

## ALOHA 脉冲超宽带网络的性能分析

彭炳光 卫 国 朱近康 尹华锐

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系 合肥 230027)

**摘 要:** 脉冲超宽带(IR-UWB)系统的脉冲宽度极窄,脉冲占空比极低,使用跳时和时间分集传送。该文分析了分布式脉冲超宽带网络中采用 ALOHA 方式共享信道时帧传送失败的原因,推导出帧传送失败的概率,通过分析数据帧产生-缓冲-传送的 M/G/1 排队过程,得到了网络吞吐、帧传送延时的公式。仿真结果说明,ALOHA 脉冲超宽带网络的吞吐,帧传送延时和网络稳定性能远远优于 ALOHA 载波调制技术网络。

**关键词:** 脉冲超宽带;跳时;ALOHA;网络吞吐;帧传送延时

**中图分类号:** TN915

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)07-1602-04

## Performance Analysis of the ALOHA IR-UWB Network

Peng Bing-guang Wei Guo Zhu Jin-kang Yin Hua-rui

(Dept. Electronic Engineering and Information Science, USTC, Hefei 230027, China)

**Abstract:** An Impulse Radio UWB (IR-UWB) system uses very narrow pulses with time-hopping and time diversity to transmit data, where the signals have very low duty cycle. In this paper the cause of data frame transmission failure is analyzed in a distributed IR-UWB network using the ALOHA protocol, and the failure probability is derived. Based on queuing analysis of the data frame generating-buffering-sending process, the network throughput and frame transmission delay in closed-form expressions are obtained. Simulation results show that the throughput, frame transmission delay and stability of the ALOHA IR-UWB network is much better than those of the ALOHA network based on carrier modulation technology.

**Key words:** IR-UWB; Time-Hopping; ALOHA; Throughput; Frame transmission delay

### 1 引言

基于脉冲体制的 IR-UWB 系统采用周期传送宽度极窄的冲激脉冲来进行通信,脉冲重复周期是脉冲宽度的 100~1000 倍,是一个占空比极低的脉冲通信系统。在分布式网络中,由于没有统一的中心控制,节点一般采用随机竞争的方式传送数据,比较常用的方法是载波侦听/冲突检测(CSMA/CA)和 ALOHA。由于 IR-UWB 系统没有载波调制,不能通过载波能量检测的方法来判断信道是否空闲,所以载波侦听方式不能应用于超宽带网络中。ALOHA 方式不进行载波侦听,能够应用于分布式超宽带网络。

ALOHA 技术自从 1970 年提出来后<sup>[1]</sup>,由于其实现简单,被广泛研究和应用<sup>[2]</sup>。文献[3,4]提出了在 UWB 网络中使用 ALOHA,但没有给出详细的性能分析。文献[5]提出了一种在分布式低速超宽带网络中使用 ALOHA 的 MAC 协议,分析了帧碰撞的概率,给出了网络吞吐的简单仿真结果,但没有分析帧传送延时和节点丢帧概率。本文对分布式脉冲超宽带网络中使用 ALOHA 技术进行了全面的性能分析,推导了网络吞吐、帧传送延时的公式,并给出了仿真分析和比较。

### 2 系统和网络模型

IR-UWB 系统周期的传送宽度极窄的冲激脉冲,脉冲的宽度为  $T_p$ ,脉冲平均重复时间为  $T_f$ 。系统采用时间分集传送,  $N_s$  个脉冲传送 1 位数据,则传送 1 位数据的时间  $T_s = N_s T_f$ ,从而系统的数据传送速率为  $R = 1/T_s$ 。 $T_f$  被均分为  $N_h$  个时隙,时隙长度为  $T_c$ 。系统在一段  $T_f$  内只发送一个脉冲,脉冲发送的时隙位置由  $N_h$  元跳时序列控制,此跳时序列是一个伪随机序列,不同节点传送数据采用的跳时序列各不相同并且准正交,不同的跳时序列确定了不同的跳时逻辑信道。

