

一种改进的低时延无线传感器网络 MAC 协议

周璟

(无锡工艺职业技术学院 电子信息系, 江苏 宜兴 214206)

摘要:针对无线传感器网络 IEEE 802.15.4 MAC 协议存在传输时延高的问题,在现有低能耗机制 LE-MAC(low-energy MAC)的基础上,提出一种具有低时延特征的新机制 LD-MAC(low-delay MAC).该机制通过改进 CCA 检测的次数来达到降低时延的目的,在站点竞争窗口成功退避到 0 后,进行第 1 次 CCA 空闲检测,若发现信道空闲,则直接发送数据.采用二维 Markov 链模型对改进机制的性能进行理论分析,实验结果表明,LD-MAC 只需轻微增加能耗,就能有效地降低传输时延,并且提高信道接入概率和网络吞吐量.

关键词:IEEE 802.15.4;Markov 链模型;低时延;MAC 协议

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.04.019

An improved low-delay MAC protocol for WSNs

ZHOU Jing

(Department of Electronic Information, Wuxi Institute of Arts & Technology, Yixing 214206, China)

Abstract: Aiming at the problem that IEEE 802.15.4 MAC protocols in wireless sensor networks had high delivery latency, an improved low-delay MAC mechanism LD-MAC based on the existing LE-MAC protocol was proposed. The protocol reduced the delivery latency by improving the number of CCA. When the back-off counter reached zero, the node performed carrier sensing that consisted of clear channel assessment (CCA) for the next CW consecutive backoff slots. If the channel was sensed idle during the first CCA, the node transmitted the data directly. The properties of the improved mechanism were analyzed theoretically by using two-dimensional Markov chain model. The simulation results showed that LD-MAC not only reduced the delivery latency but also improved the throughput significantly by only increasing energy consumption slightly.

Key words: IEEE 802.15.4; Markov chain model; low-delay; MAC protocol

0 引言

近年来,无线传感器网络 WSN(wireless sensor network)在国防军事、管理交通、反恐维和、预测灾害等对数据传输质量有较高要求的领域具有广阔的应用前景,其巨大的科学研究意义和工业应用价值已经引起了学术界和工业界的广泛关注^[1].数据

链路层介质访问控制 MAC(media access control)子层位于传感器网络通信协议栈的底层,决定如何在节点之间分配有限的通信资源,对整个网络系统有着不可替代的作用^[1].而 IEEE 802.15.4 协议作为无线传感网络中比较成熟的 MAC 协议,主要采用二进制退避指数算法来解决碰撞冲突问题.研究表明该算法在网络活跃节点数较多或者数据传输率

收稿日期:2014-03-25

作者简介:周璟(1981—),男,江苏省宜兴市人,无锡工艺职业技术学院助教,主要研究方向为无线传感器网络、网络性能分析与评价.

较高等情况下会导致比较高的碰撞冲突概率,从而影响该标准的整体性能,因此对其性能算法的分析和改进一直是无线传感网络领域的一个研究热点^[2].

C. Bianchi 提出了一个针对 IEEE 802.11 CSMA 机制的 Markov 链模型,该模型在 IEEE 802.15.4 协议中得到了广泛的应用,于是大量学者展开了对于 Markov 链模型的研究^[3-6].文献[4]在文献[3]的基础上提出了乘性递增线性递减算法.该算法虽然达到了减少碰撞冲突,提高网络吞吐量的目的,但是会增加传输时延.文献[5]提出了基于历史的自适应回退低能耗算法.根据网络的当前状态控制竞争窗口的大小,该算法能有效地降低节点间的冲突概率和网络能耗,但是网络传输时延还是没有得到改善.

这些学者在使用 Markov 链建模方法对 IEEE 802.15.4 MAC 协议的研究中都做出了许多有意义的工作,但模型及其分析还需要进一步地改进和完善.因此为满足服务质量尤其是时延方面的要求,本文在 LE-MAC^[5]协议的基础上,提出一种具有低时延特征的 IEEE 802.15.4 MAC 机制 LD-MAC (low-delay MAC),以期在保证原 LE-MAC 机制能耗水平的基础上,显著降低传输时延,提高网络吞吐量和网络服务质量.

