

文章编号:1001-9081(2013)12-3453-04

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2013.12.3453

基于时间相关性的无线传感器网络数据压缩与优化算法

王 玲^{*}, 石为人, 石 欣, 宋宁博, 冉启可

(重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

(*通信作者电子邮箱 wang.ling.star@163.com)

摘要: 针对无线传感器网络(WSN)数据采集存在数据冗余度大、累积误差大和数据精度低等问题, 根据采集数据之间的时间相关性, 提出一种无线传感器网络数据压缩与优化算法。该算法通过分析时间序列中采集数据的线性关系, 建立分段一元线性回归模型; 根据采集数据与回归模型预测值之间的误差, 自适应地调整下一个采集时间, 并动态地优化回归模型。仿真结果表明该算法在不同的数据变化情况下, 均能降低数据冗余度和网络通信量, 提高采集数据的重构精度。最后在真实的无线传感器网络应用环境中验证了算法的可行性。

关键词: 无线传感器网络; 时间相关性; 时间序列; 一元线性回归; 网络通信量; 采集数据

中图分类号: TP393 文献标志码:A

Data compression and optimization algorithm for wireless sensor network based on temporal correlation

WANG Ling^{*}, SHI Weiren, SHI Xin, SONG Ningbo, RAN Qike

(School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Concerning to the problem that Wireless Sensor Network (WSN) data collection has large data redundancy, large cumulative error and low data accuracy, according to the temporal correlation between collection data, a data compression and optimization algorithm for WSN was proposed. It established segmented one-dimensional linear regression model by analyzing linear relationship of collection data in temporal series. According to the error between collection data and predicted value of regression model, it adaptively adjusted next collection time, and dynamically adjusted the regression model. The simulation results show that the proposed algorithm can reduce the data redundancy and network traffic, and improve the reconfiguration precision of the collection data under different conditions of data changes. The test results in a real scenario show the feasibility of the proposed algorithm.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); temporal correlation; temporal series; one-dimensional linear regression; network traffic; collection data

作为物联网的底层技术支撑, 无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)广泛应用于军事侦察、环境监测、医疗保健、公共安全和智能建筑等领域, 承担着数据感知、处理和传输的压力^[1]。对监测对象进行实时数据监测是WSN的一个非常重要的应用, 例如: 土壤湿度监测^[2]、气候监测和管道监测^[3]等。为了获取精确信息, WSN节点连续采集数据, 产生的海量数据对能量、存储能力和网络带宽均有限的WSN带来了巨大压力。因此, 重构精度高和数据量少是一对相互矛盾的性能指标。优化WSN采集数据算法, 在满足精度要求的同时降低数据量成为目前研究的重点之一。

1 相关工作

目前, 国内外已经有许多学者对WSN采集数据算法进行了研究。文献[4]提出的USAC(Utility-based Sensing And Communication)算法通过自主地改变置信区间来调整采样频率, 但是其规则性较强。ODLRST(One-Dimensional Linear Regression model based Spatial and Temporal)^[5]算法利用一元线性线性回归模型, 在单个节点处压缩感知数据, 消除时间冗

余。文献[6]提出了一种无线传感器网络中的数据回归建模算法, 通过节点之间的相互协作实现分布式网内数据处理。文献[7]从理论上提出了一个低复杂度的回归方法, 该方法适用于不同噪声和不同密度的无线传感器网络环境, 并且数据重构均方差低。文献[8]指出环境参数常呈现出分段线性的周期规律, 提出基于分段线性回归(Segment Linear Regression, SLR)算法来匹配监测量的变化趋势。

虽然上述研究工作对WSN采集数据算法研究起到了一定的推动作用, 但是WSN节点的采样频率不能根据采集数据的变化自适应优化, 仍然存在大量冗余数据, 因此需要进一步优化。

WSN节点在进行连续采样时, 采集数据按照时间顺序构成一个时间序列。通过时间序列分析发现, 由于物理现象的连续性, 同一节点一段时间内的采集数据之间具有较高的时间相关性^[9]。回归分析是研究因变量对自变量依赖关系的一种统计分析方法, 能够分析出时间序列中采集数据与时间之间的时间相关性。因此, 本文根据时间序列, 提出一种基于时间相关性的无线传感器网络数据压缩与优化算法

收稿日期:2013-06-18;修回日期:2013-08-26。

基金项目:国家科技支撑项目(2011BAJ03B13);国家科技重大专项(2009ZX07528-003-09);重庆市科技攻关项目(CSTC2012GG-YYJS40008)。

