

# 一种短波网 MAC 协议的设计与分析

周得敏, 刘芸江, 李曼, 刘硕

(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

**摘要** 首先分析了 TDMA 协议和 HFTP 协议 2 种短波 MAC 协议的原理,结合 2 种协议的优缺点,针对短波天波通信数据传输可靠性低的特点,在 TDMA 协议的基础上设计了一种适应于短波信道的 TP-TDMA 协议。运用排队理论建立了各协议时延的数学模型,通过解析的方法衡量各因素对时延的影响,并以信道误码率、节点数量、业务量大小为变化条件,对时延进行了仿真比较。结果表明:TP-TDMA 协议相比 TDMA 协议和 HFTP 协议,在短波信道条件下,随着信道误码率、节点数目及业务量的逐渐增加,TP-TDMA 协议都表现出更优异的性能。

**关键词** 短波通信;时分多址;时隙分配;排队理论

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.01.007

**中图分类号** V243.1;TN92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)01-0035-06

## A Design and Analysis of a MAC Protocol for HF Network

ZHOU Demin, LIU Yunjiang, LI Man, LIU Shuo

(Information and Navigation College, Air force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** First, the principles of TDMA protocol and HFTP protocol are analyzed. Aimed at the features that fluctuations are fast and high frequency (HF) communication via sky-wave propagation is faded, a TP-TDMA protocol based on TDMA protocol is designed combined with the advantages and disadvantages of two kinds of HF MAC protocol. A mathematical model of time delay is established by using queuing theory. The influence of different factors on the time delay is discussed by the analytical method. The results show that the TP-TDMA protocol has more excellent performance than that of the TDMA protocol and HFTP protocol in the HF channel with the increase of the value of channel error rate, node number and traffic.

**Key words:** HF communication; TDMA; slot assignment; queuing theory

在短波 IP 网络中,由于物理层设备调制解调器与电台同一时刻只能向一个目标电台发送数据<sup>[1]</sup>,同时,短波通信也存在可利用频带资源紧缺,信道传输速率低,信道误码率高等缺点<sup>[2]</sup>,这就要求提高短波信道传输的效率。为提高传输效率,目前主要有

2 种方式:一是扩展信道带宽,进行宽带信号传输,在降低对信噪比要求的同时,提高信道速率<sup>[3-5]</sup>;另外一种方式是改进节点对信道的争用方式,减少信道争用过程中时隙浪费和数据碰撞,尽可能提高信道利用率<sup>[6-8]</sup>。宽带传输的方式有很大的速率提升

**收稿日期:**2015-09-08

**基金项目:**国家自然科学基金(61302153)

**作者简介:**周得敏(1990-),男,甘肃张掖人,硕士生,主要从事短波地空网 MAC 协议研究,E-mail:zhoudemin1660@163.com

**引用格式:**周得敏,刘芸江,李曼,等.一种短波网 MAC 协议的设计与分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(1):35-40. ZHOU Demin, LIU Yunjiang, LI Man, et al. A Design and Analysis of a MAC Protocol for HF Network[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(1): 35-40.

空间,可满足更多数据量的传输,但现有电台设备基本都是 3 kHz 带宽的窄带体制,研究在现有设备的基础上如何减少时隙浪费,提高信道利用率仍然十分重要<sup>[3]</sup>。根据短波通信特点,短波通信的多址接入协议主要有 DCHF 协议、HFTP 协议和 TDMA 协议<sup>[9-11]</sup>,其中 DCHF 协议在新的短波 IP 网络标准 S'5066 中被 HFTP 协议所替代<sup>[12]</sup>,因为 DCHF 采用竞争的方式占用信道,节之间的信号容易产生碰撞。HFTP 和 TDMA 协议属于调度型 MAC 协议<sup>[13]</sup>,利用确定的算法让节点接入信道,可以有效的避免用户之间的信号碰撞,有利于保护用户的服务质量。

本文基于 TDMA 协议和 HFTP 协议的思想,将 HFTP 协议通过令牌传输灵活分配信道的优点运用到 TDMA 协议中,提出了一种可以动态利用时隙的 TP-TDMA 协议。性能分析表明:TP-TDMA 协议不仅保留了 TDMA 协议中节点占用信道不受信道条件影响的优点,而且可以通过传送令牌对剩余时隙再分配。另外,TP-TDMA 协议与其它动态 TDMA 协议相比,不需要对节点占有的固有时隙进行重新分配,避免了在短波信道中由于个别节点不能正确接收时隙分配表信息而导致时隙占用不同步的现象。

