

9-23-2022

OPNET Based Simulation of Hybrid TDMA Protocol for Helicopters Datalink

Yanfang Fu

1.School of Computer Science and Engineering Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China,;
fuyanfang@xatu.edu.cn

Nan Zhang

1.School of Computer Science and Engineering Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

Jianing Wei

2.Science and Technology on Complex System Control and Intelligent Agent Cooperation Laboratory, Beijing Electro-mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China;

Shaochun Qu

1.School of Computer Science and Engineering Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

OPNET Based Simulation of Hybrid TDMA Protocol for Helicopters Datalink

Abstract

Abstract: For the current time slot allocation problem of the data link, an improved hybrid time slot allocation protocol based on grey relational analysis is proposed and implemented. *Through the aggregation of throughput, delay and load of current message buffer by grey relational analysis, the comprehensive evaluation index is obtained, and the time slot is allocated dynamically.* The fixed time slot allocation is also adopted to ensure that at least one time slot is available for nodes in the network. Simulation results show that compared with the fixed TDMA (time division multiple access) protocol and the P-TDMA (priority-TDMA) protocol, the proposed protocol not only reduces contention conflicts, but also guarantees a lower delay, a relatively high throughput and a high time slot utilization rate.

Keywords

OPNET, Link-16, fixed TDMA (time division multiple access) protocol, mixed time slot allocation protocol, helicopters datalink

Authors

Yanfang Fu, Nan Zhang, Jianing Wei, Shaochun Qu, Ying Lu, and Chang Liu

Recommended Citation

Yanfang Fu, Nan Zhang, Jianing Wei, Shaochun Qu, Ying Lu, Chang Liu. OPNET Based Simulation of Hybrid TDMA Protocol for Helicopters Datalink[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(09): 1933-1940.

基于 OPNET 的机群数据链混合 TDMA 协议仿真

傅妍芳¹, 张楠¹, 魏佳宁², 曲少春¹, 卢颖¹, 刘畅²

(1. 西安工业大学 计算机科学与工程学院, 陕西 西安 710021;

2. 北京机电工程研究所 复杂系统控制与智能协同技术重点实验室, 北京 100074)

摘要: 针对当前数据链的时隙分配问题, 提出并实现了一种基于灰色关联分析法的混合时隙分配协议。通过灰色关联分析法对吞吐量、时延和当前报文缓冲区的负载程度做聚合, 得到各节点综合得分, 根据综合得分对时隙进行动态分配, 同时采用固定时隙分配的方式保证网络中的节点最少有一个时隙可用。仿真结果表明: 与固定 TDMA(time division multiple access)协议和 P-TDMA(priority-TDMA)协议相比, 该协议在减少竞争冲突的同时, 也保证了较低的时延、相对较高的吞吐量和高时隙利用率。

关键词: OPNET; Link-16; 固定 TDMA 协议; 混合时隙分配协议; 机群数据链

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2022) 09-1933-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0449

OPNET Based Simulation of Hybrid TDMA Protocol for Helicopters Datalink

Fu Yanfang¹, Zhang Nan¹, Wei Jianing², Qu Shaochun¹, Lu Ying¹, Liu Chang²

(1. School of Computer Science and Engineering Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Science and Technology on Complex System Control and Intelligent Agent Cooperation Laboratory, Beijing Electro-mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: For the current time slot allocation problem of the data link, an improved hybrid time slot allocation protocol based on grey relational analysis is proposed and implemented. Through the aggregation of throughput, delay and load of current message buffer by grey relational analysis, the comprehensive evaluation index is obtained, and the time slot is allocated dynamically. The fixed time slot allocation is also adopted to ensure that at least one time slot is available for nodes in the network. Simulation results show that compared with the fixed TDMA(time division multiple access) protocol and the P-TDMA(priority-TDMA) protocol, the proposed protocol not only reduces contention conflicts, but also guarantees a lower delay, a relatively high throughput and a high time slot utilization rate.