作者简介:王玲(1988-),女,重庆人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络智能感知、数据融合;石为人(1948-),男,重庆人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:智能信息处理、智能控制与智能感知;石欣(1978-),男,重庆人,副教授,博士,主要研究方向:无线传感器网络、智能系统与控制;宋宁博(1987-),男,河南郑州人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络均衡路由;冉启可(1987-),男,四川巴中人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络协作定位。

(Temporal Correlation Data Compression Protocol, TCDCP)。节点利用自身计算能力对采集数据时间相关性进行分析,建立分段一元线性回归模型,并实时自适应地调整节点的采集频率,动态地调整回归模型。针对采集数据具有周期性变化规律和时间相关性的应用环境,节点只需要传输少量数据就可以对原始感知数据进行逼近估计,大大减少了 WSN 节点间频繁的数据传输,提高了数据处理效率。仿真和真实实验验证了该算法的有效性。

2 TCDCP 算法

2.1 算法概述

随机部署在监测区域中的 WSN 节点感知、采集并传输的环境信息。由于感知数据具有周期性变化规律和时间相关性,因此可以看作是一个以采样时间 t 为自变量,其对应的感知数据 α 为因变量的分段线性函数关系。TCDCP 算法根据该特性,采用基于 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierachy)^[10] 的分簇结构,利用双预测模型^[11],即簇内节点和汇聚节点采用完全相同的模型进行数据预测。

算法主要分为三个阶段,其模型架构如图 1 所示。第一阶段根据时间序列中的采集数据建立一元线性回归模型;第二阶段使用自适应调整采样时间的思想,在感知数据满足该模型时,实时自适应地调整节点的采样频率;第三阶段根据监测数据的变化,反馈误差信息,实时调整回归预测模型。算法建立了数据量与数据精度的折中准则,从而在误差允许范围内有效地减少数据传输量,节省节点的能量。算法的相关参数及其含义如表 1 所示。

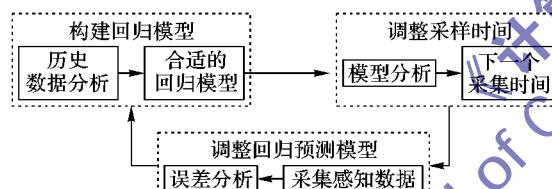


图 1 TCDCP 算法的模型框架

表 1 主要变量及其含义

变量名	变量含义
t	采样时间点
α	感知数据
α_t'	预测值
δ	预测误差 $\delta = \alpha_t' - \alpha_t $
ε	用户可接受的误差阈值
TS	时间序列 $TS = \{(t_1, \alpha_1), (t_2, \alpha_2), \dots, (t_n, \alpha_n)\}$, 其中, α_i 是 t_i 时刻的感知数据
n	TS 的长度
i	时间序列 TS 的成员数
T	采集周期
C	上传周期
$Flag$	当 $\delta < \varepsilon$ 时, $Flag = 1$; 反之, $Flag = 0$
M	一元线性回归模型
$Sink$	汇聚节点
CH_p	簇头节点

2.2 WSN 线性回归模型

由于监测数据可以用线性化的时间函数形式来表示,因此一元线性回归模型可以为其提供较好的数据预测。由于计算和存储能力有限,因此无线传感器网络节点采用一元线性回归模型中最常用、最简单的形式:

$$\alpha_t' = \beta_0 + \beta_1 t \quad (1)$$

其中: t 表示采集时间, β_0 表示该直线的截距, β_1 表示该直线的斜率, α_t' 表示采集时间 t 所对应的预测值。

该模型基于时间序列,WSN 节点以某个采样频率连续采集 n 个感知数据的集合存入时间序列中,即 $TS = \{(t_1, \alpha_1), (t_2, \alpha_2), \dots, (t_n, \alpha_n)\}$ 。此时间序列可看作是一个以采样时间 t 为自变量,以时间点对应的感知数据 α 为因变量的线性函数,根据最小二乘法可以拟合出一元线性回归模型中的参数

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(\alpha_i - \bar{\alpha})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (2)$$

通过式(2),可以进一步推出

$$\beta_0 = \bar{\alpha} - \beta_1 \bar{t} \quad (3)$$

记录此时的模型为 $M(\beta_0, \beta_1)$ 。感知数据沿时间轴依次分布于该回归线附近,因此预测下一个监测值也在该直线附近上下波动,如图 2 所示。通过 β_1 值的大小,可以判断数据变化率的大小。