1 LD-MAC 机制研究

1.1 LD-MAC 的设计思想

本文对非饱和网络状态下的 LE-MAC^[5]机制进行了深入分析,发现 IEEE 802.15.4 退避过程的特点.图 1 为 LE-MAC 接入机制流程图,可以看出,当节点的竞争窗口退避到 0 时,执行第 1 次空闲信道评估 CCA (clear channel assessment) 操作,检测信道是否空闲.若信道空闲,还要进行第 2 次空闲信道评估.若信道再次空闲,节点发送数据包.如果检测到信道忙,就要推迟发送数据包,并且增大竞争窗口,进入下一阶段的退避过程.

从以上分析可以看出,由于 IEEE 802.15.4 基本接入机制独特的退避过程,当信道进行第 1 次 CCA 检测的时候,发现信道空闲,不会立即发送数据包,这时候如果信道中节点都处于退避状态,也就是没有任何数据包要发送,就会错失发送数据包的最佳时机,降低节点的接入概率,极大地浪费了信道带宽.

采用二次 CCA 检测机制,虽然在一定程度上能

避免节点间的冲突碰撞,但是当网络中要发送数据包的节点数量比较多时,节点的接入概率和网络的吞吐量都呈现急剧下降的趋势^[2].

因此新机制 LD-MAC 的基本思想是在站点竞争窗口成功退避到 0 后,进行第 1 次 CCA 空闲检测,如果发现信道空闲,直接发送数据.

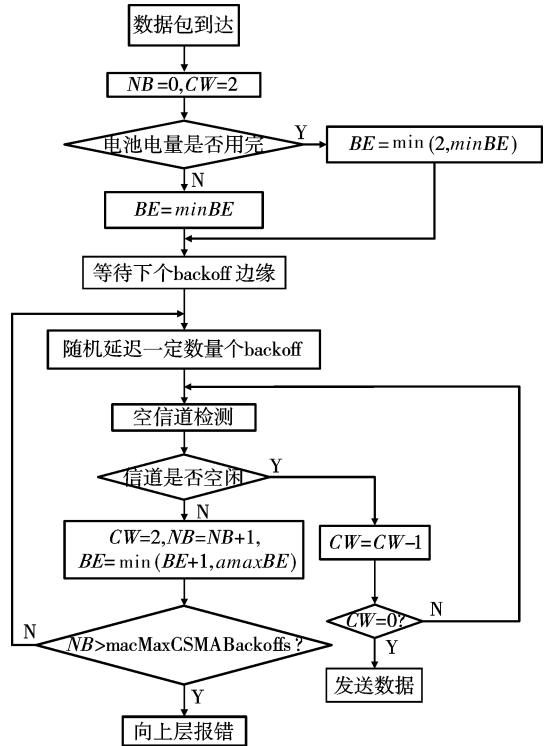


图 1 LE-MAC 接入机制流程图

1.2 LD-MAC 的 Markov 链模型

文献[2]首次推导出了理想信道下 IEEE 802.15.4 MAC 机制的 Markov 链分析模型.本文使用该模型进行类似分析,推导出非饱和状态下 IEEE 802.15.4 机制的饱和吞吐量、传输时延、传输能耗等表达式.在此基础上分析该协议的有效性.

本节通过建立 Markov 链模型来对数据流进行分析与建模.为了方便分析,做如下假设: 1) n 个终端竞争同一无线信道,并且信道处于非饱和状态; 2) 信道理想并且无隐藏终端问题; 3) 整个网络由 1 台网络协调器和 $n-1$ 台传感器节点组成^[1].

