

基于 LQI 的 WSN 自适应差错控制方案

魏立线^{1a,1b}, 姚武军^{1a}, 钟卫东^{1a,1b}, 杨晓元^{1a,2}

(1. 武警工程学院 a. 电子技术系网络与信息安全武警部队重点实验室; b. 网络与信息安全研究所, 西安 710086;
2. 西安电子科技大学网络信息安全教育部重点实验室, 西安 710071)

摘 要: 针对无线传感器网络(WSN)中信息传输误码率高和能量受限的问题, 提出一种基于链路质量指示(LQI)的自适应差错控制方案。利用 IEEE802.15.4 协议的物理层规范为无线传感器网络提供精确的信道质量评估, 根据 LQI 与误包率之间的数量关系, 将信道质量非均匀地划分为 8 个等级, 并选择 8 种 BCH 码与之对应, 在节点通信过程中实时地选择最佳的 BCH 码作为纠错码。实验结果表明, 该方案具有较高的能量效率, 能够有效降低误包率。

关键词: 无线传感器网络; 差错控制; 链路质量指示; IEEE802.15.4 协议; BCH 码

Adaptive Error Control Scheme in WSN Based on Link Quality Indicator

WEI Li-xian^{1a,1b}, YAO Wu-jun^{1a}, ZHONG Wei-dong^{1a,1b}, YANG Xiao-yuan^{1a,2}

(1a. Key Laboratory of Network & Information Security Under the Chinese Armed Police Force, Department of Electronic Technology;
1b. Network & Information Security Institute, Engineering College of the Armed Police Force, Xi'an 710086, China;
2. Key Laboratory of Network & Information Security of the Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China)

【Abstract】 Aiming at the characteristics of high bit error rate and energy constraints on Wireless Sensor Network(WSN), this paper proposes an adaptive error control scheme based on Link Quality Indicator(LQI). The PHY specification of IEEE802.15.4 provides accurate measurements of channel quality for WSN, according to the quantitative relationship between LQI and packet error rate, it divides the channel quality into eight levels non-uniformly, furthermore, eight different BCH codes are chosen correspondingly. The nodes choose optimal BCH codes as their error correction scheme in real time. Experimental results show the scheme has high energy efficiency, meanwhile, drops the packet error rate effectively.

【Key words】 Wireless Sensor Network(WSN); error control; Link Quality Indicator(LQI); IEEE802.15.4 protocol; BCH code

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.21.022

1 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由大量传感器节点以无线通信方式组成的信息传播网络, 在军事、安全、生产、医疗、交通等领域有广泛的应用前景, 是近年来无线通信领域研究的热点之一。WSN 节点的典型特征是能量、通信和计算能力有限, 其中, 能量受限是制约 WSN 的主要问题, 通信和计算能力的提高往往是以牺牲能量为代价的。由于 WSN 节点收发机低功耗的限制, 因此信号在传输中更容易受到多径衰落、干扰、频移等因素的影响而产生差错, WSN 差错控制协议设计的首要目标是以最少的能量消耗提高网络可靠性。

信道编码是提高无线通信链路可靠性和实时性、降低通信模块发送功率的有效手段, 同时, 信道编码也会带来额外的能量消耗, 因为传输码字中的冗余比特要占用通信资源, 编解码过程要消耗一定的微处理器资源。通常, 信道编码的纠错能力越强, 其能耗代价越大。另一方面, WSN 信道环境往往复杂多变, 信道质量时好时坏, 一种有效的解决方案是根据信道质量自适应选择信道编码, 实现能耗与传输可靠性的最佳折中。

目前, 无线网络尤其是移动通信网络中的自适应差错控制技术已有一些研究成果, 如文献[1]中的无线城域网的前向差错控制方案, 但都还不能直接应用于 WSN, 主要原因是不能同时满足低能耗和低复杂度的要求。近来, 有学者在 WSN

差错控制技术的能效分析上做了一些工作。文献[2]分析了 μAMPS 节点上运行卷积码的能耗, 并证明在误码率 $p_e > 10^{-5}$ 时卷积码的能效低于不编码传输系统; 文献[3]对比了卷积码和 BCH 码的能效, 得出如下结论: 自动重发请求(Automatic Repeat Request, ARQ)不能提高 WSN 的能效, 相比于能效较优的卷积码, BCH 的能效约高 15%。因此, 本文选择 BCH 编码, 提出了一种基于链路质量指示(Link Quality Indicator, LQI)的 WSN 自适应差错控制方案, 对方案进行了能效分析。

