例大系数时所获得的重建 PSNR。由表2可以看出, η 的选取是影响稀疏滤波作用的一个关键因素,采取合适的 η 可以明显提高 DSFB-CS 的重建性能(其中保留系数比例为100%时即不采用稀疏滤波的情况)。

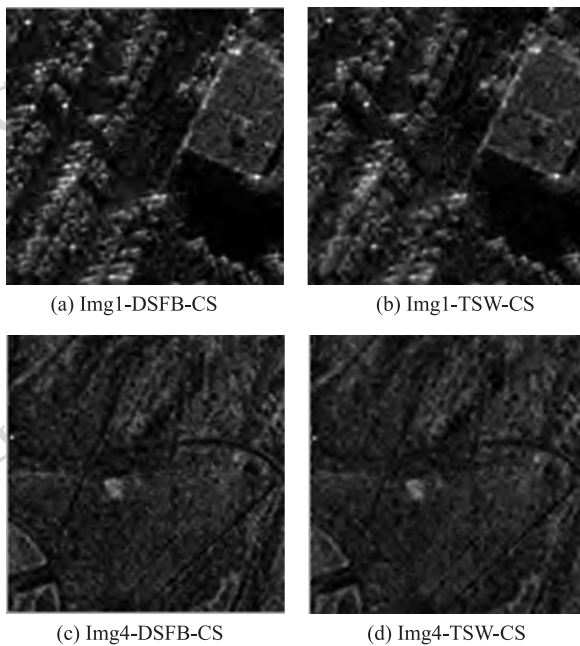


图 8 码率为 3.0 bit/像素时两种方案的重建图像

Fig. 8 Reconstructed SAR images of DSFB-CS and TSW-CS-based at 3.0 bit/pixel

表 2 保留不同大幅度系数比例时获得的峰值信噪比

Table 2 PSNR with percentage of reserved sorted large amplitude coefficients

$\eta/\%$	码率/ (bit/像素)	PSNR/dB			
		Img1	Img2	Img3	Img4
11	2.0	28.97	29.27	25.44	27.00
12		29.28	29.55	25.65	27.28
13		29.60	29.66	25.80	27.44
14		29.37	28.75	24.73	27.11
15		28.52	27.98	24.35	26.30
16	4.0	27.90	27.74	24.11	25.99
100		26.60	26.90	23.58	24.73
24		33.08	32.88	29.06	30.91
26		33.44	33.36	29.38	31.25
28		33.56	33.80	29.70	31.44
30	4.0	33.59	34.04	29.95	31.33
32		33.27	34.26	30.13	31.26
34		32.84	33.57	30.05	30.89
100		31.13	30.46	27.09	29.23

接下来讨论测量值个数与量化位数的折中选取。表 3 给出了选取不同量化位数时获得的重建

PSNR。由表 3 可以看出,当码率为 2.0 bit/像素时,量化位数为 5 位时能够获得较高的重建性能;当码率为 4.0 bit/像素时,量化位数为 5 位或者是 6 位时获得的率失真性能较高。

表 3 采取不同量化位数时获得的峰值信噪比

Table 3 PSNR with different bit-depth

量化 位数	码率/ (bit/像素)	PSNR/dB			
		Img1	Img2	Img3	Img4
3	2.0	27.25	27.94	24.41	25.12
4		28.47	29.45	25.39	26.28
5		29.60	29.66	25.80	27.44
6		29.07	28.99	25.24	27.21
5	4.0	33.59	34.26	30.13	31.47
6		34.68	34.00	30.30	32.63
7		33.50	32.57	28.90	31.71
8		32.13	31.40	27.79	30.49

4 结 论

为了解决信道可变导致的 SAR 图像传输质量下降的问题,本文利用压缩感知提出了一种新的 SAR 图像编码传输方案。与传统联合信源信道编码方案 CCSDS-RS 比较,本文方案体现了更强的鲁棒性,且能自适应信道条件的变化,重构 PSNR 随着信道的恶化缓慢下降;另一方面,本文方案又从压缩感知的稀疏表示,稀疏滤波,码率分配等方面进一步提高率失真性能,实验结果表明,与传统的基于 TSW-CS 的传输方案相比,本文方案获得的率失真性能明显要高于 TSW-CS。在目前工作的基础上,今后的研究方向主要集中于利用图像块的相似性进一步提高解码端的重构性能。

参考文献 (References)

- [1] Wu Y R. Concept of multidimensional space joint-observation SAR [J]. Journal of Radars, 2013, 2(2): 135-142. [吴一戎. 多维度合成孔径雷达成像概念[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 135-142.]
- [2] Bonneau R J, Aboulsleman G P. Target-aided fixed-quality-of-service compression of SAR imagery for transmission over noisy wireless channels [C]// Proceedings of International Conference

- on Image Processing. New York: IEEE, 2002, 1: 557-560.
- [3] Karvonen J, Simila M. A wavelet transform coder supporting browsing and transmission of sea ice SAR imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(1): 2464-2485.
- [4] Gabay A, Kieffer M, Duhamel P. Joint source-channel coding using real BCH codes for robust image transmission [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(6): 1568-1583.
- [5] Xue G D, Hao C X, Zhang W B, et al. A novel error resilient joint source-channel coding scheme for image transmission over error prone channels [C] // Proceedings of International Conference on Broadband Network & Multimedia Technology. Beijing: IEEE, 2009:529-534.
- [6] Deng C W, Lin W S, Lee B, et al. Robust image coding based upon compressive sensing [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2012, 14(2): 278-290.
- [7] Do T T, Yi C, Nguyen D T, et al. Robust video transmission using layered compressed sensing [C] // Proceedings of IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing. Rio DeJaneiro: IEEE, 2009:1-4.
- [8] Wang L J, Wu X L, Shi G M. Multiple description video coding against both erasure and bit errors by compressive sensing [C] // Proceedings of IEEE Visual Communications and Image Processing. Tainan, China: IEEE, 2011: 1-4.
- [9] Bhatnagar D, Budhiraja S. Image compression using DCT based compressive sensing and vector quantization [J]. International Journal of Computer Applications, 2012, 50(20): 34-38.
- [10] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [11] Hou X S, Yang J, Jiang G F, et al. Complex SAR image compression based on directional lifting wavelet transform with high clustering capability [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1): 527-538.
- [12] He L, Carin L. Exploiting structure in wavelet-based bayesian compressive sensing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(9): 3488-3497.
- [13] Fernando G V, Joan S S. Extending the CCSDS recommendation for image data compression for remote sensing scenarios [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(10): 3431-3445.