

基于压缩感知的农田温度信息处理

焦俊,王强,范国华,王超,古冉,辜丽川* (安徽农业大学信息与计算机学院,安徽合肥 230036)

摘要 由于农田温度信息在离散余弦基(DCT)下的近似稀疏性,采用压缩感知(CS)技术对每块农田温度信息进行压缩和重构,即将温度信息投影到随机高斯观测矩阵,在接收端通过OMP算法重构出每块农田的温度信息。仿真试验结果表明,在较为稳定的网络环境中,CS算法能够以较少的观测值实现对原始信号的精确重建,降低节点能耗,延长网络生命周期。
关键词 压缩感知;离散余弦变换;正交匹配追踪算法;农田温度
中图分类号 S126 **文献标识码** B **文章编号** 0517-6611(2015)29-357-03

Field Temperature Information Processing Based on Compressed Sensing
JIAO Jun, WANG Qiang, FAN Guo-hua, GU Li-chuan* et al (College of Information and Computer, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036)
Abstract According to the approximately sparsity of field temperature information in Discrete Cosine Transform, Compressed Sensing theory was applied to compress and restructure field temperature information in this paper, that was, field temperature information was projected to arandom Gauss measurement matrix, at the receiving end, each field the temperature data was reconstructed through the OMP algorithm. The simulation result showed that CS algorithm could be used to reduce accurate measurements to reconstruct the original signal groups, save node energy and prolong the network lifetime in the relatively stable environment.
Key words Compressed sensing; Discrete Cosine Transform(DCT); Orthogonal Matching Pursuit(OMP); Farmland temperature

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是利用大量无线传感器节点,以无线、多跳、自组织方式构成的数据协同处理网络,感知、处理和传输网络覆盖区域中被感知对象的信息^[1-2]。为提高信息采集系统的可靠性,典型的无线传感器网络用中,节点的部署较为稠密,由此产生了大量的冗余数据,增加了网络能耗和延迟,为此国内外学者提出了各种解决方案^[3]。

压缩感知(Compressed Sensing, CS)是美国学者 Tao 等^[4] 2004 年提出的集采样和压缩为一体的理论。Giorgio^[4] 等指出在满足有限等距属性(restricted isometry property, RIP)的条件下,运用低于奈奎斯特标准所需的观测次数,就能以很高的概率来完全地重构信号^[4]。因此 CS 技术已经在信号图像处理、各类成像、无线通信、模拟到信息的转换、计算生物学、地球物理学数据分析等领域成为研究热点。

笔者在研究了农田环境温度变化规律的基础上,针对温度信息在离散余弦变换(DCT)域中具有较好的稀疏性的特点,对在每块农田采集的温度信息进行压缩和发送,接收端接收数据后,通过OMP算法重构出每块监测农田的温度信息,减少了数据传送量。

1 压缩感知理论

1.1 压缩感知基本理论 CS 理论的主要思想是利用少量的观测值,从一个不确定的系统中高效地恢复稀疏信号。压缩感知模型不是直接测量离散信号本身,而是将离散信号投影到感知矩阵上得到观测值^[5]。CS 理论包含 3 要素:稀疏矩阵、测量矩阵和重构算法。

信号的稀疏性或近似稀疏性是指其大量元素为 0 或近

似为 0,这个特性是压缩感知的前提。假设一个长度为 N 的离散实值信号 X ,该信号能用一组标准正交基 $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N]$ 的线性组合表示为:

$$X = \sum_{k=1}^N \psi_k \alpha_k = \Psi \alpha$$
 (1)

式中, Ψ 为 $N \times N$ 标准正交基, α 为 X 在 Ψ 正交基上展开的系数向量。若 X 在矩阵 Ψ 上有且仅有 K 个非零系数,其中, $K < N$ 则称 X 可在 Ψ 上稀疏表示。 K 值越小,表明信号的稀疏性越强,信号重构所需的测量次数越少^[6]。

测量矩阵是用于数据采样,是压缩感知理论的关键。针对信号 X ,利用测量矩阵 $\Phi^{M \times N}$ (其中 $M \times N$) 对信号 $X^{N \times 1}$ 采样,得到 X 的采样数据 $Y^{M \times 1}$,采样过程是一个降维过程^[7],可以用式(2)表述:

$$\begin{cases} Y = \Phi X = \Phi \Psi \alpha = A \alpha \\ A = \Phi \Psi \end{cases}$$
 (2)

式中, A 为感知矩阵。因为最终获得的采样数据 Y 的维度 $M \times N$,并且不受信号带宽影响,所以其采样得到的数据容量较小。

重构算法是从压缩信息中恢复原始信息的手段,是指通过得到的测量向量 Y (M 维)重构出原信号变换系数或者原信号 X (N 维)的过程,该过程也是一个寻求约束条件下最优解的问题^[8],具体表述如下:

$$\begin{aligned} \min & \|X\|_0 \\ \text{s. t. } & \Phi \Psi^{-1} X = Y \end{aligned}$$
 (3)