2 网络模型及数据传输模式

2.1 网络模型

本文采用分层式的网络结构, 如图 1 所示。网络节点分为 3 类: 基站, 簇头节点和应用节点。基站是 WSN 与有线网络之间的网关, 拥有整个网络的控制权, 监测数据最终经基站传送给用户; 簇头节点通过多跳路由的方式与基站进行数据通信; 应用节点作为终端节点, 把采集到的数据传输给簇头节点。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60842006); 陕西省自然科学基金资助项目(2010JM8034)

作者简介: 魏立线(1966—), 男, 副教授、硕士, 主研方向: 无线传感器网络, 网络安全; 姚武军, 硕士; 钟卫东, 副教授; 杨晓元, 教授

收稿日期: 2011-04-19 **E-mail:** sensornet@163.com

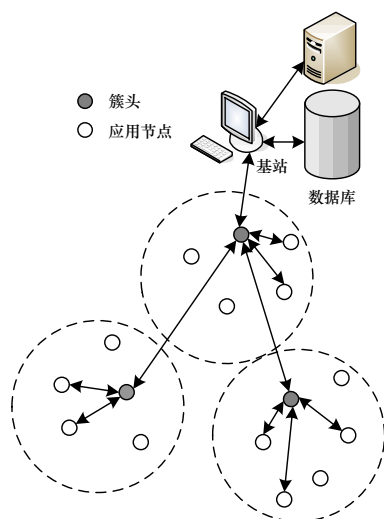


图1 网络模型

2.2 IEEE802.15.4 协议

IEEE802.15.4 协议^[4]是针对低速无线个人区域网络制定的, 它把低能量消耗、低速率传输、低成本作为重点目标, 定义了 PHY 层和 MAC 层规范。其网络特征与 WSN 有很多相似之处, 很多研究机构把它作为 WSN 的通信标准, TinyOS2.x^[5]所实现的很多模块和接口也兼容 IEEE802.15.4。

PHY 层定义了物理无线信道和 MAC 子层之间的接口, 提供物理层数据服务和管理服务。数据服务包括以下 5 个功能: 激活和休眠收发器, 信道能量检测(Energy Detection, ED), 接收数据包的链路质量指示, 空闲信道评估, 收发数据。LQI 为网络层或应用层提供接收数据帧时无线信号的强度和质量信息, 是一个与物理层数据单元一起提交给 MAC 层的信噪比指标。PHY 层和 MAC 层通用帧格式如图 2 所示。

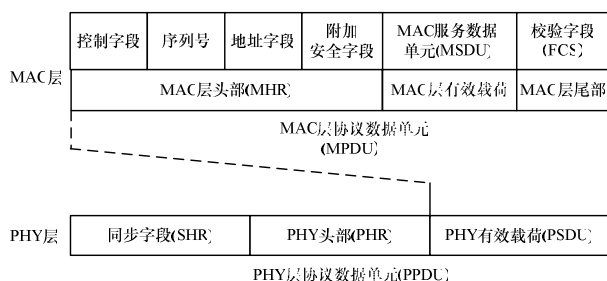


图2 PHY层和MAC层通用帧格式

PHY 层数据服务访问点(PD-SAP)提供对等 MAC 层实体之间的协议数据单元(MPDU)的传输, PD-SAP 支持 PD-DATA.request、PD-DATA.confirm 和 PD-DATA.indication 3 个原语。PD-DATA.request()是 MAC 层请求 PHY 层发送数据时发出的原语, PD-DATA.confirm()是 PHY 层向 MAC 层证实发送结果(如 RX_ON、TX_OFF、BUSY_TX 或 SUCCESS)时发出的原语, PD-DATA.indication()是 PHY 层收到 PHY 层服务数据单元(PSDU)并将其转交给 MAC 层时发出的, 语法结构为:

PD-DATA.indication(psdLength, psdu, ppduLinkQuality)

其中, psdLength 为 PHY 层收到的 PSDU 的字节数; psdu 为物理层服务数据单元的内容; ppduLinkQuality 为接收 PHY 层协议数据单元时 LQI 的测量值。LQI 是 0~255 的整数, 0 和 255 分别表示最差和最好的信号质量, LQI 至少有 8 个取值, 且在 0~255 之间均匀分布。

