

一种改进的瑞利小波算法无线传感器网络流媒体传输研究*

张天伍¹, 冯青², 马超阳²

(1. 河南工程学院 计算机科学与工程系, 郑州 451191; 2. 郑州大学 电气工程学院, 郑州 45001)

摘要: 针对无线传感器网络中带宽和能量受限、误码率高、信道不稳定等因素严重影响了实时流媒体传输的问题,采用瑞利小波模型模拟无线传感器网络流媒体通信,并给出概率分布和突发特性的分析模型,基于Kalman滤波器实时预测网络带宽,自适应地在SCTP与PR-SCTP之间进行切换。仿真实验表明,瑞利小波模型能够准确地描述实时流媒体通信流,Kalman滤波器可以准确地预测实时网络带宽,而且基于带宽预测的流媒体传输技术与原有的技术相比在分组成功投递率、端到端时延和吞吐率上均具有良好的性能。

关键词: 无线传感器网络; 瑞利小波; 流媒体; 卡尔曼滤波器

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)07-2618-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.059

Research of real-time media streaming transmission strategy based on improved Rayleigh for wireless sensor networks

ZHANG Tian-wu¹, FENG Qing², MA Chao-yang²

(1. Dept. of Computer Science & Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In wireless sensor network bandwidth and limited energy, high error rate, channel stability factor serious influence of real-time stream media transmission problem, this paper used Rayleigh wavelet model for the simulation of wireless sensor network streaming media communication and gave the probability distribution and the burst characteristics analysis model, on the basis of Kalman filter based on real-time prediction of network bandwidth, adaptively switched between SCTP and PR-SCTP. Simulation results show that, the Rayleigh wavelet model can describe accurately the real-time stream media communication flow, Kalman filter can accurately predict the real-time network bandwidth, and bandwidth prediction based on streaming media transmission technology compared with the prior art in the packet delivery ratio, end-to-end delay and throughput have good performance.

Key words: wireless sensor networks; Rayleigh wavelet; media streaming; Kalman filter

0 引言

随着无线传感器网络^[1]、流媒体通信技术^[2]、多媒体信息采集和处理技术^[3]的发展,而且通过流媒体技术,接收端不需要下载全部的多媒体信息,就可以边接收数据流边播放,缩减系统响应时间同时接收端不必设置太大的缓存区^[4]。因此如何在无线传感器网络上实现实时流媒体数据传输得到国内外学者的广泛关注^[5]。

文献[6]分析了一个轻量级的部分可靠覆盖的视频组播业务的移动终端。文献[7]研究了一种自适应Kalman滤波的心电信号增强技术。文献[8]设计了一种硬件结构,可以实现瑞利和莱斯变量发生器功能。但是以上研究结果仍存在一些不足,没有针对无线传感器网络流媒体通信建立分析模型,进而建立一种预测机制;而且忽略了流媒体数据在无线传感器网络上传输的控制问题。

因此,在传统SCTP^[5]和PR-SCTP(SCTP partial reliability extension)^[6]基础上,提出了一种适用于无线传感器网络的基于Rayleigh小波和Kalman滤波带宽预测的实时流媒体传输控制技术。该技术基于Rayleigh小波分析流媒体通信流特性,在此基础上采用Kalman滤波实现带宽预测,与带宽门限值进行比对从而在传统SCTP与PR-SCTP之间实现自适应切换,为无线传感器网络上的流媒体通信提供可靠的、高吞吐率和短时延的有效保障。

1 Rayleigh小波和Kalman滤波数学模型

1.1 基于Rayleigh小波的流媒体通信分析

假设无线传感器网络中实时流媒体通信随机过程 $y(t)$ 的正交小波变换如式(1)和(2)所示。

$$y(t) = \sum_{r=0s}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} C_r^s K_r^s(t) \quad (1)$$

收稿日期: 2011-11-08; **修回日期:** 2011-12-09 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60974005);河南省教育厅自然科学基金资助项目(2010B510019)