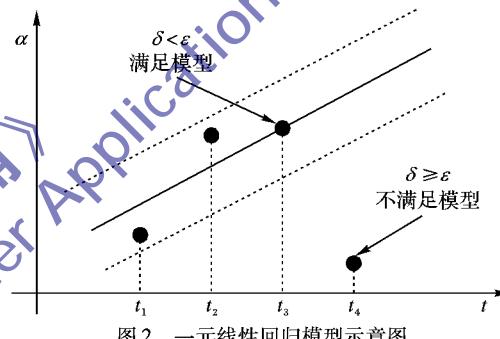


图 2 一元线性回归模型示意图

如果在某一时间段内 $\delta < \varepsilon$, 则说明该时间段内的 α_t 满足 M , WSN 节点不发送监测数据,大大降低了参与网内传输的数据量。并且,TCDCP 算法根据 M 的特点,自适应地调整下一个采集时间,从而降低了数据采集量。如果在某一时间段内 $\delta \geq \varepsilon$, 则说明 M 无法满足数据预测的需求,需要更新时间序列,对模型进行调整。

2.3 采集时间优化

当感知数据波动强烈时,WSN 节点应该减小下一个采集时间来获得对监测信息的准确描述;当感知数据变化缓慢或者在长时间内基本不发生变化时,WSN 节点应该增大下一个采集时间来减少冗余数据。针对上述问题,TCDCP 算法根据现有模型中 $|\beta_1|$ 与 ε 的大小关系,对 WSN 节点的采集时间进行了自适应优化,并在规定的上传周期 C 内强迫 WSN 节点采集一次数据并传输给 CH_p ,防止“哑节点”的产生^[12]。

假设现在时刻为 t_1 ,模型为 $M(\beta_0, \beta_1)$,误差阈值为 ε ,采集周期为 T ,上传周期为 C ,则采集时间优化的实现步骤如下所示:

步骤 1 比较 $|\beta_1|$ 与 ε :

①如果 $|\beta_1| > \varepsilon$, 则下一个采集时间 $t = t_1 + T$, 转步骤 2;

②如果 $|\beta_1| \leq \varepsilon$, 则下一个采集时间 $t = t_1 + \text{fix}\left(\frac{\varepsilon}{|\beta_1|}\right)$ 。

其中 $\text{fix}(x)$ 表示对 x 截尾取整,转步骤 2。

步骤 2 比较 t 与 C :

①如果 $t > t_1 + C$, 则下一个采集时间 $t = t_1 + C$;

②如果 $t \leq t_i + C$, 则下一个采集时间 t 不改变。

步骤 3 簇内节点进入休眠状态以减少能耗; 到达时刻 t 时, 簇内节点进入工作状态, 采集感知数据。

2.4 回归模型优化

随着数据采集的进行, α_t 有可能偏离 α'_t , 即 $\delta \geq \varepsilon$, 导致建立的一元线性回归模型无法再进行数据预测。针对该问题, TCDCP 算法根据 δ 与 ε 的大小关系, 实时动态更新时间序列和回归模型。

假设预测误差为 δ , 成员数为 i , 标志为 $Flag$, 误差阈值为 ε , 时间序列为 TS , 其长度为 n , 则回归模型优化的实现步骤如下所示:

步骤 1 采集感知数据 α_t , 判断 δ, i 和 $Flag$ 。

①如果 $i = 0, \delta < \varepsilon$, 则 $Flag = 1$, 转步骤 1;

②如果 $i = 0, \delta \geq \varepsilon$, 则 $Flag = 0, i = 1$, 转步骤 2;

③如果 $i \neq 0, Flag = 1, \delta < \varepsilon$, 则 $Flag = 1, i = i + 1$, 转步骤 2;

④如果 $i \neq 0, Flag = 0, \delta < \varepsilon$, 则 $Flag = 1, i = 1$, 转步骤 2;

⑤如果 $i \neq 0, Flag = 1, \delta \geq \varepsilon$, 则 $Flag = 0, i = 0$, 转步骤 2。

步骤 2 发送感知数据 α_t , 并将其存为 TS 的第 i 个成员, 转步骤 3。

步骤 3 判断成员数 i 。

①如果 $i = n$, 则 $i = 0$, 转步骤 4;