在一片区域里随机分布着  $N$  个使用 IR-UWB 技术的节点,这些节点组成一个分布式网络,节点采用 ALOHA 方式共享信道。网络中的节点使用一个公用的跳时序列收发控制信息,各个节点又分别具有专属于自己的跳时序列,用来传输数据。

各个节点数据帧的产生是相互独立同分布的泊松过程,帧产生的速率是  $\lambda$ ,帧产生间隔时间  $t_{ia}$  服从参数为  $\lambda$  的指数分布,  $t_{ia}$  的均值  $T_{ia}$  等于  $1/\lambda$ 。当数据帧产生后,它先进入节点的发送缓冲队列,等待被节点传送。设数据帧是定长的,长度为  $L$ ,则帧传送时间  $T_{pk} = L/R$ ,若节点间的传输延时

为  $\tau$ , 则数据帧从发送到接收完成所需时间为  $T_{pk} + \tau$ 。

脉冲超宽带网络节点使用 ALOHA 方式共享信道的收发流程如图 1 所示。节点在空闲时都以公用跳时序列侦听。发送节点的缓冲队列如果有待传的数据帧, 就先使用公用跳时序列广播一个短的连接帧, 连接帧里包含发送节点和接收节点的地址, 以及发送节点传送数据使用的跳时序列。接收节点接收到此连接帧后, 得知发送节点传送数据使用的跳时序列, 于是使用发送节点的跳时序列侦听。发送节点接着传送数据帧, 如果接收节点正确接收到这个数据帧, 则向发送节点回送确认帧(ACK)。发送节点收到 ACK 帧后, 若缓冲队列非空, 则开始新的数据传送。如果发送节点在数据传送后的一段设定等待时间内没有收到 ACK 帧, 就认为数据传送失败, 于是进行指数退避, 退避完成后进行重传, 如果三次重传都失败, 则发送节点丢弃此帧, 并向上层协议告知帧传送失败。

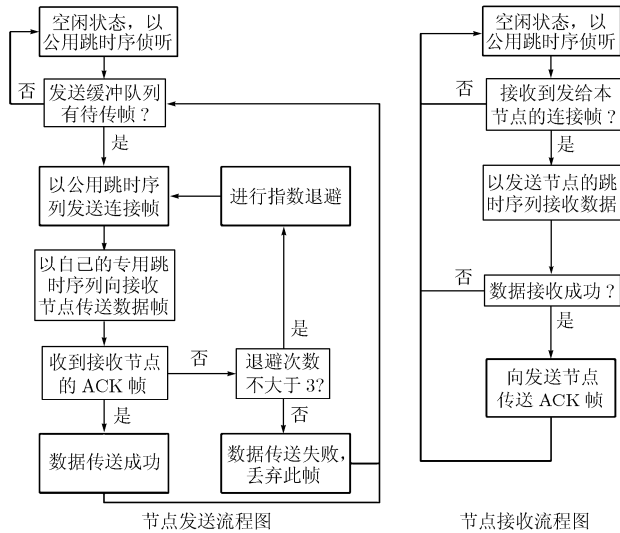


图 1 节点收发流程图

### 3 网络性能分析

#### 3.1 帧传送失败概率

数据帧传送失败的原因有两个: (1)由于脉冲碰撞, 目的节点有至少 1 位数据接收错误, 在不考虑信道编码纠错的情况下, 整个数据帧接收错误, 设发生这种情况的概率为  $P_{f1}$ 。(2)数据帧到达时, 目的节点正处于忙期, 即正在传送数据或者接收其他节点的数据, 导致此数据帧不能被目的节点接收, 设发生这种情况的概率为  $P_{f2}$ 。

文献[5]给出了脉冲超宽带网络中脉冲碰撞的概率  $P_{PC}$  和脉冲碰撞导致 1 位数据传送失败的概率  $P_{BE}$ 。设一帧数据长为  $L$  位, 可得脉冲碰撞导致数据帧传送失败的概率为

$$P_{f1} = 1 - (1 - P_{BE})^L \quad (1)$$

设任一节点  $A$  开始向节点  $B$  传送数据, 此时节点  $B$  的状态可能是: (1)节点  $B$  正在传送数据; (2)节点  $B$  正在接收