Keywords: OPNET; Link-16; fixed TDMA (time division multiple access) protocol; mixed time slot allocation protocol; helicopters datalink

引言

现代战争的一个特点是高度信息化, 而信息化战争对当前复杂多变的战场环境中的通信提出了更高要求。为此, 以美军为首, 各国都在研发用于军事通信的战术数据链——一种高效传输和实时分发格式化消息的信息链路^[1-2]。战术数据链通常

采用 TDMA(time division multiple access)方式接入, 并能够在规定时间内按照其通信协议, 向指定的通信对象传输战术消息, 可将各种武器系统和指控系统联通, 实时共享战场态势。然而, 在实际应用过程中, 网络中各节点对时隙的需求会随着战场态势的变化而变化, 如何保证各节点有时隙可用且不发生冲突就成为了数据链研究中的一个重点。

收稿日期: 2021-05-19 修回日期: 2021-07-13

第一作者: 傅妍芳(1978-), 女, 博士, 教授, 研究方向为系统建模与计算机仿真。E-mail: fuyanfang@xatu.edu.cn

数据链常用的时隙分配方式有固定时隙分配和动态时隙分配。固定时隙分配：对每个节点只分配一次时隙，之后不在变化，优点是不会产生冲突，缺点是不能根据节点业务进行调整，时隙利用率较低。动态时隙分配：所有节点根据业务申请时隙使用而非一开始就占用某个时隙，这种方式提高了时隙使用率，但是当节点较多的时候冲突也较多，重负载时吞吐量小。

综上所述，单独使用固定时隙分配算法或动态时隙分配算法难以满足机群数据链的通信要求，所以本文提出一种基于灰色关联分析法的混合时隙分配协议 GRA-TDMA(TDMA based on grey correlation analysis)，并通过 OPNET 仿真软件对协议性能进行测试。通过与固定 TDMA 协议和 P-TDMA(priority-TDMA) 协议进行对比表明，GRA-TDMA 协议在时延、吞吐量和时隙利用率方面具有不错的表现。

1 相关工作

在时隙分配策略方面，文献[3]提出的 FPRP (five phase reservation protocol) 协议将时帧分成预约子帧和数据子帧，每个预约子帧由 N 个预约时隙组成，每个预约时隙细分成 M 个预约微时隙，节点在一个预约微时隙中，通过五步握手过程完成对时隙的预约，然后在数据子帧发送消息。该算法在实现了动态分配的同时也保证了时隙分配的效率，但其时帧划分过于复杂，算法实现难度较大。

文献[4]提出了一种动态时隙分配算法——P-TDMA，该算法将 1 个时帧划分成 3 个子帧，在第 1 个子帧发送节点自己所占的时隙信息，在第 2 个子帧发送自己一跳邻居节点的信息，在第 3 个子帧传输数据。P-TDMA 为了避免冲突，在网络运行前会设置一张优先级表，表中的内容是各个节点对每个时隙的优先级，同一个时隙对任意节点的优先级都不同，这就保证了不会冲突。然而，若网络中的节点较多，那么设置优先级表就会比较困难，对

于变化较快的网络适应性较差。

文献[5]提出 IPD-TDMA(improvement dynamic-TDMA) 算法，该算法将 1 个时帧分成预约子帧和数据子帧，节点在预约子帧申请时隙，在数据子帧发送数据，同时还引入了报文优先级来解决冲突。但是该算法并没有考虑到变化速度快的网络，由于预约子帧只负责申请时隙而对邻居节点的时隙并不知情，对于移动网络来说，邻居节点时刻在变化，难以保证申请的时隙不会是邻居节点所占时隙。

2 灰色关联分析法

以往所用的时隙分配协议在解决竞争冲突时，大多只考虑一个因素，或是节点优先级，或是报文优先级。然而这种方法在网络中节点数量较多而优先级较少的时候表现得并不好，而且在网络实际运行时，节点对于时隙的需求也往往不是一个因素所能决定的。因此，需要考虑多个因素下的时隙分配。

在多个因素的影响下进行时隙分配，靠人为判断各个因素间的重要性往往是比较困难的，为此可以采用灰色关联分析法(GRA)^[6-10]，将影响节点的多个因素聚合成一个综合评价指标，根据这个综合评价指标的大小去判断谁需求时隙的程度更高。