②如果 $i \neq n$, 转步骤 1。

步骤 4 运用最小二乘法, 根据 TS 中的采集数据和式(2)和式(3), 确定新模型 $M(\beta_0, \beta_1)$ 。

3 性能分析和仿真测试

3.1 性能分析

当模型需要调整时, TCDCP 算法中时间序列长度 n 决定了算法的存储复杂度, 即 $O(n)$; 根据算法的步骤, 其计算复杂度也为 $O(n)$; 当感知数据满足模型时, 不需要额外的存储空间, 其计算复杂度和存储复杂度均为 $O(1)$ 。因此, 算法总体复杂度为 $O(n)$ 。

由于在无线传感器网络数据采集应用中, 数据采集量和数据传输量小与平均绝对误差小是相互矛盾的性能指标, 因此构造如下模型评价算法性能(Ratio Of Error And Quantity, ROEAQ):

$$ROEAQ = ERR \times QTY \quad (4)$$

其中: ERR 表示感知数据与预测数据之间的平均绝对误差, QTY 表示数据采集量和数据传输量之和。 $ROEAQ$ 越小, 说明算法在数据量较小的情况下, 误差也较小。因此, 算法的总体性能主要与模型调整次数和 $ROEAQ$ 相关。

由于 TCDCP 算法主要对具有周期性变化规律和时间相关性的数据进行采集和处理, 适用于多种应用环境, 例如: 生态环境监测、土壤湿度监测和气候监测等, 因此其扩展性较强。

3.2 仿真测试

为了验证提出的 TCDCP 数据采集算法的可行性和有效性, 利用 Matlab 仿真实验平台对 SLR 算法和本文算法在模型调整次数、数据采集量、数据传输量和平均绝对误差这四个性能指标进行比较。同时, 搭建小型无线传感器网络监测系统, 测试算法对具有时间相关性的温度采样数据信息的预测估计精度^[13]。

3.2.1 仿真实验

由于 TCDCP 算法主要针对 WSN 节点的采样控制和数据处理, 不涉及网络拓扑等因素, 因此, 利用 Matlab 仿真工具能够有效地反映算法特性, 达到仿真实验的要求。仿真实验的数据来源为 Berkeley-Intel 研究小组部署的真实传感器网络监测的 1 号节点的 1 万个温度数据^[14], 仿真实验参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真实验参数设置

仿真参数	取值
时间序列长度 n	6
采集周期 T	1 min
上传周期 C	10
数据总量	10 000

图 3 为不同误差阈值 ε 下, 两种算法模型调整次数的对比。由图 3 可知, 随着误差阈值 ε 的增大, 模型调整次数逐渐减小, 但是 TCDCP 算法的模型调整次数较 SLR 算法少, 因此其算法复杂度较低。

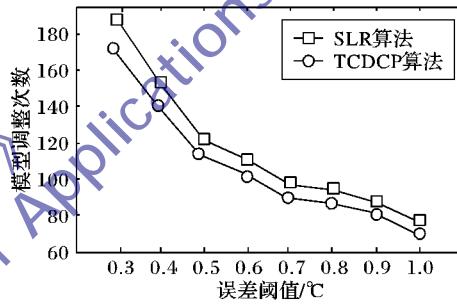


图 3 ε 对模型调整次数的影响

图 4 为不同误差阈值 ε 下, 两种算法的 $ROEAQ$ 的对比。由于 $ROEAQ$ 表示误差与数据量的乘积, 仅进行数值运算, 因此没有单位。

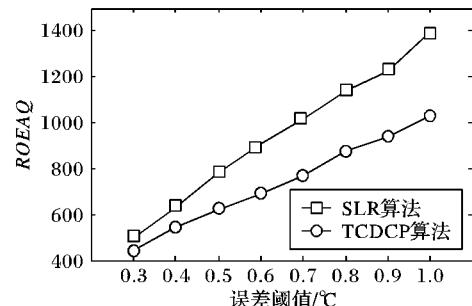


图 4 ε 对 $ROEAQ$ 的影响

仿真结果表明, SLR 算法和 TCDCP 算法随着误差阈值 ε 的增大, 数据采集量和数据传输量逐渐减小, 但是平均绝对误差逐渐增大。由于 TCDCP 算法在节点采样数据时采用了自适应调整采样时间的方法, 大大降低了数据采集量, 在数据传输量方面也优于 SLR 算法。因此, TCDCP 算法的 $ROEAQ$ 较 SLR 算法小, 总体性能优于 SLR 算法。用户可以在允许的误差范围内, 在采集值还原精度与数据采集量和数据传输量方面进行折中。