非节点  $A$  的数据; (3)节点  $B$  空闲。在(1), (2)两种状态下, 节点  $B$  繁忙, 导致节点  $A$  向节点  $B$  传送数据失败。

节点正在传送数据的概率近似为  $T_{pk}/T_{ia}$ , 则任一节点向节点  $B$  传送数据的概率为

$$P_{tB} = \frac{T_{pk}}{T_{ia}} \cdot \frac{1}{N-1} = \frac{T_{pk}}{(N-1)T_{ia}} \quad (2)$$

除了节点  $A$  和  $B$  的  $N-2$  个节点中至少有一个向  $B$  传送数据的概率为

$$\sum_{i=1}^{N-2} \binom{N-2}{i} P_{tB}^i (1 - P_{tB})^{N-2-i} = 1 - (1 - P_{tB})^{N-2} \quad (3)$$

则节点  $B$  正在接收非节点  $A$  的数据的概率为

$$P_{Br} = \left(1 - \frac{T_{pk}}{T_{ia}}\right) (1 - (1 - P_{tB})^{N-2}) \quad (4)$$

综上, 由于节点  $B$  正处于繁忙状态而导致节点  $A$  传送失败的概率为

$$P_{f2} = \frac{T_{pk}}{T_{ia}} + \left(1 - \frac{T_{pk}}{T_{ia}}\right) \left(1 - \left(1 - \frac{T_{pk}}{(N-1)T_{ia}}\right)^{N-2}\right) \quad (5)$$

则数据帧传送成功概率为  $P_S = (1 - P_{f1})(1 - P_{f2})$ 。

通过计算和仿真, 在节点数  $N$  满足  $N < N_b$  的情况下,  $P_{f1}$  非常小, 数量级为  $10^{-5}$ ,  $P_{f1}$  这么小是因为 IR-UWB 系统具有极低占空比, 脉冲碰撞概率相当低, 并且采用时间分集传送,  $N_s$  个脉冲传送 1 位数据。而  $P_{f2}$  的数量级为  $10^{-1}$ ,  $P_{f2}$  远大于  $P_{f1}$ , 所以接收节点正处于繁忙状态而不能再接收数据帧是导致数据传送失败的主要原因。

#### 3.2 网络吞吐

节点的数据帧产生是速率为  $\lambda$  的泊松过程, 产生的数据帧进入节点的发送缓冲队列, 等待传送, 节点对发送缓冲队列最前面的数据帧进行传送, 如果一次传送不成功, 则进行重传。如果三次重传都不成功, 则该帧被丢弃, 接着节点传送缓冲队列的下一帧。帧产生, 帧缓冲, 帧传送的过程是 M/G/1 排队过程, 下面基于排队系统的相关理论, 推导网络的吞吐。

首先, 确定服务时间  $X$ (即节点传送缓冲队列最前面的帧所花的时间)的分布: 节点 1 次传送成功, 概率为  $P_1 = P_S$ , 传送时间为  $X_1 = T_{pk} + \tau$ ; 节点 2 次传送成功, 概率为  $P_2 = (1 - P_S)P_S$ , 传送时间为  $X_2 = 2(T_{pk} + \tau) + T_{b1}$ ; 节点 3 次传送成功, 概率为  $P_3 = (1 - P_S)^2 P_S$ , 传送时间为  $X_3 = 3(T_{pk} + \tau) + T_{b1} + T_{b2}$ ; 节点进行第 4 次传送, 概率为  $P_4 = 1 - P_1 - P_2 - P_3$ , 其中第 4 次传送成功的概率为  $P_{4S} = (1 - P_S)^3 P_S$ , 传送失败丢弃帧的概率为  $P_{4f} = P_4 - P_{4S}$ , 传送时间为  $X_4 = 4(T_{pk} + \tau) + T_{b1} + T_{b2} + T_{b3}$ 。

以上的  $\tau$  为传输延时,  $T_{b1}$ ,  $T_{b2}$ ,  $T_{b3}$  分别为第 1, 2, 3 次退避时间。定义网络吞吐  $S$  为成功传送次数与总传送次数的比值, 则可得:

$$S = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_{4S}}{P_1 + 2P_2 + 3P_3 + 4P_4} \quad (6)$$