为了研究方便,用 W_0 表示数据的初始竞争窗口大小,用 $S(t)$ 表示设备在 t 时刻所处的退避阶段的随机过程,用 $B(t)$ 表示特定设备在 t 时刻所处的退避计数器值的随机过程,用 m 表示退避次数 (NB) 的最大值,第 i 退避阶段竞争窗口的大小为

$$W_i = 2^{\min(j, \text{amaxBE} - \text{minBE})} W_0 \quad W_0 = 2^{\text{minBE}}$$

传输数据流的节点的状态用 $|j, k\rangle$ 表示,其中, j

表示节点当前退避阶段, k 表示节点还要退避的时隙个数, G 为数据包的长度 (用时隙作为度量单位). 本文假设 α_0 表示当节点退避到 0 时进行第 1 次 CCA 检测并且信道为忙的概率, q_1 代表一次成功传输后站点中没有数据包要传输的概率, q_2 代表在一个空闲时隙后没有数据包要传输的概率. 由此可以得出 LD-MAC 机制的 Markov 链模型 (如图 2 所示).

最大退避阶段. 由 Markov 链的相关性质, 对于数据流可以得到

$$b_{j,0} = \alpha_0 b_{j-1,0} \quad j \in (1, m) \quad (1)$$

由公式 (1) 及 Markov 链模型可得

$$b_{j,0} = \alpha_0^j b_{0,0} \quad (2)$$

由 Markov 链的归一化条件可以得到

$$b_{j,k} = \frac{W_j - k}{W_j} b_{j,0} \quad j \in (0, m), k \in (0, W_j - 1) \quad (3)$$

$$b_{-2,0} = \dots = b_{-2,G-1} = (1 - \alpha_0) \sum_{j=0}^m b_{j,0} \quad (4)$$

$$b_{-1,0} = \frac{q_1}{1 - q_2} b_{0,0} \quad (5)$$

由 Markov 链性质可知, 图 2 中所有状态总和为 1, 可得出如下关系式:

$$1 = b_{-1,0} + \sum_{k=0}^{G-1} b_{-2,k} + \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{W_j-1} b_{j,k} \quad (6)$$

把公式 (2)~(5) 带入公式 (6) 可得

$$b_{0,0} = \frac{2(1 - q_2)(1 - 2\alpha_0)(1 - \alpha_0)}{2^{minBE} (1 - q_2)(1 - \alpha_0) [(1 - (2\alpha_0)^{m+1})] + p'} \quad (7)$$

其中

$$p' = (1 - q_2)(1 - 2\alpha_0)(3 - \alpha_0)(1 - \alpha_0^{m+1}) + 2q_1(1 - 2\alpha_0)(1 - \alpha_0) + 2G(1 - q_2)(1 - 2\alpha_0)(1 - \alpha_0)(1 - \alpha_0^{m+1}) \quad (8)$$

由前面分析可知, 节点只进行 1 次 CCA 检测, 如果发现信道空闲就发送数据包, 因此, 在一个随机选择的时隙内进行 1 次 CCA 检测的概率为

$$\omega_0 = \sum_{j=0}^m b_{j,0} = \sum_{j=0}^m \alpha_0^j b_{0,0} = \frac{1 - \alpha_0^{m+1}}{(1 - \alpha_0) b_{0,0}} \quad (9)$$

根据式 (9) 可以推出, 节点在执行 1 次 CCA 检测信道为空闲状态后发送数据流的概率

$$\gamma = (1 - \alpha_0^{m+1}) b_{0,0} \quad (10)$$

则节点在执行 1 次 CCA 时检测到信道忙的概率

$$\alpha_0 = 1 - (1 - \gamma)^{n-1} \quad (11)$$

1.3 非饱和状态分析

在非饱和状态下, 站点只有在上层有数据包到达的情况下才发送数据. 本文假设数据包到达服从到达率为 λ 的泊松过程, 基于泊松分布可以得到一次成功传输后站点中没有数据包要传输的概率 q_1 和在一个空闲时隙后没有数据包要传输的概率 q_2 的值分别为

$$\begin{cases} q_2 = e^{-\lambda T_s} \\ q_1 = e^{-\lambda w} \end{cases} \quad (12)$$