灰色关联分析法的步骤如下：

(1) 确定数据序列^[11]

$$X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ij}\},$$

$$j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中： X_{ij} 为系统 i 的指标 j 。

(2) 无量纲化处理

数据量纲不同是无法直接进行比较的，因为其物理意义各不相同，因此需要对数据做无量纲化处理^[12]，归一化是其中较为常用的一种无量纲化方法。

归一化是通过对原始数据做线性变换，将原始数据的数值映射到[0,1]区间，归一化后的结果为 0 表示数据为最小值，归一化后的结果为 1 表示数据为最大值，如式(2)所示：

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (2)$$

式中: X'_{ij} 为经过无量纲化处理的系统 i 的指标 j 的数据。

(3) 计算权重

灰色关联分析的一个重点就是要确定各个因素的权重, 常用的权重确定方法有多种, 本文采用的是熵权法。熵权法是一种客观的定权方法, 当有多个影响因素的时候, 主观定权往往变的非常困难, 因此本文选择熵权法计算各个指标的权重。

1) 计算指标 j 在样本 i 中的占比:

$$P_{ij} = X'_{ij} / \sum_{i=1}^n X'_{ij} \quad (3)$$

2) 计算指标 j 的熵值:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (4)$$

式中: $k = 1/\ln(n)$ 。

3) 求各指标所占比例:

$$W_j = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{j=1}^m H_j} \quad (5)$$

4) 计算综合得分:

$$r_i = \sum_{j=1}^m W_j P_{ij}, (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

假定现在有 10 个节点, 选择能够代表网络状况的 3 个因素时延、吞吐量和当前缓冲区负载, 对这 10 个节点进行综合评价。评价指标见表 1。

表 1 评价指标
Table 1 Evaluation indicators

| 节点 | 时延/s | 吞吐量/(个/s) | 缓冲区负载程度 |
|----|------|-----------|---------|
| 1 | 2.54 | 26 | 0.30 |
| 2 | 2.12 | 23 | 0.36 |
| 3 | 2.37 | 26 | 0.17 |
| 4 | 1.98 | 20 | 0.41 |
| 5 | 2.03 | 18 | 0.23 |
| 6 | 2.24 | 24 | 0.12 |
| 7 | 1.72 | 16 | 0.37 |
| 8 | 1.68 | 21 | 0.22 |
| 9 | 1.84 | 24 | 0.20 |
| 10 | 2.17 | 28 | 0.33 |

根据灰色关联分析的式(2)、(3), 可以求得如表 2 所示的标准化后的评价指标和表 3 所示的评价指标的占比。

表 2 标准化的评价指标
Table 2 Standardized evaluation indicators

| 节点 | 时延/s | 吞吐量/(个/s) | 缓冲区负载程度 |
|----|------|-----------|---------|
| 1 | 1.00 | 0.83 | 0.62 |
| 2 | 0.51 | 0.58 | 0.82 |
| 3 | 0.80 | 0.83 | 0.17 |
| 4 | 0.34 | 0.33 | 1.00 |
| 5 | 0.41 | 0.17 | 0.38 |
| 6 | 0.65 | 0.67 | 0 |
| 7 | 0.05 | 0 | 0.86 |
| 8 | 0 | 0.42 | 0.34 |
| 9 | 0.19 | 0.67 | 0.28 |
| 10 | 0.57 | 1.00 | 0.72 |

表 3 评价指标比重

Table 3 Indicators proportion

| 节点 | 时延/s | 吞吐量/(个/s) | 缓冲区负载程度 |
|----|------|-----------|---------|
| 1 | 0.22 | 0.15 | 0.12 |
| 2 | 0.11 | 0.11 | 0.16 |
| 3 | 0.18 | 0.15 | 0.03 |
| 4 | 0.08 | 0.06 | 0.19 |
| 5 | 0.09 | 0.03 | 0.07 |
| 6 | 0.14 | 0.12 | 0 |
| 7 | 0.01 | 0 | 0.17 |
| 8 | 0 | 0.08 | 0.07 |
| 9 | 0.04 | 0.12 | 0.05 |
| 10 | 0.13 | 0.18 | 0.14 |