### 3.3 数据帧传送延时

设数据帧在缓冲队列里的平均等待时间为  $W$ , 传送所花的时间为  $X$ , 由 M/G/1 排队系统理论<sup>[6]</sup>, 有

$$W = \frac{\lambda E[X^2]}{2(1-\rho)} \quad (7)$$

式中  $\rho = \lambda E[X]$ 。而数据帧成功传送所花时间的均值为

$$X_s = P_1 X_1 + P_2 X_2 + P_3 X_3 + P_4 X_4 \quad (8)$$

则数据帧成功传送到目的节点的平均延时为  $D = W + X_s$ 。

### 4 仿真结果及分析

本文采用 OMNeT++ 网络仿真软件对网络进行建模仿真, 超宽带网络区域大小为  $100\text{m} \times 100\text{m}$ , 在这个区域中节点随机分布, 网络中没有中心控制节点, 各节点通信以 P2P (Peer-to-Peer) 方式进行。各个节点的传输参数相同, 为:  $T_p = 0.8\text{ns}$ ,  $T_c = 1\text{ns}$ ,  $T_f = 100\text{ns}$ ,  $T_s = 1000\text{ns}$ ,  $N_h = 100$ , 数据帧长  $L = 1000\text{bit}$ , ACK 帧长  $L_{\text{ACK}} = 50\text{bit}$ , 退避时间窗初始值  $T_B = 2\text{ms}$ 。为了进行性能比较, 本文还仿真了 ALOHA 载波调制技术网络的性能, 其数据帧和 ACK 帧的长度及传输时间、节点退避策略保持和超宽带网络一致。

图 2 画出了节点数为 10, 50 时, 在  $0.015\text{s} \leq T_{ia} \leq 0.06\text{s}$  情况下, ALOHA 脉冲超宽带网络和 ALOHA 载波调制技术网络的吞吐仿真曲线。

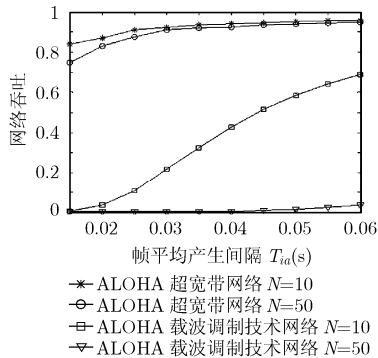


图 2 超宽带网络和载波调制技术网络的吞吐

通过比较可以得出, 超宽带网络在节点数  $N < N_h$  时, 吞吐都保持较高的数值, 而载波调制技术网络的吞吐随着节点数的稍微增大, 下降得很快, 在  $N=50$  时近似为 0。在相同节点数情况下, 超宽带网络的吞吐大大高于载波调制技术网络。

图 3 画出了节点数为 10, 50 时, 在  $0.015\text{s} \leq T_{ia} \leq 0.06\text{s}$  情况下, ALOHA 超宽带网络和 ALOHA 载波调制技术网络的帧传送延时的仿真曲线, 因为节点数为 50 时载波调制技术网络的吞吐在  $T_{ia}$  较小情况下为 0, 所以图中只画出了其在  $T_{ia} > 0.045\text{s}$  时的帧传送延时。超宽带网络的帧传送延时变化不大, 都保持在比较小的数值, 而载波调制技术网络的帧传送延时在  $T_{ia}$  较小时远大于超宽带网络的帧传送延时, 随

着  $T_{ia}$  的增大, 载波调制技术网络的帧传送延时逐渐减小到趋于超宽带网络的帧传送延时。

图 4 画出了节点数为 10, 50 时, 在  $0.015\text{s} \leq T_{ia} \leq 0.06\text{s}$  情况下, ALOHA 超宽带网络和 ALOHA 载波调制技术网络的节点丢帧概率仿真曲线。节点数为 10 时, 超宽带网络的丢帧概率一直接近于 0, 而载波调制技术网络的丢帧概率是从接近于 1 逐渐减小到接近于 0 的。在节点数为 50 时, 超宽带网络的丢帧概率上升不大, 仍然接近于 0, 而载波调制技术网络的丢帧概率一直非常大, 接近于 1。可见, 超宽带网络的可靠性远远超过载波调制技术网络。