2.3 数据传输模式

本文的网络模型有 3 种数据传输模式: (1)数据由应用节

点传输到簇头节点; (2)数据由簇头节点传输到应用节点; (3)数据在簇头节点和基站之间转发。信标机制是降低通信系统复杂性和提高有噪信道下传输可靠性的有效手段, 因此, 3 种数据传输模式均支持信标机制和确认机制。

在第(1)种模式下, 当节点需要传输数据给簇头时, 先侦听网络信标, 找到信标后两者进行同步, 然后节点利用 CSMA-CA 择机发送数据, 簇头收到数据后反馈 ACK 信号, 见图 3。

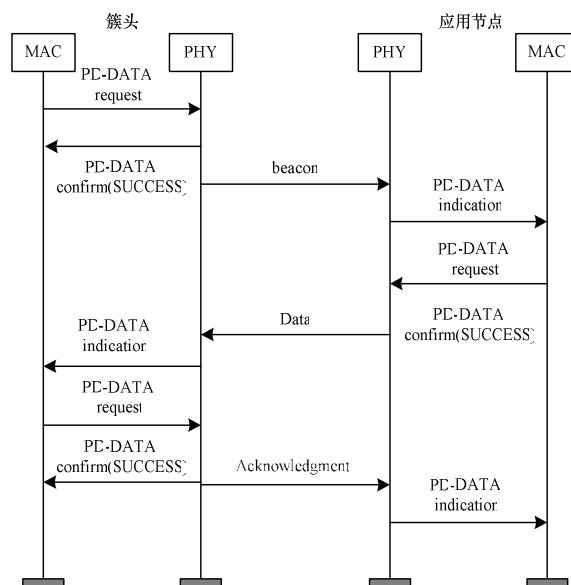


图3 节点至簇头数据传输模式

在第(2)种模式下, 当簇头需要传输数据给节点时, 它在网络信标中指明有数据需要节点接收, 节点周期性地扫描信标, 收到信标后, 节点向簇头发送数据请求, 簇头收到数据请求后反馈 ACK 信号并发送数据。

第(3)种模式与第(2)种模式相似, 此时, 接收方簇头执行模式(2)下应用节点的操作。

3 基于 LQI 的自适应差错控制方案

3.1 方案简介

在 3 种数据传输模式下, 无论簇头作为发送方还是接收方, 在数据(数据帧或命令帧)传输前都需要在簇头与节点之间传输一个信标帧(beacon), 信标的传输没有确认。在模式(1)下, 节点收到 beacon 后, PHY 层向 MAC 层发送 PD-DATA.indication 原语, 参数 psdu 为 beacon 帧的 MPDU, 参数 ppduLinkQuality 为当前信道质量测量值 LQI, LQI 还包含在 MLME-BEACON-NOTIFY.indication 原语中由 MAC 层提交给上层。在模式(2)和模式(3)下, 节点收到 beacon 后, 向簇头发送一个 Data Request, 簇头的 PHY 层向 MAC 层发送 PD-DATA.indication 原语, 参数 psdu 为 Data Request 帧的 MPDU, 参数 ppduLinkQuality 为当前信道质量测量值 LQI, LQI 将提交给上层。因此, 数据在发送至信道前, 发送方应用层可以获得当前信道的 LQI 值, 根据 LQI 值可预测误包率(基于 IEEE802.15.4 的通信系统以数据包为传输单位, 误包率能更精确地评估射频性能), 进一步选择最佳的 BCH 编码。

本文根据 LQI 非均匀地将信道质量分为 8 个等级, 即 $q=0, 1, \dots, 7$, q 值越小, 表示信道质量越差; 选择码率和纠错能力不同的 8 种 BCH 码, 且均为系统码, 并编号 $N=0, 1, \dots, 7$, N 越小, 纠错能力越强。 q 与 N 一一对应, 根据 q 选择 BCH 码。

3.2 编码过程

数据在发送方的编码过程如下:

(1)根据 beacon 帧或 Data Request 帧接收时 MAC 层获取的 LQI 值,划分信道质量等级(LQI 的划分是非均匀的,其原理将在第 4 节分析),见表 1。

表 1 q 与 LQI 的对应关系

LQI	0~74	75~146	147~152	153~168	169~224	225~242	243~248	249~255
q	0	1	2	3	4	5	6	7

(2)将 q 值填入 MPDU 的保留字段。图 4 所示 MAC 层协议数据单元(MPDU)的控制字段为 2 Byte,其中包括 3 bit 的保留字段。

bit	C~2	3	4	5	6	7~5	10~11	12~13	14~15
	帧类型	安全机制标记	Beacon 等待标记	确认机制标记	子网 ID	保留	目的地址模式	帧版本号	源地址模式