3.2.2 实验测试

本节实验测试是通过搭建真实的实验环境来测试算法的有效性。WSN 节点由低功耗片上系统 CC1110 芯片和 SHT11 传感器制作而成。SHT11 传感器主要负责温度采集, CC1110 芯片主要负责数据处理和无线传输。部署在房间中的 2 个簇内节点、一个簇头节点和一个 Sink 节点通过组网形成一个小型无线传感器网络, 监测房间的温度信息。

将 1 号节点 0:00 至 24:00 采集的温度信息作为原始数据,如图 5 所示。由图 5 可知,日气温变化趋势主要分为三种情况,即温度波动较大、温度变化趋势一致且变化率大和温度变化趋势一致且变化率小。因此,将本文算法植入 2 号节点中,对满足以上特点的 3 个时段的温度信息进行采集和分析。各个时段所对应时刻和温度变化特点如表 3 所示。节点采集周期 $T = 10 \text{ min}$, 共 25 个采样时间点, 时间序列长度 $n = 6$, 上传周期 $C = 10$ 。

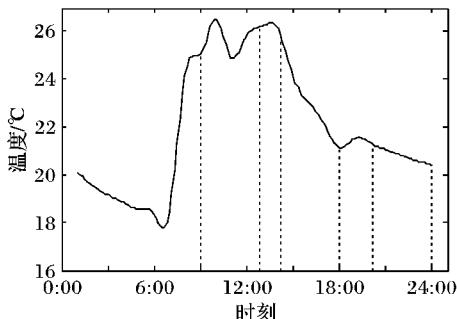


图 5 原始温度数据曲线

表 3 各个时段的时刻和温度变化特点

时段	起止时刻	变化特点
1	9:00—13:00	温度波动较大
2	14:00—18:00	温度降低较快
3	20:00—24:00	温度降低较慢

图 6~8 分别是 3 个时间段监测值与回归模型预测值的对比;表 4 为 3 个时间段采集数据量、传输数据量、模型调整次数和平均绝对误差的对比。

由图 6 和表 4 可知,时段 1 由于温度波动较大,回归模型调整次数增多以跟随温度变化,因此其数据采集量和数据传输量大;由图 7 和表 4 可知,时段 2 由于温度变化率大,采集时间间隔小,因此采集数据量较大,但由于感知数据满足回归模型,因此传输数据量较少;由图 8 和表 4 可知,时段 3 由于温度降低较慢,误差在允许的范围内逐渐增大,当超过设定的误差阈值时,则立刻调整模型,数据采集量和数据传输量均很小。综上可知,25 个采样时间点所得到的温度预测值能有效地体现各个时间段的温度变化趋势,说明 TCDCP 算法在采集数据波动较大、变化率大或者变化率小的情况下均适用,能快速跟随时采集数据的变化,实时自适应地做出相应的调整。

