

The Compression Sensing Technology and Its Application Exploration in Radio Monitoring

Chunming Yan¹, Jia Zeng², Qiannan Lu², Jingjing Yang², Ming Huang²

¹Radio Monitoring Center of Baoshan City Industrial and Information Technology Committee, Baoshan Yunnan

²Wireless Innovation Lab of Yunnan University, Kunming Yunnan

Email: huangming@ynu.edu.cn

Received: Jun. 4th, 2017; accepted: Jun. 20th, 2017; published: Jun. 23rd, 2017

Abstract

Radio monitoring refers to the action of detection, search, interception of the radio signal within a certain radio management area, as well as analyzing and recognizing its technique parameters, working characteristics and radiation location. The daily monitoring work will generate massive amounts of data and with the increase of the number of monitoring stations, the transmission of the datum will take up a lot of network resources. Since the radio spectrum itself has sparse feature, it is possible to be compressed to reduce the amount of data. This paper introduces several compression sensing algorithms and their Matlab toolbox implementation method. Different compression algorithms are implemented to compress the radio spectrum data in the whole frequency range of 20~3000 MHz. The running time and data recovery reconstruction error of the algorithms are analyzed and compared. The results show that if 5% of the reconstruction error is allowed, the use of compression sensing can reduce the data flow of 2/3, which is beneficial to reduce the network transmission cost, and has potential application in radio monitoring.

Keywords

Compression Sensing, Radio Monitoring, Matlab Toolbox

压缩传感技术在无线电监测中的应用探讨

严春明¹, 曾佳², 鲁倩南², 杨晶晶², 黄铭²

¹保山市工业和信息化委员会无线电监测中心, 云南 保山

²云南大学无线创新实验室, 云南 昆明

Email: huangming@ynu.edu.cn

收稿日期: 2017年6月4日; 录用日期: 2017年6月20日; 发布日期: 2017年6月23日

摘要

无线电监测是指探测、搜索、截获无线电管理地域内的无线电信号,并对该无线电信号进行分析、识别、监视并获取其技术参数、工作特征和辐射位置等技术信息的活动。在日常的监测工作中将产生大量的监测数据,并且随着监测站数量的增加,这些数据的传输将占用大量的网络资源。由于无线电频谱数据本身具有稀疏性,因此可以通过压缩来减少传输的数据量。本文介绍了几种压缩传感算法及其Matlab工具箱实现方式,采用不同的算法对20~3000 MHz频段的无线电频谱数据进行压缩处理,并比较了算法的时间以及数据的恢复重构误差。结果表明在5%的重构误差下,采用压缩传感可减少2/3的数据流量,有利于降低网络传输成本,这在无线电监测中有潜在应用。

关键词

压缩传感, 无线电监测, Matlab工具箱

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

无线电频谱是一种重要的国家战略资源,通过无线电监测,进行无线电频谱管理,维护空中电波频谱秩序,保证无线电安全,成为关乎经济发展、社会稳定和国家安全的重要因素[1]。新中国成立以来,我国的频谱管理经历了“少设严管”、“按需设置,严格管理”和“科学管理,促进发展”三个阶段,经过近二十年的建设,全国已建成了以固定监测站、遥控站和移动监测车组成的无线电监测体系,基本满足重要区域 20 MHz~3000 MHz 频段范围的监测需要。以云南省为例,目前已建成了由 A 级网、B 级网、C 级网,以及在机场、边界口岸、码头和重点监测区域布置的小型监测站组成的无线电监测网络,这些网络通过 SDH、ADSL 或 3G 网络互联[2],网络传输数据流量大。然而,在边海地区及其它重点监测区域,如果要进行精细化无线电管理,就需要部署大量的谱传感节点,传感网络将产生海量的传感数据,网络传输数据量将呈现几何级数增加[3][4],数据传输成本的剧增将成为制约监测网发展的主要瓶颈之一。因此,采用数据压缩方法减少网络流量是发展新一代无线电监测网的关键。

由于无线电频谱具有稀疏性,因此压缩传感(CS: Compressed Sensing)技术在无线电监测网络中有潜在应用。压缩传感理论最早由 Donoho 等人[5]提出,其主要思想是在某个变换基下将信号稀疏表示,构建一个平稳的、与变换基不相关的测量矩阵,并通过设计重构算法精确地恢复原始信号。压缩传感理论提出后,迅速得到了广泛关注,并被美国科技评论评为 2007 年度十大科技进展,具有广阔的研究和应用前景。目前,压缩传感算法已被用于图像处理、心音分析和云环境下传感大数据的处理等许多方面[6][7],然而在无线电监测数据的处理中并没有相关报道。