通过各个指标的占比, 可以求各指标的信息熵和指标权重, 由式(4)、(5)可得信息熵和权重。各指标的信息熵和权重如表 4 所示。

表 4 各指标信息熵和权重

Table 4 Entropy and weight

| 指标 | 时延/s | 吞吐量/(个/s) | 缓冲区负载程度 |
|---------|-------|-----------|---------|
| 信息熵 H | 0.868 | 0.905 | 0.889 |
| 权重 W | 0.391 | 0.281 | 0.328 |

得到各指标的权重后, 可以用式(6)计算综合得分, 综合得分如表 5 所示。

表5 各节点综合得分

Table 5 Comprehensive score of each node

| 节点 | 评分 | 节点 | 评分 |
|----|-------|----|-------|
| 1 | 0.168 | 6 | 0.088 |
| 2 | 0.126 | 7 | 0.059 |
| 3 | 0.122 | 8 | 0.045 |
| 4 | 0.110 | 9 | 0.065 |
| 5 | 0.067 | 10 | 0.147 |

根据综合得分可以判别竞争优先级, 综合得分越高, 表示该节点越需要此时隙。

3 GRA-TDMA 算法

GRA-TDMA 算法是一种固定分配和动态分配混合的时隙分配算法。

图1为GRA-TDM协议的时帧结构图。GRA-TDMA协议的每个子帧都由 N 个时隙组成, N 为节点数。在网络运行前, 为各节点预分配一些时隙, 如果节点数少于时隙数, 那么按顺序分配时隙即可, 空闲时隙不做分配, 如果节点数多于时隙数, 那么所有节点按序分配时隙, 在这一帧未分配到时隙的节点, 将在下一帧依序分配, 循环往复。

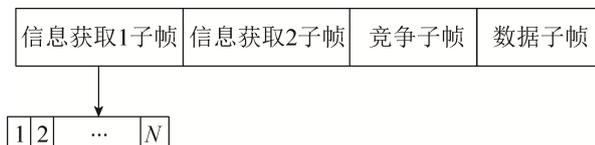


图1 GRA-TDMA 时帧结构

Fig. 1 Gra-tdma time frame structure

(1) 信息获取1子帧: 在网络开始运行后, 各节点在信息获取1子帧, 向一跳邻居节点发送自己所占时隙信息, 第一轮信息交换完毕后, 所有节点都有了其一跳邻居节点所占时隙信息。

(2) 信息获取2子帧: 各节点向其一跳邻居节点发送信息, 将自己一跳邻居节点所占时隙信息发送出去, 收到信息的节点将源节点的一跳邻居节点信息与自己的一跳邻居节点信息进行对比, 未出现在自己一跳邻居节点表中的节点就是自己的两跳邻居节点, 这样第二轮信息交换完毕后, 各节点都知道了自己两跳邻居节点所占时隙信息, 这样做的

目的是保证两跳范围内的节点不会冲突。

根据可靠广播的要求, 同一时刻两跳范围内的节点只有一个可以发送信息^[4]。

以图2为例, 在这个拓扑中, 节点1的两跳邻居节点不包含节点7、8、9, 那么在同一时刻, 节点1可以复用节点7、8、9的时隙而不会发生冲突。但是节点1不能复用节点2、3、4、5的时隙, 因为同一时刻两跳范围的节点可能向同一个节点发送消息, 这样就会产生冲突。

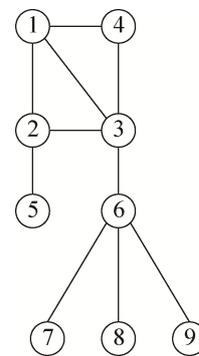


图2 网络拓扑结构图

Fig. 2 Network topology diagram

(3) 竞争子帧: 在竞争子帧中, 各节点根据自身需求对空闲时隙申请复用, 节点间通过相互协商完成时隙的竞争。节点在竞争子帧中将所申请的时隙和上一帧的时延、吞吐量和当前帧的缓冲区负载广播出去, 通过这一轮信息交换, 网络中的每个节点都应该知道邻居节点所申请的时隙, 及邻居节点在上一帧的网络状况了, 这时可以通过灰色关联分析法计算评价指标了。当时隙竞争发生冲突的时候, 各节点根据评价指标来判别谁有权占用时隙, 评价指标越大, 代表该节点越是需求此时隙。