图 4 MPDU 控制字段格式

(3)对 MPDU 的 MAC 层头部(MHR)和 MAC 层有效载荷(MSDU)部分计算 CRC 校验值,作为 MPDU 的校验字段。

(4) $N=q$,选择编号为 N 的 BCH 码对 MPDU 的 MHR 和 MSDU 进行编码。

3.3 解码过程

数据在接收方的解码过程如下:

(1)PHY 层将有效载荷部分即 PSDU(MPDU)提交给 MAC 层。

(2)MAC 层从 BCH 系统码中提取出 MPDU 的 MHR 和 MSDU 部分,并根据校验字段校验其是否正确,如校验成功,则直接接受 MPDU,否则,表明数据有错误,转到第(3)步。

(3)从 MPDU 的保留字段中提取出 BCH 码的编号 N ,利用 Berlekamp-Massey 算法对相应的 BCH 系统码译码,恢复出 MHR 和 MSDU。

4 仿真实验结果及性能分析

Avrora 是一种专门为 AVR 单片机和基于 AVR 微处理器的传感器节点提供仿真分析的工具,也是 WSN 专用操作系统 TinyOS 常用的仿真平台,在 WSN 节点上执行的 TinyOS 程序可以直接编译成 Avrora 运行的字节码。其升级版本 AvroraZ 支持与 IEEE802.15.4 兼容的 CC2420 芯片,可计算 LQI,并增加了打印变量、802.15.4 监测数据格式化输出和 CC2420 电量检测等功能。

4.1 BCH 码的选择

选择合适的 BCH 码是实现自适应差错控制的关键,其方法是首先找出 LQI 值与误包率的关系,再根据误包率选取 BCH 码,为此,本文编写了 2 个简单的 TinyOS 程序分别加载到 2 个 micaz^[6]节点上,发送方程序的主要部分是一个 AMSend 接口,由 micaz 平台的 ActiveMessageC 组件提供,它以 10 s 的间隔向接收方发送 28 Byte 的数据包;接收方程序主要部分除了 Receive 接口外,还用到了 IEEE802.15.4 协议的 MACP_DATA 接口。由于在实体节点搭建的实验平台上无法定量控制信道参数,而 AvroraZ 仿真实验为此提供了方法,因此它通过配置拓扑文件的相关参数来模拟路径损耗、信道衰减、噪声和干扰等。

通过多次实验,本文得出了 LQI 值和误包率的关系,如图 5 所示。当误包率不大于 14.29%时($LQI \geq 169$),有多种 BCH 码可以满足纠错能力的要求,如(7, 4, 1)和(15, 5, 3),但(7, 4, 1)的码率为 57.14%,(15, 5, 3)的码率为 33.33%,用(7, 4,

1)编码更节省通信能耗;当误包率不大于 6.67%时($LQI \geq 225$), (15, 11, 1)的码率为 73.33%,相对于(7, 4, 1)更优,因此,当 $169 \leq LQI \leq 224$ 时,选择 BCH(7, 4, 1)纠错既可保证可靠性,又能获得最佳的能效。据此方法,本文选择了 8 种 BCH 码用于自适应差错控制方案,见表 2。

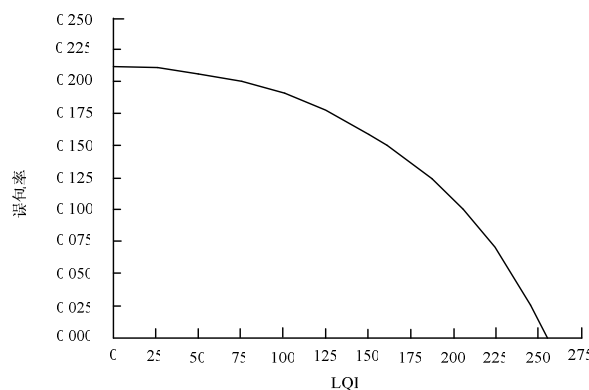


图 5 LQI 与误包率关系

表 2 q 与 BCH 码

q	码字 n /bit	消息 k /bit	纠错能力 t /bit
0	31	6	7
1	15	5	3
2	31	11	5
3	7	4	1
4	15	11	1
5	31	26	1
6	63	57	1
7	127	120	1