表 4 各个时段的性能指标对比表

时段	采集量	传输量	调整次数	平均绝对误差/°C
1	23	19	3	0.0581
2	19	13	2	0.0879
3	15	12	2	0.0486

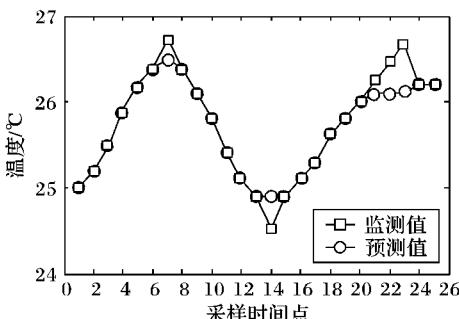


图 6 时段 1 温度波动大对比

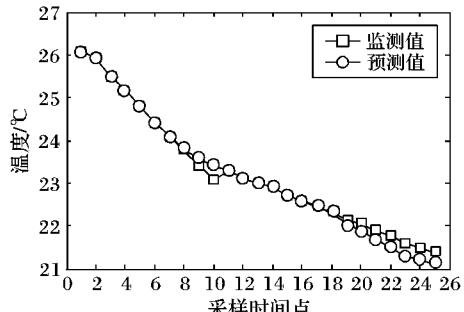


图 7 时段 2 温度降低快对比

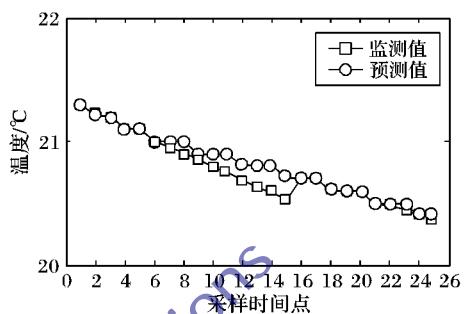


图 8 时段 3 温度降低慢对比

图 9 为各时段温度误差绝对值。随着采样时间间隔的增加,误差绝对值也随之增加,在模型更新的前一时刻达到最大值,但均没有超出相邻时刻的变化差值,满足实际的应用需求。因此,TCDCP 算法的预测效果比较理想。

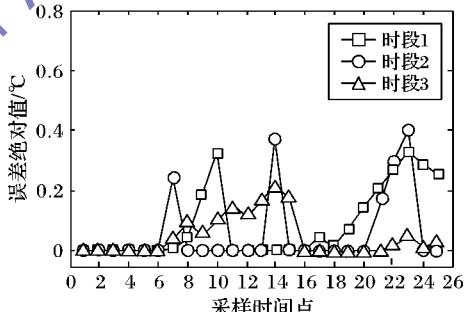


图 9 各时段温度误差绝对值

4 结语

本文针对现有 WSN 数据采集和压缩算法中存在的不足,充分利用 WSN 节点有限的计算能力,把采集数据的时间相关性和一元线性回归相融合,结合 LEACH 分簇的层次型网络拓扑结构和双预测模型,提出了一种基于时间相关性的 WSN 数据采集压缩与优化算法。在该算法中,簇头节点采集数据,应用采集数据在一定采样时间内的相关性,构建分段一元线性回归模型,并根据模型中数据的变化趋势,在允许的误差范围内优化下一次采集时间;当采集数据超出回归预测值的置信区间时,自适应地调整模型参数,降低误差。对 TCDCP 算法进行的性能分析和实验验证表明,该算法能有效地降低数据采集量和数据传输量,预测值与监测值之间的误差较低,体现了算法的可行性和能量高效性,适用于具有周期性变化规律和时间相关性的应用环境,扩展性较强。

这种数据采集和压缩算法是否能应用到其他协议中,或者在不同应用环境中是否受到较大影响等问题,还需要进一步研究。因此,下一步工作将继续深入研究一元线性回归模型的优化策略,针对不同应用环境和数据变化情况,进一步减少数据采集量和网络通信量,延长网络生存周期。

(下转第 3468 页)

MDFT 调制滤波器组的多载频调制系统有更好的 SER 性能,且在 SER 为 10^{-3} 时,系统性能增益提高了近 2 dB 左右。

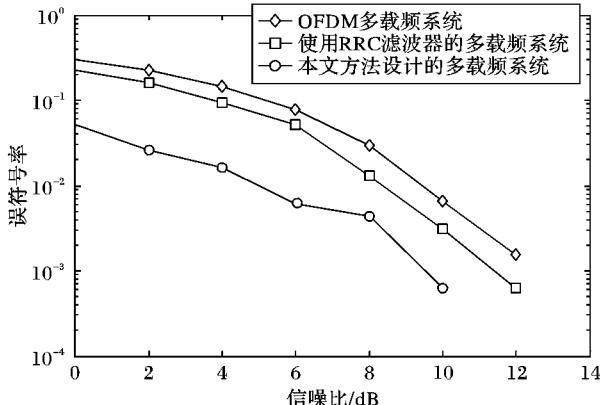


图 6 多载频调制系统的误符号率性能比较

4 结语

本文研究了一种改进窗函数方法设计基于改进 DFT 调制滤波器组的多载频调制系统。首先分析了改进 DFT 调制滤波器组完全重建条件,然后将系统的设计问题归结一个为无约束的目标函数优化问题。通过采用一种在理想窗函数过渡带内插样条函数的改进窗函数方法设计改进 DFT 调制滤波器组的原型滤波器,并采用线性优化方法优化目标函数。设计得到的多载频调制系统与传统的 OFDM 多载频调制系统相比在频率选择性和频谱泄露上有所提高,相同仿真环境下误符号率也有很大改善。另外该方法可以根据环境需要选择不同的窗函数和样条函数阶数设计系统的原型滤波器,提高了设计的自由度。