(4) 数据子帧: 在数据子帧到来时, 每个节点根据时隙发送图案等待属于自己的时隙到来, 然后从数据缓冲队列中取出数据包, 在相应的数据时隙将数据包发送出去。

整个协议的流程图如图3所示。

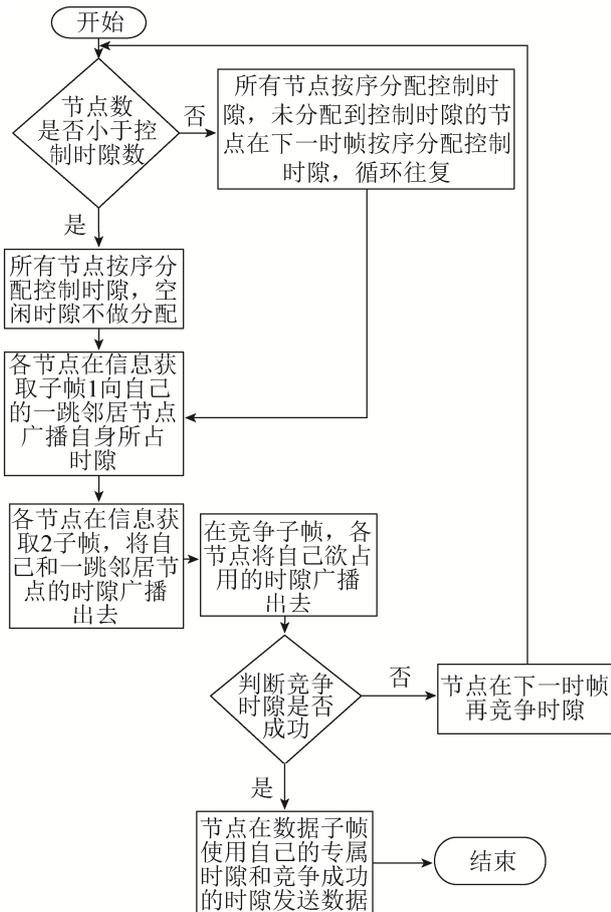


图 3 GRA-TDMA 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of GRA-TDMA algorithm

4 算法建模与仿真

4.1 OPNET 建模

本文以某直升机群为例, 采用 OPNET 仿真软件^[13-15]进行建模, 涵盖了网络模型、节点模型、进程模型、移动模型和无线通信模型。其中移动模型采用固定轨迹运动方式, 用来模拟直升机群在真实战场环境下的飞行路线。无线通信模型是用来模拟信道在真实环境下的物理特性的, 在 OPNET 中可以通过 14 个管道阶段对无线通信模型进行配置。