式(3)描述了一个 NP 组合优化问题,由于最优解无法直接获得,因此,寻求次优解。该研究采用正交匹配算法对信号进行重构。

重建信号的测量值数目 M 与待重构信号长度 N 之间的关系必须符合式(4),

$$M > C \times u^2(A) \times K \times \log N$$
 (4)

式中, K 为信号的稀疏度; C 为常数。从式(4)可知,构建

基金项目 安徽省教育厅自然基金资助项目(KJ2014A074);安徽省教育厅质量工程项目(2014tszy090,2014jyxm091);安徽农业大学博士启动基金资助项目。
作者简介 焦俊(1964-),男,江苏南京人,博士,副教授,从事物联网研究。*通讯作者,教授,博士,从事物联网研究。
收稿日期 2015-08-20

与稀疏基不相关性好的观测矩阵,使感知矩阵 A “平坦”,能够减少所需测量值的数量^[9]。

2 基于压缩感知的信息采集

基于压缩感知的信息采集的框架如图 1。设每块田的温度为 $x_i (i=1, \dots, N)$, 在每块农田中设置一个随机观测矩阵,

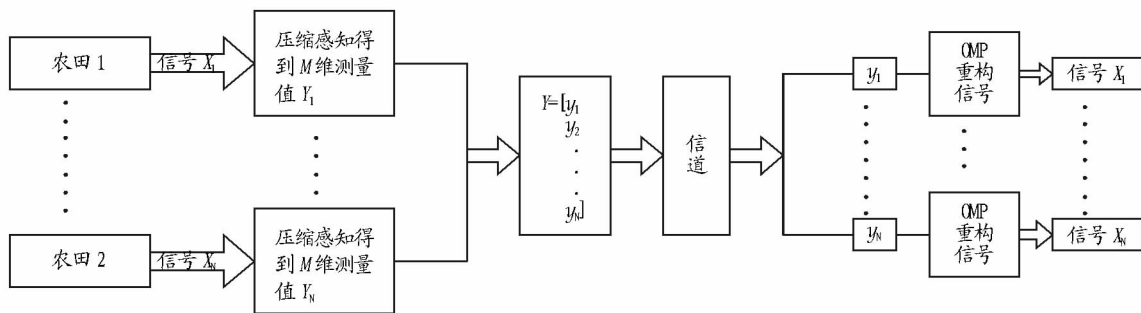


图1 农田信息采集系统

2.1 基于离散余弦变换的温度信号稀疏化 研究发现,农田中温度变化的幅值较小,并且其稀疏性在 DCT 域上有较强的表现。因此,运用 DCT 作为农田温度信号稀疏分解的基矩阵。

在 DCT 域上得到实系数^[10], DCT 变化如下:

$$X(k) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sqrt{n}} x(i), k=0 \quad (5)$$

$$X(k) = \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{\frac{2}{n}} x(i) \cos \left(\frac{(2i+1)k\pi}{2n} \right), k=1, 2, \dots, n-1 \quad (6)$$

2.2 随机高斯观测矩阵 测量矩阵 $A = \Phi\Psi$, 需要满足约束等距条件 RIP (Restricted Isometry Property), 即:

$$(1 - \delta_k) \|X\|_2^2 \leq \|A_T X\|_2^2 \leq (1 + \delta_k) \|X\|_2^2 \quad (7)$$

式中, $\delta_k \in (0, 1)$ 表示等容常数; A_T 是以 T 为指标集抽取矩阵 A 列向量形成的 $N \times T$ 维矩阵, 通过极小范数能够唯一恢复出稀疏信号。

Baraniuk^[11] 证明与 RIP 的等价条件, 就是观测矩阵与稀疏表示基之间的不相关性, 同时理论证明, 当 Φ 是高斯矩阵时, 传感矩阵 A 以较大概率满足 RIP 条件。

2.3 正交匹配追踪算法 正交匹配追踪算法 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP) 是一种经典的信号重构算法, 是以感知矩阵 A 和观测向量 Y 作为输入值, x 的 K 稀疏逼近和重建误差作为输出值, 通过寻找训练样本矩阵中与残差最大线性相关的原子, 来更新索引集。在每次迭代过程中获得测试样本在索引集上的最优投影, 来逼近原始信号, 保证残差最小, 算出式(3)的稀疏解^[12]。

OMP 算法实现过程如下:

(1) 初始化。余量 $r_0 = Y$, 索引集 $V^0 = \emptyset$, 迭代计数 $t = 1$ 。

(2) 计算余量与感知矩阵 A 的每一列内积 $g^n = A^T r^{n-1}$ 。

(3) 寻找 g^n 中最大元素 $k, k = \arg \max_{i \in (1, \dots, N)} |g^n(i)|$ 。

(4) 更新索引集 $V^n = V^{n-1} \cup k$ 。

(5) 运用最小二乘法求近似解, 使得残差最小, 得到在已选列向量上的最优投影, $x^n = \arg \min \|Y - V^n x\|_2$ 。

(6) 更新余量: $r_t = Y - V^n x^n$ 。

得到观测值 $y_1, y_2, \dots, y_N$, 进而得到总观测值 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]$, 将总观测值 Y 发送至接收端, 在接收端得到各个观测信号, 并采用 OMP 算法对信号 $y_i (i=1, 2, \dots, N)$ 进行重构, 得到信号 $x_1, x_2, \dots, x_N$, 重构值作为最终输出值。

(7) 计数器加 1, $t = t + 1$, 判断 $r_t < \theta$ 成立否 (θ 为设定的最大残差值), 满足则停止迭代, 输出 x^n 和 r_t , 停止; 否则转到步骤(2)继续迭代。

3 仿真试验 该研究选用 10 块农田中温度传感器采集的 2 420 个数据作为研究对象, 采用均方误差作为评价复原精度指标。

3.1 信息重建误差试验 10 块农田的温度信息重构后的信号均方误差见图 2。从图 2 可以看出, 10 块农田温度的均方误差都在 0.1 °C 左右, 出现这个结果的原因是农田温度数据在时域中平滑性较好, 同时数据的稀疏效果较强, 从而数据复原结果相对较好。

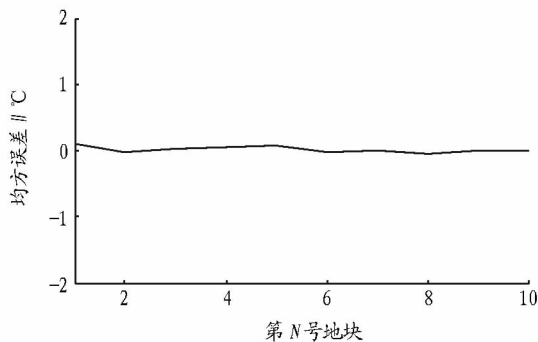


图2 10 块农田温度信息重建误差

3.2 农田温度复原 以 6 号农田为例, 进行温度复原仿真, 其温度数据重建效果见图 3。从图 3 可以看出, 温度数据重建效果很好, 6 号农田中温度的均方误差为 0.018 °C, 试验所用的农田的温度数据, 取小数点后 2 位, 那么 0.018 °C 的误差对温度数据恢复的影响很小, 故能够重建出如图 3 所示的效果。

通过对农田温度信息的压缩感知与重建后发现: 信息的稀疏性越好, 其复原的精确度越高, 所需要的采样数目就越少。

4 结论

在农田环境信息采集的 WSN 中, 由于实时采集与传输庞大的数据, 消耗了大量的节点能量, 缩短了节点的寿命, 限制了 WSN 的发展。CS 理论的诞生为该问题的解决带来了新的途径。论文中采取了将 WSN 与 CS 结合的方式, 利用温

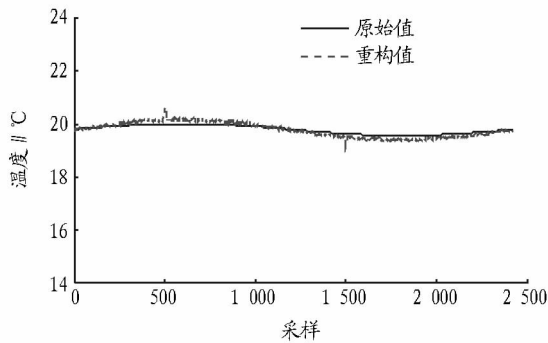


图3 6号农田数据复原

度在过 DCT 域中表现稀疏性的基础上,对农田信息单独进行压缩采样、发送,接收端再对数据进行重构。仿真结果表明运用 CS 算法既减少了采集与传输的数据量,又降低了节点能量损耗,满足了无线传感器网络应用的需求。

参考文献

- [1] JIAO J, MA H M, QIAO Y, et al. Design of farm environmental monitoring system based on the internet of things[J]. Advance journal of food science and technology, 2014, 6(3): 368–373.
- [2] 焦俊, 张水明, 杜玉林, 等. 物联网技术在农田环境监测中的应用[J]. 中国农学通报, 2014, 30(20): 290–295.