作者简介: 张天伍(1973-),男,河南新乡人,讲师,硕士,主要研究方向为计算机网络与人工智能(henantianwuzhang@163.com);冯青(1967-),男,浙江嘉兴人,教授,硕导,博士,主要研究方向为智能控制理;马超阳(1986-),男,河南郑州人,硕士研究生,主要研究方向为智能控制理论与应用。

$$C_r^s = \int_0^\infty y(t) N_r^s(t) dt \quad (2)$$

其中:母小波 $N(t)$ 经伸缩和平移可得到正交小波基函数 $K_r^s(t)$ 为

$$K_r^s(t) = 2^{s/2} N(2^s t - r) \quad (3)$$

$y(t)$ 具有功率谱为

$$S_x(\zeta) = k^2 \sum_{r=0}^\infty 2^{-s} |N(2^{-s}\zeta)|^2 \quad (4)$$

其中: $S_x(\zeta)$ 存在如式(5)所示的关系。

$$S_j^2 / \|\zeta\|^r \leq S_o(\zeta) \leq \psi^2 u^* \|\zeta\|^k \quad (5)$$

根据式(6)~(8)对 Rayleigh 分布流媒体通信流通过选择小波基和系数同时展开保留足够多项式,保证无线数据传输功率谱能够接近幂律并满足式(9)所示的功率谱幂律随机关系。

$$\Delta^d = (1 - B)^d = \sum_{k=0}^\infty C_d^k - (-B)^k \quad (6)$$

$$C_d^k = \Gamma(d+1) / (\Gamma(d-k+1)\Gamma(k+1)) \quad (7)$$

$$W_{j,k} = F_j^{-1}(N_j(x_{j,k})) \quad (8)$$

$$K_k = P_k^{-1} H^T (HP_k^{-1} H^T + R)^{-1} \quad (9)$$

应用于无线传感器网络实时流媒体通信流预测的 Rayleigh 小波模型可以采用伸缩或平移运算对无线信号进行多尺度分析。针对无线传感器发送信号使得小波变换系数在各个尺度下保持独立,可以很好地模拟流媒体通信过程。

2.2 基于 Kalman 滤波的带宽预测算法

Kalman 滤波器是把状态空间的概念引入到随机估计理论中,视信号过程为白噪声作用下的线性系统输出,用状态方程描述输入—输出关系,估计过程中利用系统状态方程、观测方程和白噪声激励的系统特征形成滤波算法。Kalman 滤波器实质上是一组方程,实现预测—校正模式的预测器^[9],使预测值的协方差最小化。

因此,基于 Rayleigh 小波模型描述的无线传感器网络通信流分布特性,采用 Kalman 滤波器预测网络带宽的工作流程如下:

a)由式(10)建立线性随机差分离散时间控制过程的状态。

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (10)$$

其中流媒体通信数据监测值 $z \in R^m$ 如下:

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (11)$$

b)假定随机过程噪声 w_k 和测量噪声 v_k 为彼此独立无关的白噪声,并且具有如式(12)所示的正态分布。实际网络通信中,过程噪声协方差矩阵 Q 和测量噪声协方差矩阵 R 可能随时间或测量而改变,但这里假定是常量。

$$p(w) \sim N(0, Q) \quad (12)$$

c)如果没有驱动函数和过程噪声,步骤 a)中的随机流量模型的前一时刻 $k-l$ 状态与当前时刻 k 的状态相互关联。实际无线传感器网络通信中该关联性可能随时间变化,但这里假定为常量。

d)先验预测误差和后验预测误差定义如式(13)和(14)所示。

$$\hat{e}_k^- \equiv x_k - \hat{x}_k^- \quad (13)$$

$$\hat{e}_k^+ \equiv x_k - \hat{x}_k^+ \quad (14)$$

同时满足如式(15)和(16)所示关系。

$$P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}] \quad (15)$$

$$P_k = E[e_k e_k^T] \quad (16)$$

e)测量残差 $z_k - H\hat{x}_k^+$ 用于衡量预测测量值 $H\hat{x}_k^+$ 与实际测量值 z_k 误差。

f)后验预测协方差最小化的增益因子 K 通过如式(17)所示的方法进行最小化操作。

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} = \frac{P_k^- H^T}{HP_k^- H^T + R} \quad (17)$$

g)根据式(10)~(17)结合 Rayleigh 小波的无线传感器网络流媒体通信流,进行递归优化操作。

h)先验预测值 \hat{x}_k^- 对于所有先验测量值 z_k 的条件概率根据 Kalman 滤波器实施如式(18)所示的维护操作可得到实时网络带宽预测值如式(19)所示。

$$E[x_k] = \hat{x}_k \quad (18)$$

$$E[(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T] = P_k \quad (19)$$

2 基于带宽预测的流媒体传输控制技术

根据文献[9,10]分析结果,可知用 SCTP 和 PRSCTP 在无线传感器网络中传输实时流媒体数据时各有优缺点,分别适用于不同带宽的无线网络,因此基于第 1 章建立的带宽预测模型充分利用 SCTP 和 PRSCTP 的优点,提出了一种基于 Rayleigh 小波和 Kalman 滤波器的带宽预测的无线传感器网络实时流媒体传输技术(RK-SCTP)。