本文将节点模型分为 4 层, 分别是应用层、网络层、MAC 层和物理层, 节点模型如图 4 所示。

应用层负责产生报文和对收到的报文进行处理, 网络层负责报文的转发, MAC 层负责时隙的调度, 算法也是在 MAC 层来实现, 发信机、收信

机和天线组成物理层。MAC 层的进程模型如图 5 所示。

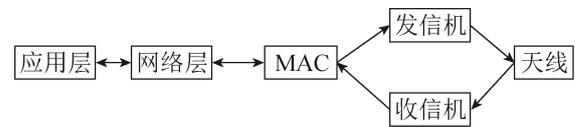


图 4 节点模型结构图

Fig. 4 Node model structure diagram

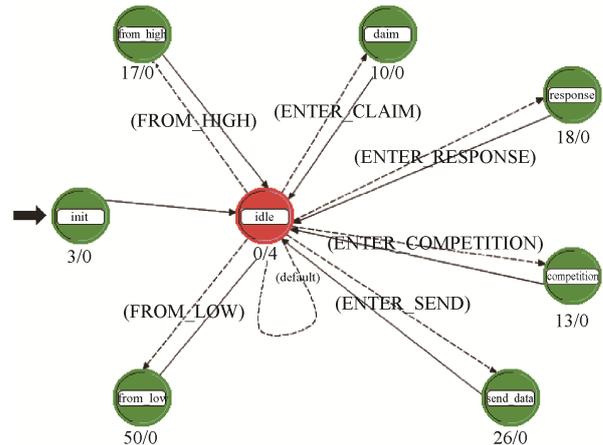


图 5 MAC 层进程模型

Fig. 5 MAC layer process model

该进程有共 8 个状态, idle 为空闲状态, 其余 7 个状态工作如下:

(1) **init** 状态: 负责初始化节点的时隙和时隙调度所需要的参数, 注册统计量。

(2) **from_high**: 处理来自应用层的报文, 对报文做格式化处理, 并将处理过的报文放入数据缓冲区。

(3) **from_low**: 处理来自其他节点的报文, 根据源地址区分报文是不是发给自己的, 将目的地址不是自己的报文销毁, 否则, 将报文传输给上层。

(4) **claim**: 节点在该状态将自己所占时隙信息和自身节点号广播出去, 其他不发送消息的节点接收此消息, 一轮信息交换之后, 网络中所有节点都应该有自己一跳邻居节点的时隙信息。

(5) **response**: 节点在该状态将自己一跳邻居节点信息和自身节点号广播出去, 其他不发送消息的节点接收此消息, 这一轮信息交换之后, 各

节点应该同时握有自己一跳邻居节点和两跳邻居节点的时隙信息，而整个网络中的时隙数是有限的，那么各节点将一跳邻居节点的时隙和两跳邻居节点的时隙过滤掉，就能够知道哪些时隙是空闲时隙，这些空闲时隙就是接下来可在竞争子帧中竞争的时隙。

(6) **competition**: 节点在这个状态将自己所竞争的时隙信息和节点上一帧的时延、吞吐量及缓冲区负载等信息发送出去。这一轮信息交换之后，每个节点都应该知道其他节点申请的时隙，以及其他节点在上一帧的时延、吞吐量和缓冲区负载，各节点利用灰色关联分析法将这些影响因素进行聚合，得到综合评价指标，综合评价指标代表节点对时隙的需求程度，评价指标越大说明节点需求该时隙的程度越高。当产生时隙竞争冲突时，可根据评价指标占用时隙。

(7) **send_data**: 节点在该状态发送报文。

4.2 算法仿真

利用 OPNET 仿真软件对算法进行仿真，GRA-TDMA 将一个时帧分成 4 个子帧，分别是信息获取 1 子帧、信息获取 2 子帧、竞争子帧和数据子帧，前 3 个子帧用于交换信息和竞争时隙。每个子帧的时隙长度不宜过长，否则开销会比较大，同样的子帧的时隙长度也不能太短，太短则传输距离会减小。参考 Link-16 时隙划分标准，这里选择给数据子帧的时隙长度设置为 7.812 5 ms，那么前 3 个子帧的长度可以取数据子帧时隙长度的 1/4，即 1.953 125 ms。

本文的网络仿真场景设计了 1 个子网，子网中有 1 个直升机编队，编队由 3 架预警直升机和 6 架武装直升机组成，预警直升机编号为 0、3 和 6，武装直升机编号为 1、2、4、5、7 和 8，仿真场景如图 6 所示。