本文简要介绍了压缩传感算法,并比较了不同算法的频谱压缩性能,发现 OMP 算法和 L1L2 算法性能较好;采用 L1L2 算法对 20~3000 MHz 频段的无线电频谱进行了压缩处理,结果表明,如果仅传输高于低噪的信号,则在一定的重构误差下,可以把传输的原始数据压缩到 31.8%。这对提高数据传输效率,节约传输资源有重要意义。

2. 压缩传感算法及数据处理

压缩传感的主要思想是寻找与原始信号 $x \in R^{N \times 1}$ 对应的测量矩阵 $A \in R^{M \times N}$ 以便生成观测矩阵 $y = Ax \in R^{M \times 1}$ ，由于 $M \ll N$ ，因此必须通过重构算法在一定的约束条件下才能恢复原始信号[8]。常见的重构算法有匹配追踪法(MP: Matching Pursuit)、正交匹配追踪法(OMP: Orthogonal Matching Pursuit)、逐步正交匹配追踪法(StOMP: Stagewise Orthogonal Matching Pursuit)、多面体面追踪法(PFP: Polytope Faces Pursuit)、迭代阈值法(IST: Iterative Soft Thresholding)、最小角度回归法(LARS: Least Angle Regression)、迭代重加权最小二乘法(IRWLS: Iteratively ReWeighted Least Squares)和最小 L1 范数算法 L1L2。这些算法中，前 8 种可采用斯坦福大学开发的 Matlab 压缩传感工具包 SparseLab [9]实现，而 L1L2 算法可采用莱斯大学开发的快速优化算法工具包 YALL1 [10]实现。

在工具包中算法被编写成了函数可以直接调用，实现 OMP 算法的函数为：SolveOMP，其调用格式如下：[sols, iters] = SolveOMP (A, y, N, maxIters)，其中输入参数 A 为测量矩阵，y 为观测矩阵，N 为原始数据长度，maxIters 为最大迭代次数；输出参数 sols 为重构数据，iters 为迭代次数。MP 算法、StOMP 算法、PFP 算法、IST 算法、BP 算法、LARS 算法和 IRWLS 算法的调用格式分别如下：

```
[sols, iters] = SolveMP (A, y, N, maxIters);
[sols, iters] = SolveStOMP (A, y, N, maxIters);
[sols, iters] = SolvePFP (A, y, N, maxIters);
[sols, iters] = SolveIST (A, y, N, maxIters);
sols = SolveBP (A, y, N, maxIters);
[sols, iters] = SolveLasso (A, y, N, algType, maxIters);
[sols, iters] = SolveIRWLS (A, y, maxIters)。
```

实现最小 L1 范数算法的函数为：yall1，其调用格式如下：[x, Out] = yall1 (A, b, opts)，其中输入参数 A 为测量矩阵，b 为观测矩阵，opts 为选择项，opts.tol 设置最大误差，opts.nu 的值大于 0 算法为 L1/L1 模式，opts.rho 的值大于 0 算法为 L1/L2 模式，opts.delta 的值大于 0 算法为 L1/L2con 模式，opts.nonneg 的值为 1 算法为非负模式，opts.weights 的值大于 0 算法为加权 L1 模式。输出参数 x 为重构数据，out 输出退出信息和迭代次数等。

图 1 给出了测量得到的 20-3000MHz 频段的典型无线电频谱分布图[11]，由图可见，由于频谱数据中带有低噪，在进行数据处理时必须去除低噪才能保证其稀疏性。数据处理的步骤是先在不同频段取出频谱数据的平均电平，减去低噪得到稀疏的原始信号数组 x ，然后产生高斯测量矩阵 A ，再用 A 乘以 x 得到观测矩阵 y ，最后调用压缩传感重构算法即可得到重构信号 x' 。计算重构平均误差的公式为： $MSE = \|x' - x\|_2^2 / \|x\|_2^2$ ，不同频段的平均误差进行加权求和，并除以划分的频段总数即可得到监测频段的总误差，压缩比计算与平均误差计算相同。