其中, T_s 是数据包成功传输所需的时间, w 是节点退

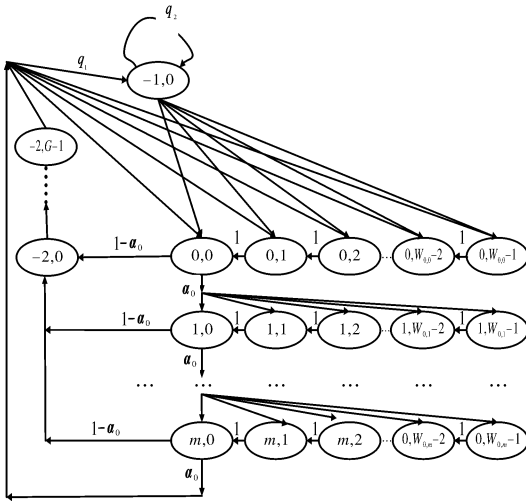


图 2 LD-MAC 机制的 Markov 链模型

根据 Markov 链的规则, 可以得出数据流的单步转移概率如下:

$$\begin{cases} p\{j, k | k + 1\} = 1 \\ j \in (0, m), k \in (0, W_{0,j} - 2) \\ p\{-2, 0 | j, 0\} = 1 - \alpha_0 \quad j \in (0, m) \\ p\{j, k | j - 1, 0\} = \alpha_0 / W_{0,j} \\ j \in (1, m), k \in (0, W_{0,j} - 1) \\ p\{-2, k + 1 | -2, k\} = 1 \\ k \in (0, G - 2) \\ p\{0, k | -2, G - 1\} = (1 - q_1) / W_0 \\ k \in (0, W_0 - 1) \\ p\{-1, 0 | -2, G - 1\} = q_1 \\ p\{0, k | m, 0\} = \alpha_0 (1 - q_1) / W_0 \\ k \in (0, W_m - 1) \\ p\{-1, 0 | m, 0\} = \alpha_0 q_1 \\ p\{0, k | -1, 0\} = (1 - q_2) / W_0 \\ w \in (0, W_j - 1) \\ p\{-1, 0 | -1, 0\} = q_2 \end{cases}$$

定义 $b_{j,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{B(t) = j, S(t) = k\}$ 为各状态的稳态分布, 其中 $j \in (0, m), k \in (0, W_1 - 1), m$ 为

避时间.

联立式⑦—⑫迭代算法可计算 α_0, γ 和 ω_0 值.

1.4 吞吐计算公式

令 P_{tr} 表示信道忙的概率, P_s 为数据包成功发送的概率, 则有公式

$$P_{tr} = 1 - (1 - \gamma)^n$$

$$P_s = \frac{n\gamma(1 - \gamma)^{n-1}}{P_{tr}}$$

为了计算出系统吞吐量, 本文采用信道马尔科夫链模型来模拟信道运转状态. 信道的运转状况如图3所示.

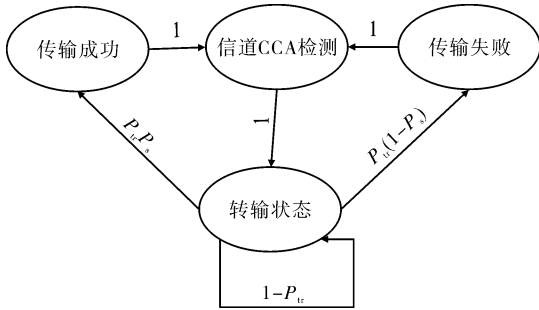


图3 信道运转状况链模型图

在当前信道中有2种传输状态: 传输成功和传输失败, 并且从前面的分析可以得出, 无论传输成功或者失败, 在进行下一次传输之前都要进行1次CCA检测, 如果发现信道空闲, 才能发送数据. 因此吞吐量计算公式可以表示为

$$S_{RT} = \frac{GP_{suc}}{GP_{suc} + GP_{fail} + P_{clear}} = \frac{GP_{tr}P_s}{P_{tr}G + 1}$$