## 1 协议分析与设计

### 1.1 TDMA 协议和 HFTP 协议

时分多址(TDMA)协议将时间轴划分为等长的时帧,一帧由若干时隙组成,各个节点预先分配至少一个确定的时隙,在这个时隙中只有该节点可以发送分组,其它节点处于接收状态<sup>[14]</sup>。这样的固定分配方式存在缺陷:当某节点无分组发送时,对应时隙下信道处于空闲状态;当某节点需要发送大量分组时,但一次时隙不能够全部发送完,尽管有其它时隙处于空闲状态,也只能等待下一个属于本节点的时隙到来。所以 TDMA 协议中时隙浪费严重,尤其节点产生的分组量变化幅度较大时,信道的使用效率更低<sup>[15]</sup>。原理见图 1。

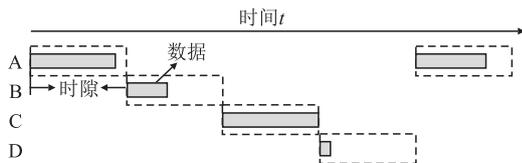


图1 TDMA 协议原理

Fig.1 The schematic of TDMA protocol

短波无线令牌环(HFTP)协议中,节点在发送顺序上组成一个环,按照顺序循环发送分组,这种发

送分组的权利称为令牌<sup>[16]</sup><sup>23-61</sup>。节点持有令牌的时间界限称为令牌持有时间,超过令牌持有时间,不论分组是否发送完,都必须将令牌交给下一个节点;当节点分组发送完毕或没有信息要发送时,要立刻将令牌交给下一个节点<sup>[17]</sup>。令牌传递通过节点间发送包含有网内节点数目和发送次序等信息的数据包完成。令牌在传递过程中可能发生丢失,后续节点在长时间内若收不到令牌,超过一定时间后由其重新发起令牌继续传递,这个时间称为最大等待时间。在短波信道中,容易造成数据包的丢失或错误接收,因此令牌丢失的可能性增大,尤其在信道条件变差时,大大增加了令牌成功传递的时间。原理见图 2。

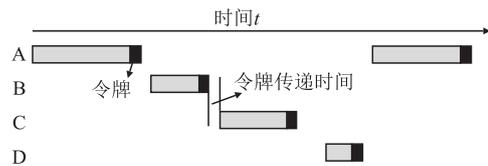


图2 HFTP 协议原理

Fig.2 The schematic of HFTP protocol

### 1.2 基于令牌的 TP-TDMA 协议

由以上叙述可知,TDMA 协议具有在固定的时机传输数据分组的优点,但存在时隙严重浪费的缺点;HFTP 协议信道占用灵活,节约信道资源,但由于短波信道质量差,节点间令牌的传递易丢失,一旦令牌丢失需要较长时间恢复令牌,也容易造成信道资源的浪费。结合 2 种协议的优缺点,在 TDMA 协议内部加入令牌机制,当时隙剩余时对业务量较大的节点发送令牌包,由其占用剩余时隙。与 HFTP 协议不同,TP-TDMA 协议令牌包的信息中节点发送顺序不是固定的,而是按照业务量的大小排序。当没有时隙剩余或剩余时隙结束时,则按照 TDMA 协议分配的时隙表执行。原理见图 3。

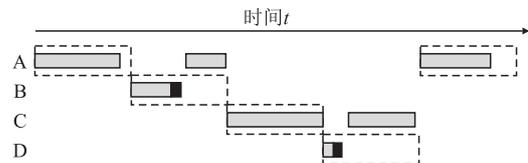


图3 TP-TDMA 协议原理

Fig.3 The schematic of TP-TDMA protocol

令牌包的发送与否,不仅要考虑目的节点在上一时隙内的数据是否发送完毕,还要考虑目的节点在短时间内的业务量大小情况,以优先业务量大的节点为原则。本文通过统计前一段时间内其它节点在所分配时隙内发送分组量的多少,按时隙先后顺序加权求和来估计当前各节点业务量的大小,并确定令牌的传递顺序。需要说明,每个节点发送令牌的顺序只按照本节点的统计排序,与其它节点的统计无关。原因有 2 点:一是令牌只能由 TDMA 时隙

剩余的节点发出,不会由于统计信息的不一致有多个节点同时发出令牌的现象。二是即使令牌目的节点的业务量不是全网最大的,也是该发送令牌的节点的通信范围内业务量最大的,收到节点后并不会造成信道资源的浪费。相反,如果一定将令牌发送给全网业务量大的节点,势必需要节点间统计信息的交互,这样会造成信道资源的额外开销,同时,由于各节点间信道条件和通信范围等因素也不能确保统计到的节点是全网业务量最大的。