4.2 能效分析

文献[2]提出了用能量效率来衡量 WSN 差错控制协议的性能,该定义精确描述了 WSN 能耗的特点,被大多数研究者所接受,其数学表达式如下:

$$\eta = \eta_e r = E_{\text{eff}}(1 - P_{\text{PER}}) / E_{\text{total}}$$

其中, η_e 是能耗吞吐量,表示有效载荷的能耗 E_{eff} 占总能耗 E_{total} 的比例; $r = (1 - P_{\text{PER}})$ 是数据帧被正确接收的概率,描述了通信可靠性; η 描述传输有效载荷的能耗占总能耗的比例。

为评估方案的性能,本文在 AvroraZ 上模拟了一个小型子网的通信过程,其中,4 个应用节点不同步地以 15 s 为周期向簇头发送 28 Byte 的随机数据,设信道为功率随机变化加性高斯白噪声信道,分别用自适应差错控制方案、BCH(15, 5, 3)、BCH(7, 4, 1)、BCH(31, 26, 1)和 ARQ 作为纠错策略,在仿真时间为 750 s 时,5 种策略下的传输误包率对比如图 6 所示,其中,本文方案的误包率为 0,能效对比如图 7 所示。

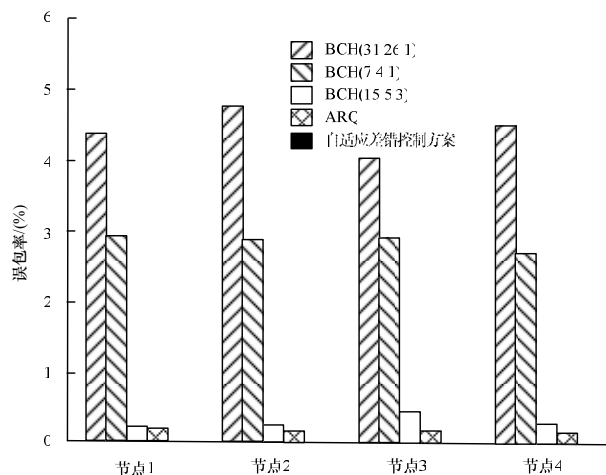


图 6 不同策略下的误包率对比

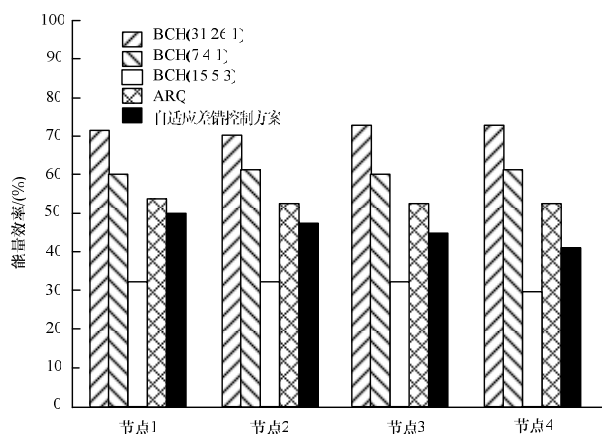


图7 不同策略下的能量效率对比

实验结果表明, 在同一信道中, 采用自适应差错控制方案作为纠错策略, 误包率几乎可以忽略不计, 而采用 BCH(31, 26, 1)作为单一纠错策略, 误包率最高, 这是因为 BCH(31, 26, 1)的纠错能力有限, 当信道质量较差时, 单位数据包的误码较多, BCH(31, 26, 1)没有能力纠正全部错误, 同理, BCH(7, 4, 1)和 BCH(15, 5, 3)纠错也存在一定的误包率, 但两者纠错能力比 BCH(31, 26, 1)强, 因此, 误包率相对较低。从能量效率上看, 自适应差错控制方案可根据信道质量选择最佳的纠错码, 所以, 最节省能量, 平均能量效率最高; BCH(31, 26, 1)的码率为 26/31, 即传输有效载荷的能耗占通信总能耗的 83.87%, 由于其造成的误包率较高, 因此平均能量效率较低; BCH(15, 5, 3)纠错能力较强, 误包率较低, 但其码率仅为 33.33%, 能量效率很低。

5 结束语

本文在对 IEEE802.15.4 协议深入研究的基础上, 结合 WSN 的特点, 通过大量的仿真实验, 找到了 LQI 和误包率之间的数量关系, 提出了基于 LQI 的自适应差错控制方案。该方案根据信道质量的改变, 自动选择最佳的 BCH 码作为数据包的纠错码, 既保证了误包率的降低, 又最大限度地节省了能量, 具有较高的能量效率。但是, 本文没有定量分析不同 BCH 码在 WSN 节点上译码的能量消耗, 这是下一步的工作重点。