1.5 能耗计算公式

为了分析 LD-MAC 机制的能量消耗情况, 本文用 E_x 表示发送数据所消耗的平均能耗, E_R 表示接收数据所消耗的平均能耗, E_{idle} 表示信道处于空闲状态时节点平均能耗, E_{CCA} 表示一次 CCA 检测时节点的平均能耗. 因此, 成功传输单位数据消耗的能量表示为

$$E_{avg} = \frac{E[\text{单位时间消耗的能量}]}{E[\text{单位时间成功传输的数据}]} = \frac{P_{CCA}E_{CCA} + P_xE_x + P_lE_R + P_{idle}E_{idle}}{250 \text{ Kb/s} \times \gamma(1 - \gamma)^{n-1}}$$

其中, P_{CCA} 表示节点进行 CCA 检测的概率, P_x 表示信道传输数据的概率, P_l 表示节点监听信道的概率, P_{idle} 表示信道处于空闲状态的概率.

1.6 接入时延

为了分析 LD-MAC 机制中平均接入时延性能, 根据图2所示信道运转状态, 得到成功发送1个数

据包的接入时延的公式

$$T = G \cdot slot_time \frac{GP_{suc} + GP_{fail} + P_{clean} + P_{again}}{GP_{suc}} = 0.32 \frac{P_{tr}(G + 1) + 1}{P_{tr}P_s}$$

其中, $slot_time$ 表示一个时隙, 等于 0.32 ms/slot; P_{again} 表示再次发送数据包的概率.

1.7 信道接入概率

在网络中, 信道的接入概率也就是节点在执行一次 CCA 检测信道为空闲状态后发送数据流的概率 γ , 见式⑩.

2 LD-MAC 协议性能分析与评价

2.1 实验设计

为验证本文提出的具有低时延特征的 LD-MAC 协议退避机制的有效性, 采用数学分析的方法对该机制进行性能分析和评价, 仿真平台是 Matlab.

网络仿真环境由1台网络协调器和 $n - 1$ 台传感器节点组成. 仿真中所用的系统参数见表1. 其中, 1 symbol = 16 μ s.

表1 仿真参数设置

仿真参数	设置值	仿真参数	设置值
数据包有效载荷	70 B	接收 ACK 的时间	34 symbol
MAC 帧头	13 B	macMinBE	3
PHY 帧头	6 B	amaxBE	6
SIFS	21.5 symbol	E_T	20 mA
DIFS	40 symbol	E_R	15 mA
ACK 超时	54 symbol	m	5
时隙 σ	20 symbol	数据传输速率	11 Mb/s
CCA 检测时间	40 symbol	T	55 ms

2.2 实验结果及分析

实验以包到达率、吞吐量、能耗、传输时延作为指标考查协议的性能. 仿真结果中 LE-MAC 机制的数据为文献[5]中的数据.

图4分析了在网络节点数固定并且包到达率变化的情况下, 节点的信道接入概率变化. 从图4中可以看出, LD-MAC 机制的信道接入率要明显高于 LE-MAC. 这是因为采用1次 CCA 检测的 LD-MAC 机制更容易能够竞争到信道来进行数据传输. 另外, 在包到达率比较低的情况下, 执行2次 CCA 或执行1次 CCA 对包信道接入概率的影响相对比较小, 这是因为大部分节点处于空闲状态, 无需竞争信道, 从而导致了接入概率相近的现象.

图5是 LD-MAC 和 LE-MAC 2种机制随分组到

速率改变时的吞吐量的变化. 从图中可见, 随着网络中节点数的增加, 2 种机制的饱和吞吐量呈现下降的趋势, 这主要是因为网络中节点间的竞争加剧导致数据包的碰撞概率加大, 数据包重传导致了更小的饱和吞吐量. 另外在节点数相同的情况下, LD-MAC 具有更高的饱和吞吐量. 这是因为随着包到达率的增大, 参与竞争信道的节点数量会增加. 而由于 LD-MAC 仅需执行 1 次 CCA, 若信道空闲就可以发送数据, 因此竞争到信道的机会就大大增加, 大大提高了网络的吞吐量.