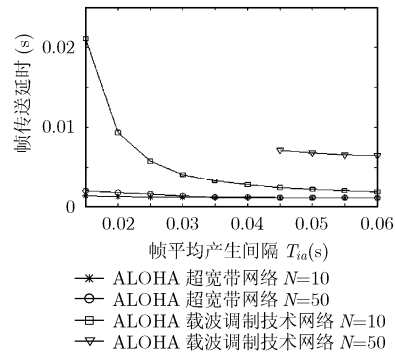


图 3 超宽带网络和载波调制技术网络的帧传送延时

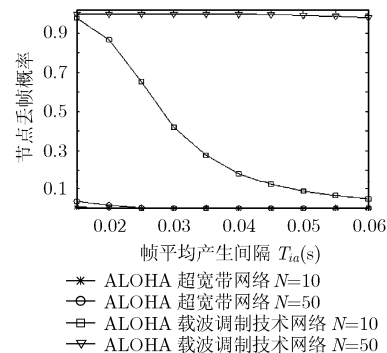


图 4 超宽带网络和载波调制技术网络节点丢帧概率

### 5 结束语

使用载波调制技术的网络以 ALOHA 方式共享信道, 在节点数和帧产生速率较高的情况下, 帧碰撞概率接近于 1, 网络性能严重下降, 不能正常工作。本文通过分析和仿真, 说明由于脉冲超宽带系统的低占空比、跳时和时间分集发送特性, 在脉冲超宽带网络中使用 ALOHA 方式共享信道, 能够克服载波调制技术网络只要有帧碰撞发生就会数据接收失败的缺点。脉冲超宽带系统的跳时扩频因子  $N_h$  一般取值为  $100 \sim 1000$ , 跳时序列控制脉冲随机的在  $N_h$  个时隙中的一个上发送, 当网络的节点数不超过  $N_h$  时, 脉冲碰撞概率小; 并且因为在时域上是  $N_s$  个连续脉冲传送 1 位数据, 只有当这  $N_s$  个脉冲错误的个数超过一半才会导致数据出错, 所以 ALOHA 脉冲超宽带网络可以在有一定数量脉冲碰撞的情况

下正常工作。网络仿真的结果验证了,在相同节点数和帧产生速率的情况下,ALOHA 脉冲超宽带网络的吞吐性能、帧传送延时性能和网络可靠性远远优于 ALOHA 载波调制技术网络。

### 参 考 文 献

- [1] Abramson N. The ALOHA system—Another alternative for computer communications. Proceedings of AFIPS 1970 Fall Joint Computer Conference, Houston, USA, 17-19 Nov. 1970, 37: 281-285.
- [2] Abramson N. Development of the ALOHANET. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1985, 31(2): 119-123.
- [3] Giancola G, Blazevic L, and Bucaille I, et al. UWB MAC and network solutions for low data rate with location and tracking applications. Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Zurich, Switzerland, 5-8 Sept. 2005: 758-763.
- [4] Nardis L De and Benedetto M G Di. Medium access control design for UWB communication systems: review and trends. *Journal of Communications and Networks*, 2003, 5(4): 386-393.
- [5] Di Benedetto M G, De Nardis L, and Junk M, et al. (UWB)<sup>2</sup>: Uncoordinated, Wireless, Baseborn, medium access control for UWB communication networks. *Mobile Networks and Applications*, Mobile Networks and Applications Special Issue on WLAN Optimization at the MAC and Network Levels, 2005, 10(5): 663-674.
- [6] 唐应辉, 唐小我. 排队论: 基础与分析技术. 北京: 科学出版社, 2006: 84-87.

彭炳光: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为超宽带网络的多址与 MAC 设计.

卫 国: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为个人通信与移动通信.

朱近康: 男, 1943 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信与个人通信、通信信号处理.

尹华锐: 男, 1973 年生, 讲师, 研究方向为无线通信.