参考文献

- [1] 姚志强, 尹俊勋. 无线城域网的前向差错控制方案[J]. 计算机工程, 2007, 33(15): 127-129.
- [2] Shih E. Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-efficient Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of ACM MOBICOM'01. Rome, Italy: ACM Press, 2001: 272-286.
- [3] Sankarasubramanian Y, Akyildiz I F, McLaughlin S W. Energy Efficiency Based Packet Size Optimization in Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of IEEE Int'l Workshop on Sensor Network Protocols and Applications. Anchorage, USA: IEEE Press, 2003.
- [4] IEEE. IEEE Std 802.15.4-2006 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs)[S]. 2006.
- [5] TinyOS Tutorials[EB/OL]. (2009-10-14). http://docs.tinyos.net/index.php/TinyOS_Tutorials.
- [6] Mica Z. Platform Data Sheet[EB/OL]. (2009-08-23). http://www.xbow.com/products/product_pdf_files/wireless_pdf/6020-0060-01-a_micaz.pdf.

编辑 张正兴

(上接第 60 页)

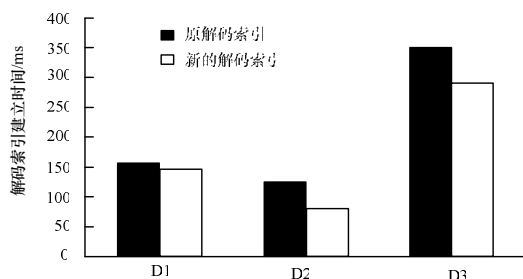


图6 解码索引性能比较

在 D1 中, 每个字符串重复出现的次数均介于 0 和 30 之间, 所以, 每个叶子出现的概率相近, 本文解码索引的查找时间是 157 ms, 而原解码索引的查找时间是 145 ms, 所以在字符串出现概率相近的情况下, 2 种解码索引差别不大; 在 D2 中, 每个字符串重复出现的次数在不同的区间内, 所以, 每个叶子出现的概率差距较大, 本文的解码索引将查找时间从 125 ms 降低到 80 ms, 将近 30% 的降幅充分表明其具有明显的优势。因此, 新的解码索引非常适用于那些字符串出现概率相差较大的情况, 即使在字符串出现概率相当的情况下, 也不会带来额外的开销。

5 结束语

本文针对文献[3]基于字典的保留顺序的字符串压缩方法, 在沿用其共用叶子的索引结构这一创新性的同时, 对其不足之处进行了改进, 降低了其内存消耗, 大幅减少了解码索引的查找时间, 从而提高了压缩方法的性能。下一步的研究重点是将该字符串压缩算法应用于列存储的数据仓库中。

参考文献

- [1] Stonebraker M, Abadi D, Batkin A, et al. C-store: A Column-oriented DBMS[C]//Proc. of the 31st International Conference on Very large Data Bases. Trondheim, Norway: [s. n.], 2005: 553-564.
- [2] Abadi D, Madden S, Ferreira M. Integrating Compression and Execution in Column-oriented Database Systems[C]//Proc. of ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Chicago, USA: ACM Press, 2006: 671-682.
- [3] Binnig C, Hildenbrand S, Faerber F. Dictionary-based Order-preserving String Compression for Main Memory Column Stores[C]//Proc. of ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. New York, USA: ACM Press, 2009.
- [4] Antoshkov G. Dictionary-based Order-preserving String Compression[J]. The VLDB Journal, 1995, 6(1): 26-39.
- [5] Goldstein J, Ramakrishnan R, Shaft U. Compressing Relations and Indexes[C]//Proc. of the 14th Int'l Conf. on Data Engineering. Orlando, USA: [s. n.], 1998: 370-379.
- [6] Bentley J, Sedgewick R. Fast Algorithms for Sorting and Searching Strings[C]//Proc. of SODA'97. [S. l.]: ACM Press, 1997: 360-369.
- [7] Bohannon P, McIlroy P, Rastogi R. Main-memory Index Structures with Fixed-size Partial Keys[C]//Proc. of ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. New York, USA: ACM Press, 2001: 163-174.
- [8] 贺智勇, 龙陈锋, 王桐森, 等. 传感器网络中层次簇模型的数据压缩算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(8): 105-107.

编辑 张帆