设定发信息速率为 2 Mbps，带宽为 960 MHz，仿真时长为 100 s，报文到达服从泊松分布。数据包的格式如图 7 所示，时延如图 8 所示。

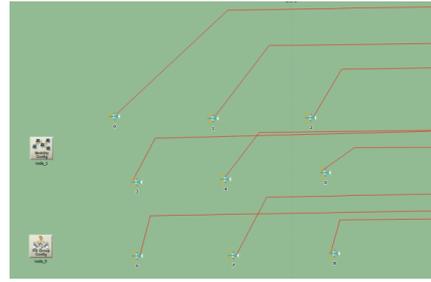


图 6 仿真场景网络模型

Fig. 6 Network model for the simulation scenario

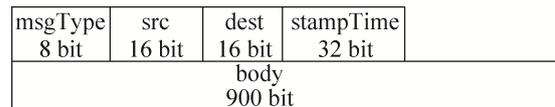


图 7 数据包结构图

Fig. 7 Packet structure diagram

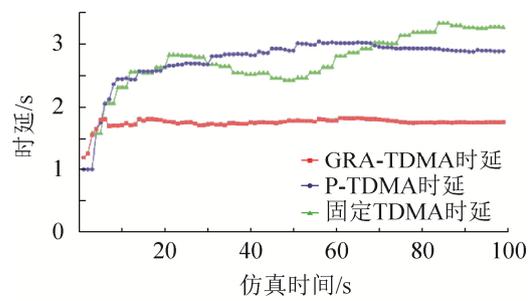


图 8 时延曲线图

Fig. 8 Delay curve graph

由图 8 可以看出，在时延方面，GRA-TDMA 明显好于固定 TDMA 协议和 P-TDMA 协议。固定 TDMA 每时帧只有一个时隙发送消息，如果节点数量很多时，每个节点等待下一次发送消息的时间就会变长，报文在队列中等待的时间也随之边长导致时延增大。

图 9 为吞吐量曲线图。

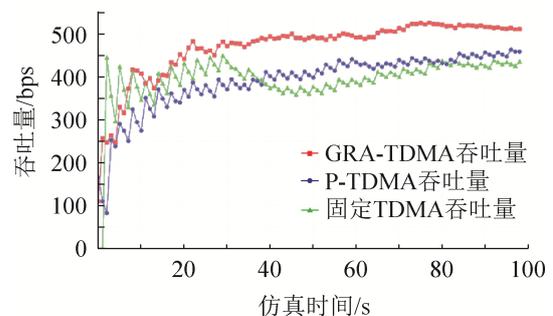


图 9 吞吐量曲线图

Fig. 9 Graph of throughput

由图 9 可以看出,在吞吐量方面, GRA-TDMA 要好于固定 TDMA 协议和 P-TDMA 协议,由于 GRA-TDMA 对时隙进行了复用,任意一个节点都可以复用其两跳邻居节点以外的节点所占时隙而不会冲突,那么每帧可用于发送消息的时隙就会增多,则其吞吐量也会增大。

图 10 为信道利用率曲线图。

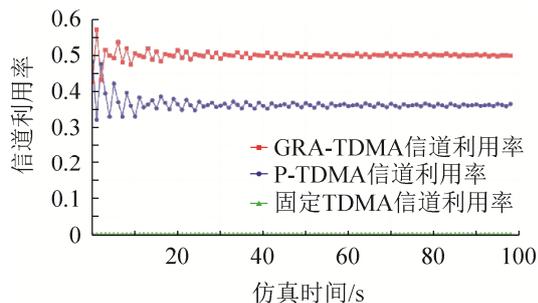


图 10 信道利用率曲线图
Fig. 10 Channel utilization curve

由图 10 可以看出,在信道利用率方面, GRA-TDMA 比固定 TDMA 协议和 P-TDMA 协议要高。固定 TDMA 为各个节点所分配的时隙是严格按照时间顺序的,节点两次发送消息的间隔中,可能会空出很多时隙却没有其他节点占用,导致固定 TDMA 的信道利用率不高。GRA-TDMA 的时隙复用使得每一帧空闲时隙要比固定 TDMA 少的多,因此其信道利用率较高。P-TDMA 协议由于数据时隙较长,可能会出现报文发送完毕,但数据时隙还有剩余时长,造成数据时隙空闲,使信道利用率降低。

5 结论

本文以 P-TDMA 协议为参考,提出一种改进的基于灰色关联分析法的混合时隙分配算法,并利用 OPNET 仿真软件对该算法进行了仿真,通过与固定 TDMA 协议和 P-TDMA 协议对比,证明了 GRA-TDMA 协议在实现了时隙复用的同时,在时延、吞吐量及信道利用率方面也都有不错的表现。然而,本文所做实验均为单网环境,对于多网并未涉及,因此在多网结构下能否做到低时延、高吞吐量同时还能避免冲突,是后面要继续研究的问题。