该传输技术工作流程描述如下:

a)采用 Rayleigh 小波和 Kalman 滤波器实时分析并预测到无线传感器网络的流媒体数据发送节点到接收节点之间端到端的可用带宽,基于此在 SCTP 和 PRSCTP 之间进行传输策略切换。

b)当可用带宽预测值低于设置的带宽门限值时,自适应切换到 PRSCTP 传输方案,降低流媒体数据发送速率从而降低拥塞概率。

c)当可用带宽预测值高于带宽门限值时,自适应切换到 SCTP 方案,增大数据发送速率从而改善数据包正确接收概率和端到端传输时延,并有效平滑时延抖动。

3 实验分析

本章采用 NS-2 仿真实验针对如图 1 所示的无线传感器网络拓扑,在 $n0$ 节点上发送 3 600 s 的视频数据到 $n50$ 节点,然后使用 MATLAB 工具数学分析验证基于 Rayleigh 小波和 Kalman 滤波器的带宽预测算法性能;之后通过数学分析进一步对比在无线传感器网络中,本文所提出的基于带宽预测的流媒体传输技术与传统的 SCTP 和 PRSCTP 在分组成功投递率、端到端时延和吞吐率等方面性能如图 2~6 所示。仿真实验和数学分析相关参数如表 1 所示。

表 1 参数设置

名称	数值
仿真时间	3 600 s
网络拓扑	1 000 m × 1 000 m
传感器节点辐射半径	200 m
传感器节点个数	100 个
流媒体数据类型	MPEG-4
接收灵敏度	85
节点移动模型	随机
移动节点停止时间	1 s
节点最大移动速度	20 m/s
MAC 层协议	IEEE 802.15.4
路由协议	DSR
移动节点数	20

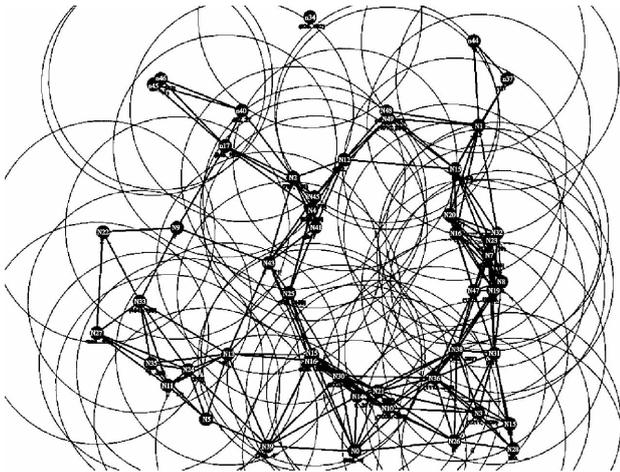


图1 无线传感器网络拓扑

图 2 给出了 Rayleigh 小波模拟流媒体通信流数据序列自相关系数变化趋势,可以看出该曲线呈现出双曲线衰减趋势,符合无线传感器网络多媒体通信流特性。基于 Rayleigh 小波和 Kalman 滤波器的带宽预测算法的预测值与实验统计值的误差对比趋势如图 3 所示。可以看出,在 1 000 s 之前因为无线传感器网络处于自组织初始化阶段,带宽变化较大,带宽利用率较低,因此预测误差较大;但是从 1 500 s 开始流媒体可用带宽利用率较高,预测精度有明显提高。综合图 2 和 3 表明,基于 Rayleigh 小波和 Kalman 滤波器预测算法适用于无线传感器网络流媒体数据传输。

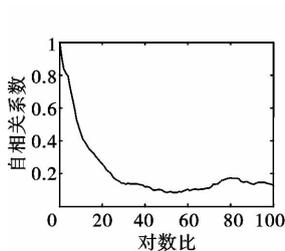


图2 Rayleigh小波模拟流媒体通信流

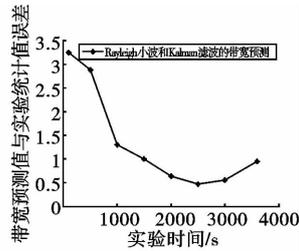


图3 带宽预测值与实验统计值误差

基于 Rayleigh 小波和 Kalman 滤波器带宽预测的流媒体传输控制技术 RK-SCTP 在分组成功投递率、端到端平均时延和吞吐量等性能上与传统的 SCTP 与 PRSCTP 对比结果如图 4 ~ 6 所示。可以看出,RK-SCTP 根据当前无线传感器网络实时带宽在 SCTP 和 PRSCTP 之间实现自适应切换,有效地提高了流媒体数据包的成功投递率,大大缩短了流媒体数据发送节点与接收节点之间的端到端平均时延;同时保证了较大的网络吞吐量。