参考文献:

- [1] WANG G Y. Analysis of quantization errors in subband speech coding with modified DFT filter banks [J]. Signal Processing, 2006, 86(2): 341–352.
- [2] 陶然, 张惠云, 王越. 多抽样率数字信号处理理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 98–99.
- [3] FLIEGE N J. Multirate digital signal processing [M]. New York: Wiley, 1994: 171–172.
- [4] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 219–224.
- [5] WANG G Y. Time-varying discrete-time signal expansions as time-varying filter bank [J]. IET Signal Processing, 2009, 3(5): 353–367.
- [6] ZHANG Z J, YANG Y. Efficient iterative design of modified DFT filter banks [J]. Electronics Letters, 2011, 47(15): 846–847.
- [7] 蒋俊正, 周芳, 水鹏朗. 基于线性迭代的 DFT 调制滤波器组的设计算法[J]. 电路与系统学报, 2012, 17(1): 71–74.
- [8] BEAULIEU F D, CHAMPAGNE B. Design of prototype filters for perfect reconstruction DFT filter bank transceivers [J]. Signal Processing, 2009, 89(1): 87–98.
- [9] WU C Z, TEO K L. Design of discrete Fourier transform modulated filter bank with sharp transition band [J]. IET Signal Processing, 2011, 5(4): 433–440.
- [10] VIHOLAINEN A, IHALAINEN T, STITZ T H, et al. Prototype filter design for filter bank based multicarrier transmission [C]// EUSIPCO 2009: 17th European Signal Processing Conference. New York: Curran Associates, Inc, 2009: 1359–1363.
- [11] KUMAR A, SINGH G K, ANAND R S. An improved closed form design method for the cosine modulated filter banks using windowing technique [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(3): 3209–3217.
- [12] WANG G Y, ZHANG Z F, CHEN Q B. Analysis and properties of time-varying modified DFT filter banks [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010, 2010(6): 1–6.
- [13] KARP T, FLIEGE N J. Modified DFT filter banks with perfect reconstruction [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Analog and Digital Signal Processing, 1999, 46(11): 1404–1414.

(上接第 3456 页)

参考文献:

- [1] 赵继军, 魏忠诚, 李志华, 等. 无线传感器网络中多类型数据融合研究综述[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(8): 2811–2816.
- [2] 李珂, 吴晓培, 吴跃, 等. 用于土壤湿度测量的传感器网络动态采样策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(4): 338–342.
- [3] 余阳, 吴银锋, 于宁, 等. 网络寿命最优的管道监测传感网节点部署研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1): 20–28.
- [4] PADHY P, DASH R K, MARTINEZ K, et al. A utility-based sensing and communication model for a glacial sensor network [C]// AAMAS '06: Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. New York: ACM, 2003: 1353–1360.
- [5] 王雷春, 马传香. 传感器网络中一种基于一元线性回归模型的空间数据压缩算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 755–758.
- [6] GUESTRIN C, BODIK P, THIBAUT R, et al. Distributed regression: an efficient framework for modeling sensor network data [C]// IPSN 2004: Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Piscataway: IEEE, 2004: 1–10.
- [7] FERNANDES A L, RAGINSKY M, COLEMAN T P. A low-complexity universal scheme for rate-constrained distributed regression using a wireless sensor network [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(5): 1731–1744.
- [8] 王继良, 周四望, 唐辉, 等. 基于回归的无线传感器网络数据压缩方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(23): 96–98.
- [9] VURAN M C, AKAN Ö B, AKYILDIZ I F. Spatio-temporal corre-
- [10] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 3005–3014.
- [11] CHU D, DESHPANDE A, HELLERSTEIN J M, et al. Approximate data collection in sensor networks using probabilistic models [C]// ICDE 2006: Proceedings of the 22nd International Conference on Data Engineering. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 48–53.
- [12] VY V D, AN T H, NGHE V D, et al. Data reduction algorithms for wireless sensor networks in environment monitoring and warning applications [C]// CIMSIM '12: Proceedings of the 2012 Fourth International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2012: 416–421.
- [13] 宋欣, 王翠荣. 基于线性回归的无线传感器网络分布式数据采集优化策略[J]. 计算机学报, 2012, 35(3): 568–580.
- [14] Intel berkeley research lab. Intel lab data[DB/OL]. (2004–06–02) [2012–10–01]. <http://db.csail.mit.edu/labdata/labdata.html>.