参考文献:

- [1] 吕娜,张岳彤,陈柯帆,等. 数据链理论与系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
Lü Na, Zhang Yuetong, Chen Kefan, et al. Theory and System of Data Link[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [2] 梅文华,蔡善法. JTIDS/Link16 数据链[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
Mei Wenhua, Cai Shanfa. JTIDS/Link16 Data Link[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [3] Zhu Chenxi, Corson M S. A Five-Phase Reservation Protocol (FPRP) for Mobile Ad Hoc Networks[C]// Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. San Francisco, CA, USA: IEEE, 1998: 322-331.
- [4] 彭革新,谢胜利,陈彩云. 一种基于固定 TDMA 的无冲突动态时隙分配算法[J]. 信息安全与通信保密, 2005(11): 116-121.
Peng Gexin, Xie Shengli, Chen Caiyun. A Collision-Avoid Dynamic Slots Assignment Algorithm Based on Fixed TDMA[J]. Information Security and Communication Confidentiality, 2005(11): 116-121.
- [5] 李志文. 数据链动态时隙分配算法的仿真与分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
Li Zhiwen. Simulation and Analysis of Dynamic Time Slot Allocation Algorithm for Data Link[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [6] 牛东来,刘昭含. 基于灰色关联分析的我国上市超市经营效益综合评价研究[J]. 商业经济, 2021(1): 180-182.
Niu Donglai, Liu Zhaohan. Research on Comprehensive Evaluation of Operating Benefit of Listed Supermarkets in China Based on Grey Relational Analysis[J]. Business & Economy, 2021(1): 180-182.
- [7] 杨强. 基于灰色关联度模型的中药上市企业绩效评估研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
Yang Qiang. Enterprise Performance Evaluation of A Company in China Based on Gray Relational Model[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [8] 蓝燕金,简文彬,罗金妹,等. 基于灰色定权聚类模型的公路边坡水毁风险等级评价[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 101-107.
Lan Yanjin, Jian Wenbin, Luo Jinmei, et al. Risk Grade Evaluation of Highway Slope Water Damage Based on Grey Fixed-Weight Cluster Model[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition), 2021, 49(1):

- 101-107.
- [9] 杨存. 多终端协同下的网络选择算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
Yang Cun. Research on Access Network Selection Algorithm in Multi-terminal Coordinated Network[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunication, 2015.
- [10] 张硕. 基于多网络接入的无线网络选择算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
Zhang Shuo. Research on Multi-access Network Selection Methods in Heterogeneous Wireless Networks[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunication, 2016.
- [11] 胡文生, 杨剑锋, 赵明. 基于灰色聚类算法的需求分析[J]. 计算机科学, 2016, 43(增 1): 471-475.
Hu Wensheng, Yang Jianfeng, Zhao Ming. Requirements Analysis Based on Grey Clustering Algorithm[J]. Computer Science, 2016, 43(S1): 471-475.
- [12] 马媛. 灰色关联度分析法下西安市中小企业融资效率研究[J]. 财会月刊, 2010(36): 66-68.
Ma Yuan. Research on Financing Efficiency of Small and Medium-Sized Enterprises in Xi'an Based on Grey Relational Analysis[J]. Finance and Accounting Monthly, 2010(36): 66-68.
- [13] 刘建民, 杨瑞娟, 程宏斌, 等. 基于 Opnet 的 Link16 网络仿真与性能分析[J]. 现代防御技术, 2010, 38(3): 58-64, 69.
Liu Jianmin, Yang Ruijuan, Cheng Hongbin, et al. Simulation and Performance Analysis of Link16 Network Based on Opnet[J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(3): 58-64, 69.
- [14] 郜林. 基于 OPNET 的通信网仿真[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2018: 14-19.
Gao Lin. Communication Network Simulation Based on OPNET[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2018: 14-19.
- [15] 陈敏. OPNET 网络编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Chen Min. OPNET Network Simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.