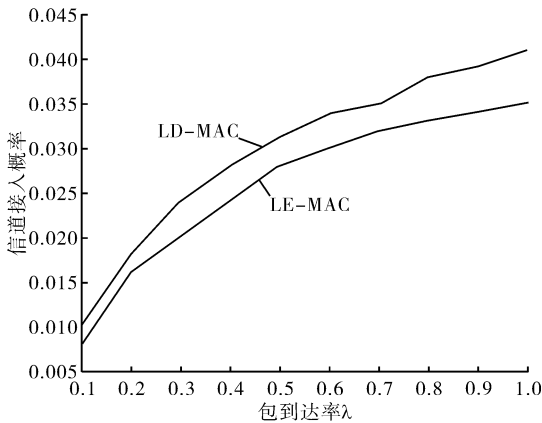


图 4 包到达率不同时信道接入概率仿真结果

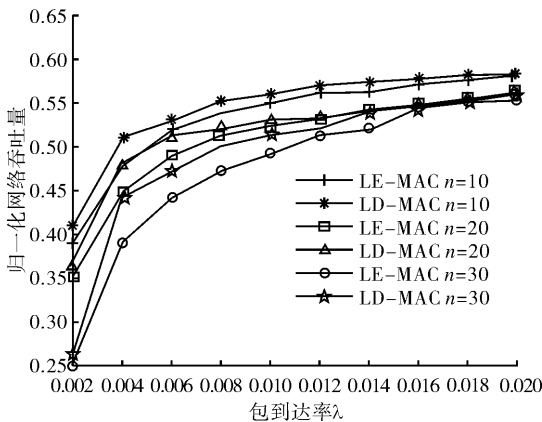


图 5 包到达率不同时网络吞吐量仿真结果

2 种机制在能耗方面的表现如图 6 所示. 从图 6 中可以看出: 1) 随着节点的增加, 成功传输每个字节的数据需要更多的能量, 因为随着网络负载的增加导致数据包发生冲突的概率增加, 浪费了能量, 因此 2 种机制的单位能耗呈现增加的趋势; 2) LD-MAC 机制的单位能耗在各种情况下要稍稍高于 LE-MAC 机制, 这是由于 LD-MAC 机制采用了 1 次 CCA 检测的方法, 虽然缩短了各个节点检测等待时间, 加快了进入信道的的时间, 但是可能导致多个节点间

竞争的加剧, 进而增加了系统的单位能耗.

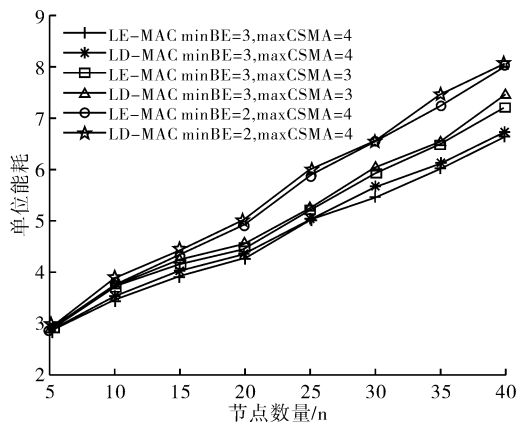


图 6 节点数量不同时系统单位能耗仿真结果

图 7 给出了数据包接入时延随包到达率变化的仿真结果. 从图中可以看出, LD-MAC 机制的接入时延要明显小于 LE-MAC 机制. 因为 LE-MAC 机制要经过 2 次 CCA 检测, 如果信道空闲, 才能接入信道, 增加了接入时延.