4 结束语

本文针对无线传感器网络实时流媒体数据传输控制过程中难以实现高速率、高能效和短时延的问题,提出一种基于 Rayleigh 小波和 Kalman 滤波器带宽预测的流媒体数据传输自适应控制技术。该技术基于 Rayleigh 小波理论建立流媒体通信流模拟算法,用于预测实时流媒体数据传输速率和吞吐量;并建立基于 Kalman 滤波器的带宽预测模型,根据实时可用带宽自适应切换传统的 SCTP 和 PRSCTP 流媒体传输控制方案。数学分析和仿真实验表明,基于带宽预测的自适应无线传感器网络实时流媒体传输控制技术能够有效改善无线传感网通信性能,优化多媒体数据发送模式,提高数据包成功接收概率,增

大吞吐量和缩短端到端时延。

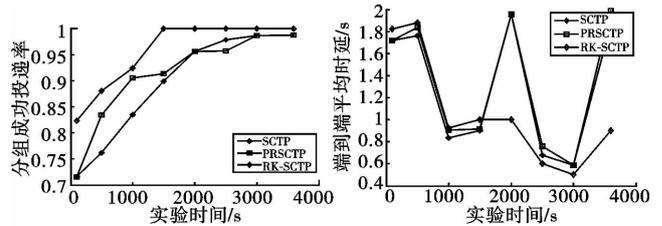


图4 分组成功投递率

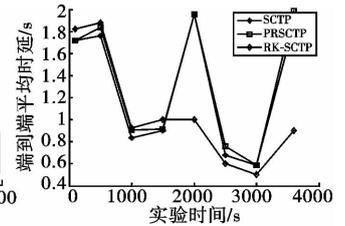


图5 端到端平均时延

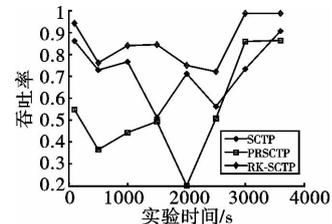


图6 吞吐量对比

参考文献:

- [1] SATHISH S, MARTIN R W. Quantitative imaging of Rayleigh wave velocity with a scanning acoustic microscope[J]. IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2002, 49(5): 550-557.
- [2] CHEN Yun-xia, TELLAMBURA C. Infinite series representations of the trivariate and quadrivariate Rayleigh distribution and their applications[J]. IEEE Trans on Communications, 2005, 53(12): 2092-2101.
- [3] MA Ning, BOUCHARD M, GOUBRAN R A. Speech enhancement using a masking threshold constrained Kalman filter and its heuristic implementations[J]. IEEE Trans on Audio, Speech, and Language Processing, 2006, 14(1): 19-32.
- [4] VIKAS G, DEEPAK N. n-Rayleigh distribution in mobile computing over flat-fading channel [C]//Proc of International Conference on Methods and Models in Computer Science. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 1-3.
- [5] CUI Lin, KOH S J, LEE W J. Fast selective ACK scheme for throughput enhancement of multi-homed SCTP hosts[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(6): 587-589.
- [6] JINSUK B, FISHER P S, MINHO J, et al. A lightweight SCTP for partially reliable overlay video multicast service for mobile terminals [J]. IEEE Trans on Multimedia, 2010, 12(7): 754-766.
- [7] VULLINGS R, De VRIES B, BERGMANS J W M. An adaptive Kalman filter for ECG signal enhancement[J]. IEEE Trans on Biomedical Engineering, 2011, 58(4): 1094-1103.
- [8] ALIMOHAMMAD A, FARD S F, COCKBURN B F. Hardware implementation of Rayleigh and ricean variate generators[J]. IEEE Trans on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2011, 19(8): 1495-1499.
- [9] XU Chang-qiao, FALLON E, QIAO Yuan-song, et al. performance evaluation of multimedia content distribution over multi-homed wireless networks[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2011, 57(2): 204-215.
- [10] HWANG J H, YOO C. Formula-based TCP throughput prediction with available bandwidth[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(4): 363-365.