3. 实验结果分析与讨论

3.1. 不同算法的比较

在实验中，我们对九种算法的性能进行了统计比较，表 1 给出了压缩比为 0.5 时，调频广播(87.5~108 MHz)频段不同算法的数据压缩重构误差和计算时间，从表中可以看出不同算法具有不同的重构误差和计算时间，选择算法是进行压缩传感的关键。为了直观的比较重构算法对频谱数据的压缩性能，我们选取了 OMP、IST 和 L1L2 算法分别对特定频段的频谱数据进行了压缩重构。

图 2 给出了压缩比为 0.5 时，调频广播频段采用 OMP、IST 和 L1L2 算法的数据压缩重构比较，图中

Table 1. Comparison of reconstruction error and calculation time of different algorithms
表 1. 不同算法的重构误差与计算时间比较

算法	误差	计算时间
StOMP	1.979556e-001	6.909817e-003
LARS	1.622896e-001	4.603686e-002
OMP	6.361672e-002	1.556287e-002
BP	1.721571e-001	1.447810e-001
MP	2.013880e-001	1.596714e-001
PFP	1.428507e-001	3.325506e-002
IST	3.261296e-001	5.602173e-001
LRWLS	2.246290e+000	8.920407e-003
L1L2	1.426413e-001	8.235404e-003

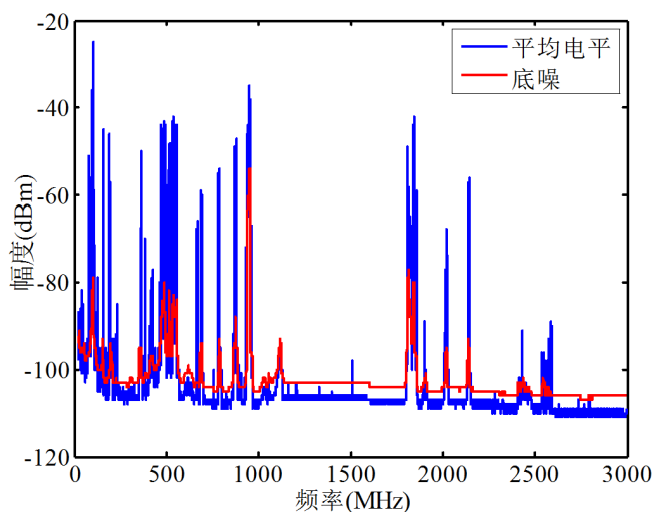


Figure 1. Radio spectrum in the frequency range of 20 MHz~3 GHz
图 1. 频率为 20 MHz~3 GHz 范围内的无线电频谱

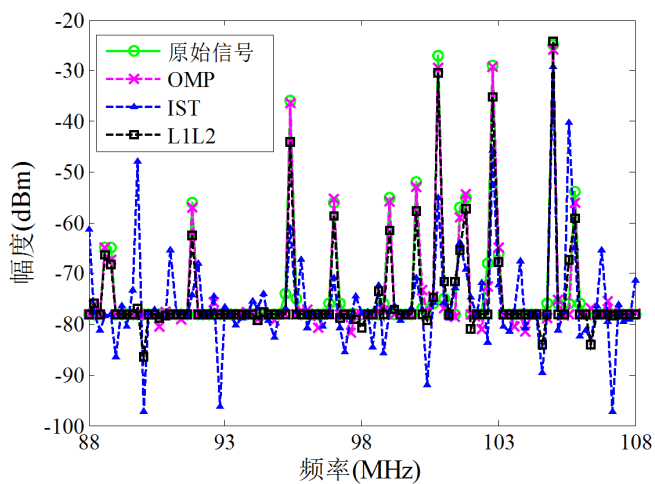


Figure 2. Spectrum reconstruction in the frequency range of 88 MHz~108 MHz
图 2. 88 MHz~108 MHz 频谱重构图

可以看到 IST 算法重构波形非常差，产生了大量的伪频谱，而 OMP 和 L1L2 算法能够较精确的恢复原始信号波形。图 3 给出了压缩比为 0.8 时，数字电视频段 505~525 MHz 采用 OMP、IST 和 L1L2 算法的数据压缩重构比较，由图可以看出 OMP 和 L1L2 算法恢复波形明显优于 IST 算法。定量计算表明，OMP 算法、IST 算法和 L1L2 算法的重构误差分别为 1.3%、17%和 4%，IST 算法误差明显高于 OMP 和 L1L2 算法，OMP 算法误差最低，但计算时间较长。