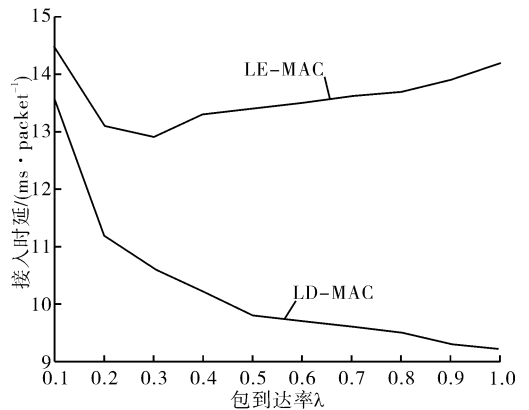


图 7 包到达率不同时接入时延仿真结果

3 结论

本文在分析 LE-MAC 特点的基础上, 继承其传输能耗低的优点, 针对其存在较长传输时延的问题, 提出了一种 LD-MAC 机制. 该机制在站点竞争窗口成功退避到 0 后, 进行第 1 次 CCA 空闲检测, 如果发现信道空闲, 直接发送数据的设计思想. 通过实验证明, LD-MAC 机制在基本保证 LE-MAC 传输能耗低的优点的同时, 能有效地降低了传输时延, 提升系统的接入概率和吞吐量.

下一步研究将在 LD-MAC 的基础上, 深入研究如何根据网络负载情况自适应地调整一些参数, 更好地提高网络性能, 让协议在时延和能耗方面的表

现有进一步的提升.

参考文献:

- [1] Ye Wei, Heidemann J, Estrin D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(3): 493.
- [2] LEE M, LEE J J, KIM J B, et al. Adaptive packing strategy to reduce packing loss in MF-TDMA satellite networks [C]//Proceeding of International Conference on Computational Science and Its Applications, Berlin: Springer, 2011:133.
- [3] Wen H, Lin C, Chen Z J, et al. An improved Markov model for IEEE 802.15.4 slotted CSMA-CA mechanism [J]. Computer Science and Technology, 2009, 24(3):495.
- [4] Buratti C, Das A K, Roy S. Performance analysis of IEEE 802.15.4 Beacon-Enabled mode [J]. IEEE Vehicular Technology Society, 2010, 59(4):2031.
- [5] 陈金, 樊晓平. 非饱和状态下时隙 CSMA/CA 机制改进与性能分析 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(30):140.
- [6] Lai S W, Ravindran B. On Distributed time-dependent shortest paths over duty-cycled wireless sensor networks [C]//Proceeding of the 29th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Washington D. C.: IEEE, 2010:1.
- [7] 何剑, 白光伟, 曹磊. DQ-MAC: 一种基于区分服务的 WSN 信道访问机制 [J]. 计算机科学, 2010, 37(12):30.
- [8] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE802.11 distributed coordination function [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3):535.
- [9] Sun Y, Du S, Gurewitz O, et al. DW-MAC: a low latency, energy efficient demand wakeup MAC protocol for wireless sensor networks [C]//Proceeding of ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc), NY: ACM, 2008:53.

(上接第 72 页)

视点角度实现立体无缝过渡,而且采用软着色处理,通过像素点模式直接投射到多功能显示屏.在避免闪烁和串色的同时,呈现出完美的立体感应效果.

3 结语

本文设计了一套以倍频场为基础的时分互补色立体视频编码方法:采用可伸缩性视频编码技术,将时分法和色分法的优点融于一体,选用以安全性和稳定性著称的 QNX 系统来管理三维视频编解码软件平台,设计场频时分互补色编码原型,并对图像帧进行垂直分辨率和互补色处理,按场分时传送互补色视频信号,不仅能平滑逼真地渲染左右视点图形帧,而且有效提升了立体视频的沉浸感.进一步工作是细化倍频场垂直分辨率的标定结果,针对不同硬件处理能力给出不同参数设置方案,并

逐步兼容更多硬件处理器.

参考文献:

- [1] 侯春萍, 杨蕾. 立体电视技术综述 [J]. 信号处理, 2007, 23(5):733.
- [2] 李维. 时分互补立体编码研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [3] 徐彬. 立体视频编码中的相关技术研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(计算技术研究所), 2006.
- [4] 王知嘉. 立体视频编码与显示技术研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2009.
- [5] 黎之乐, 王兴东, 周军, 等. 双视立体视频同步合成系统设计与实现 [J]. 电视技术, 2011, 35(12):84.
- [6] 吴方, 王沛. 基于颜色变化信息的局部立体匹配算法 [J]. 电视技术, 2013, 37(23):34.
- [7] 姚力. 自然三维电视系统中立体匹配及视点合成技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.