(上接第 254 页)

4.3 水土治理中利用坡位促进芒萁散布 可以参照“类梯田”的构建模式,运用“微积”的形式,进行治理区域坡位微观改造。通过每一个独立坡面中沟脊比重的降低和沟谷、低坡比重的增大或维持,通过一系列“人造”微型沟谷的构建,创造更多满足芒萁生长条件的区域,使芒萁的生长能够先出现在沟谷等低处,进而向其他不同部分蔓延。

参考文献

- [1] 姚华荣, 杨志峰, 崔保山. GIS 支持下的澜沧江流域云南段土壤侵蚀空间分析[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 421–429.
- [2] 李小建, 乔家君. 地形对山区农田人地系统投入产出影响的微观分析: 河南省巩义市吴沟村的实证研究[J]. 地理研究, 2004, 23(6): 717–726.
- [3] SEIBERT J, STENDAHL J, SØRENSEN R. Topographical influences on soil properties in boreal forest [J]. Geoderma, 2007, 141(1/2): 139–148.
- [4] PENNOCK D J, CORRE M D. Development and application of landform segmentation procedures [J]. Soil and tillage research, 2001, 58(3/4): 151–162.
- [5] GRIFFITHS R P, MADRITCH M D, SWANSON A K. The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): Implication for the effects of climate change on soil properties[J]. Forest ecology and management, 2009, 257(1): 1–7.
- [6] 韦金丽, 王国波, 凌子燕. 基于高分辨率 DEM 的地形特征提取与分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2012(1): 33–36.
- [7] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同坡向及坡位草本群落生物量及

- [3] 焦俊, 操俊, 潘中, 等. 基于物联网的农田环境在线监测系统[J]. 农业工程, 2014, 4(6): 18–23.
- [4] QUER G, MASIERO R, PILLONETTO G, et al. Sensing, compression and recovery for WSNs: Sparse signal modeling and monitoring framework[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2012, 11(10): 3447–3461.
- [5] FORNASIER M, RAUHUT H. Compressive sensing[M]//Chapter in Part 2 of the Handbook of Mathematical Methods in Imaging Springer, 2011.
- [6] CANTLES E, TAO T. Near-optimal signal recovery from random projections and universal encoding strategies [J]. IEEE transactions on information theory, 2006, 52(12): 5406–5425.
- [7] 张金成, 吕方旭, 王针, 等. WSNs 中的分簇式压缩感知[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1): 169–177.
- [8] PATWARI N, WILSON J. Rf sensor networks for device-free localization: Measurements, models, and algorithms[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(11): 1961–1973.
- [9] SIGG S, SCHOL M. Rf-sensing of activities from non-cooperative subjects in device-free recognition systems using ambient and local signals[J]. IEEE transactions on mobile computing, 2014, 13(4): 907–920.
- [10] CANDES E, ROMBERG T, TAO T. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements [J]. Communications on pure and applied mathematics, 2006, 5998: 1207–12233.
- [11] BARANIUK R. Compressive sensing [J]. IEEE signal processing magazine, 2007, 24(4): 118–121.
- [12] ABOUTORAB N, HARDJAWANA W, VUCETIC B. Application of compressive sensing to channel estimation of high mobility OFDM systems [C]//ICC 2013. Budapest, Hungary, IEEE, 2013: 4946–4950.

- 多样性研究[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 67–73.
- [8] 邓恢, 林沁文, 腾华卿, 等. 强度水土流失区芒萁生长规律分析[J]. 福建林学院学报, 2004, 24(3): 262–264.
- [9] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 120.
- [10] 王秋云, 陈志彪, 陈志强, 等. 福建省长汀县朱溪小流域土地利用景观格局分析[J]. 亚热带水土保持, 2012, 24(3): 4–6.
- [11] 陈丽慧. 基于多源信息的土壤侵蚀敏感性机器生态环境效应研究: 以朱溪河小流域为例[D]. 福州: 福建师范大学, 2009.
- [12] 李时盘. 河田水土保持工作的回顾[J]. 福建水土保持, 1990(3): 50–53.
- [13] 岳辉, 陈志彪. 朱溪河小流域水土流失治理与生态环境效应[J]. 福建地理, 2003(1): 6–8.
- [14] WEISS A. Topographic position and landforms analysis[R]. San Diego, CA: ERSI User Conference, 2001.
- [15] RUHE R. Quaternary landscapes [M]. Ames, IA: Iowa State University Press, 1969.
- [16] NIZEYIMANA E, BICKI T. Soil and soil-landscape relationships in the north central of Rwanda, East-Central Africa[J]. Soil science, 1992, 153: 225–236.
- [17] 林夏馨. 芒萁的生长发育规律及人工繁殖技术[J]. 福建水土保持, 2004, 16(2): 60.
- [18] 秦承志, 朱阿兴, 施迅, 等. 坡位渐变信息的模糊推理[J]. 地理研究, 2007, 26(6): 1165–1175.
- [19] TSUI C C, CHEN Z S, HSIEH C F. Relationships between soil properties and slope position in alluvial rain forest of southern Taiwan[J]. Geoderma, 2004, 123(1/2): 131–142.