图 4 给出了压缩比为 0.8 时，GSM 频段 2000~2050 MHz 采用 OMP、IST 和 L1L2 算法数据压缩重构的比较，可看出该频段 OMP 和 L1L2 算法明显优于 IST 算法，其中 OMP 算法误差为 0.16%，L1L2 算法误差为 0.89%，IST 算法误差为 8.1%，OMP 算法和 L1L2 算法的误差均小于 IST 算法的误差。图 5 给出了压缩比为 0.6 时，566~586 MHz 频段采用 OMP、IST 和 L1L2 算法压缩压缩重构的比较，OMP 算法、IST 算法和 L1L2 算法的重构误差分别为 0.014%、0.015%和 0.2%，IST 算法误差明显高于 OMP 和 L1L2 算法。

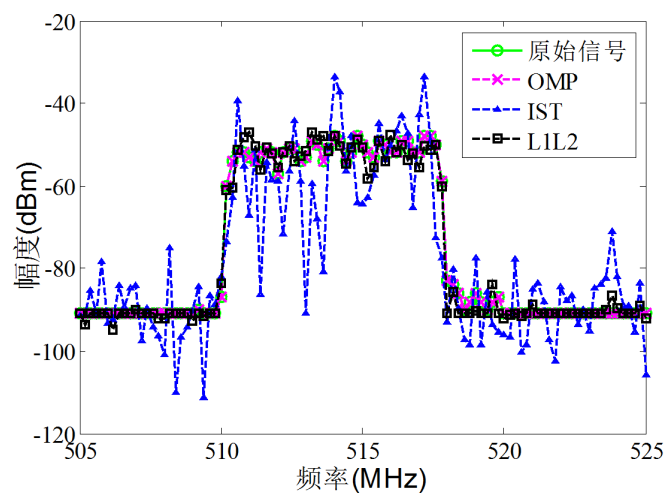


Figure 3. Spectrum reconstruction in the frequency range of 505 MHz~525 MHz

图 3. 505 MHz~525 MHz 频谱重构图

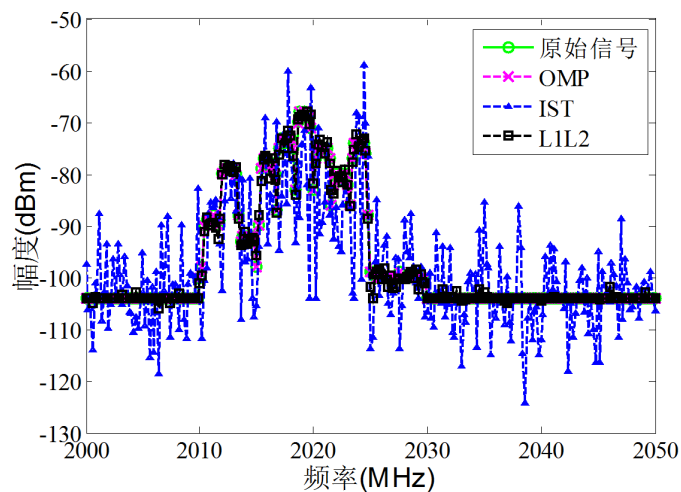


Figure 4. Spectrum reconstruction in the frequency range of 2000 MHz~2050 MHz

图 4. 2000 MHz~2050 MHz 频谱重构图

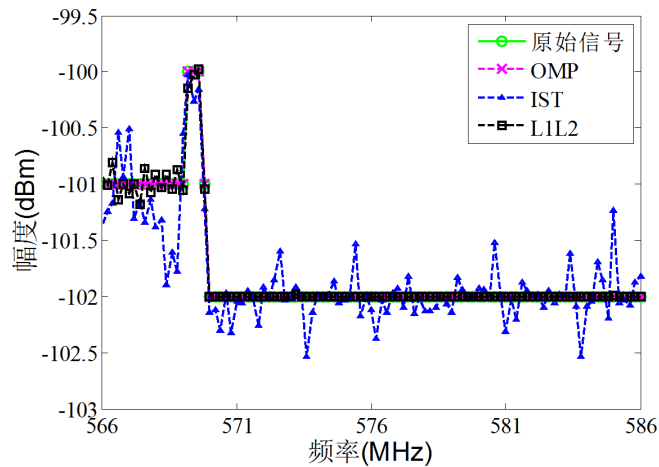


Figure 5. Spectrum reconstruction in the frequency range of 566 MHz~586 MHz

图 5. 566 MHz~586 MHz 频谱重构图

Table 2. The compression ratio, error and occupancy ratio of each frequency band

表 2. 各频段压缩比、误差和占用度

频带	频率(MHz)	压缩比	误差	占用度
1	20~87.5	0.768	0.066	35.7%
2	87.5~108	0.5	0.063	65.4%
3	108~223	0.526	0.059	25.5%
4	223~400.05	0.381	0.045	12.7%
5	400.05~470	0.646	0.066	15.1%
6	470~566	0.905	0.067	61.6%
7	566~606	0.301	0.021	8.2%
8	606~806	0.353	0.065	19.1%
9	806~890	0.476	0.055	22.3%
10	890~960	0.602	0.070	42.7%
11	960~1215	0.251	0.031	7.7%
12	1215~1710	0.2	0.070	0.6%
13	1710~1880	0.457	0.055	28.7%
14	1880~2170	0.334	0.057	10%
15	2170~3000	0.145	0.054	7%
16	20~3000	0.318	0.056	13.7%

3.2. 基于 L1L2 算法的数据处理

在前面我们对 OMP、L1L2 和 IST 算法进行了比较，主要结论为：OMP 算法和 L1L2 算法性能明显优于 IST 算法；OMP 算法和 L1L2 算法性能相当，但 L1L2 算法的计算时间小于 OMP 算法。因此，我们以 L1L2 算法为例对 20~3000 MHz 频段的频谱数据分段进行了处理，并计算得到了各个频段的压缩比和误差，结果见表 2 所示，从表中可以看出，重构误差大约 5% 时，20~3000 MHz 频段的数据压缩比达到

31.8%，即采用压缩传感可减少近 2/3 的数据流量，从而明显提高了数据传输效率，节约了网络传输资源。

4. 结论

压缩传感可以在远小于 Nyquist 采样速率的条件下实现数模转换，因而成为近年研究的热点。论文介绍了匹配追踪(MP)、正交匹配追踪法(OMP)和迭代阈值法(IST)等 9 种压缩传感算法及其 Matlab 工具箱实现方式，通过对 20~3000 MHz 频段的无线电频谱进行压缩处理，发现如果重构误差为 5%，采用压缩传感可将数据流量压缩到 1/3，有利于降低运营成本；对 9 种压缩传感算法的压缩率、重构误差和运算时间进行了比较，结果表明 L1L2 算法重构误差较小和计算时间短。

致 谢

作者感谢云南省高校谱传感与边疆无线电安全重点实验室的支持。

基金项目

论文得到了云南省高校谱传感与边疆无线电安全重点实验室的资助。

参考文献 (References)

- [1] 姚禹, 向晶. 全面加强无线电管理为经济社会发展和国家安全稳定保驾护航——访国家无线电监测中心、国家无线电频谱管理中心副主任薛永刚[J]. 中国无线电管理, 2011, 9: 14-16.
- [2] 唐皓. 无线电监测信息化模型及解决方案设计[J]. 中国无线电, 2011, 7: 62-65.
- [3] 边疆无线电课题组. 边境区域无线电管理技术设施建设及投资需求研究[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2015: 71-82.
- [4] 鲁倩南, 金肇元, 杨晶晶, 黄铭. 高度重视边境地区无线电技术设施建设积极服务国家网络空间安全发展战略[J]. 中国无线电, 2016, 1: 22-23.
- [5] Donoho, D.L. (2006) Compressed Sensing. *IEEE Transactions on Information Theory*, **52**, 1289-1306. <https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582>
- [6] Moy, T., Rieutort-Louis, W., Wagner, S., Sturm, J.C. and Verma, N. (2016) A Thin-Film, Large-Area Sensing and Compression System for Image Detection. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, **63**, 1833-1844.
- [7] Yang, C. and Chen, J. (2017) A Scalable Data Chunk Similarity Based Compression Approach for Efficient Big Sensing Data Processing on Cloud. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, **29**, 1144-1157. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2016.2531684>
- [8] 万莎, 徐彪, 段洪涛. 压缩感知技术综述[J]. 中国无线电, 2013, 2: 60-62.
- [9] SparseLab. <http://sparselab.stanford.edu/>
- [10] Zhang, Y., Deng, W., Yang, J., et al. YALL1: Your Algorithms for L1. <http://yall1.blogs.rice.edu/>
- [11] Chen, D., Yang, J., Wu, J., et al. (2012) Spectrum Occupancy Analysis Based on Radio Monitoring Network. *ICCC2012*, Beijing.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ojcs@hanspub.org