设网络中有  $N$  个节点,节点  $n$  只占用一个时隙,时隙号为  $n$ ,每个时隙有  $K$  个微时隙,每个微时隙正好传输一个分组,统计前  $M$  个时帧内的业务量情况,可得如下矩阵:

$$\alpha = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $a_{mn}$  ( $m=1,2,\dots$ ) 为第  $m$  个时帧内,第  $n$  个节点的基数值,若一个时隙内分组发送占用  $k$  个微时隙,基数值就为  $k$  ( $0 \leq k \leq K$ ),表示一个时帧内某节点的分组量大小。由于大量分组发送时,时帧内相应时隙是被连续占用的,并且越靠近当前时间  $t$  的时隙基数值越大,说明占用该时隙的节点在短时间内业务量越大。因此,给统计的前  $M$  个时帧赋予不同的权重,按时间先后顺序依次为  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M$ ,即  $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M]$ 。其中,权重  $\beta$  可以按照二指数递减的方式取值,如  $\beta_M = 1, \beta_{M-1} = 1/2, \dots$ ,也可以根据实际情况赋值。由此可得各节点在  $M$  个时帧内的业务量基数和  $\omega$  为:

$$\omega = \beta \cdot \alpha = \left[ \sum_{m=1}^M \beta_m a_{m1}, \sum_{m=1}^M \beta_m a_{m2}, \dots, \sum_{m=1}^M \beta_m a_{mn} \right] \quad (2)$$

可得,第  $n$  个节点的基数和为:

$$\omega_n = \sum_{m=1}^M \beta_m a_{mn} \quad (3)$$

占有时隙的节点根据其它节点的基数和判断令牌的传递顺序,基数和越大,次序越靠前。假如节点  $p$  发送令牌给节点  $q$ ,依次需要判断以下 3 个条件:①当前占用时隙的节点  $p$  数据发送完毕;②节点  $q$  在上一时隙的第  $K$  个微时隙(最后一个微时隙)仍然发送数据;③  $\omega_q \geq \omega_n$  ( $q \neq n$ ),节点  $n$  为除当前发送状态外的任意节点(如果  $\omega_q = \omega_n$ ,令牌发送给节点  $q$  和节点  $n$  中编号小的节点)。

发送令牌的情况有:同时满足条件①②、①②③或①③。若满足条件②的节点只有一个,则按条件①②执行;若满足条件②的节点有一个以上,则按条件①②③执行;若没有节点满足条件②,则按条件①

③执行。

## 2 协议的时延性能分析

假设分组到达是泊松过程,分组到达速率为  $\lambda$ ,信道发送速率为  $\mu$ ,网络中节点数目为  $n$ ,三者满足关系式  $\mu > n\lambda$ 。协议的队列排队模型见图 4。

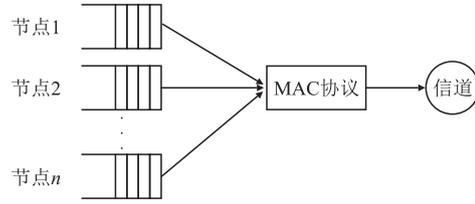


图 4 协议队列排队模型

Fig.4 The queuing model of protocols

协议时延通过计算端到端时延获得,由于短波信道速率低,传播距离远,且令牌协议涉及令牌的传输,所以将传输时延和传播时延考虑在内,忽略由硬件性能决定的处理时延。因此,协议时延主要由 3 部分组成:排队时延、传输时延和传播时延,表示为:

$$T = T_{\text{queue}} + T_s + T_t \quad (4)$$

### 2.1 TDMA 协议时延性能分析

在 TDMA 协议中,为保证节点发送分组的公平性,每个节点发送的时隙长度均为  $T_{\text{slot}}$ ,时隙长度为  $T_{\text{frame}}$ ,且  $T_{\text{frame}} \geq nT_{\text{slot}}$ 。任意节点在  $T_{\text{frame}}$  时间内产生的分组个数为  $\lambda T_{\text{frame}}$ ,该节点在  $T_{\text{slot}}$  时间内可发送的分组个数为  $\mu T_{\text{slot}}$ ,从上次发送开始到本次发送前的时间内产生的分组数  $\lambda T_{\text{frame}} > \mu T_{\text{slot}}$  时,节点不能在一次时隙中发送完全部分组,只能等下一时隙继续发送。由泊松过程定义可知,任意节点在时间  $T_{\text{frame}}$  内产生  $k$  个分组的概率为:

$$P\{X(t + T_{\text{frame}}) - X(t) = k\} = \frac{(\lambda T_{\text{frame}})^k}{k!} e^{-\lambda T_{\text{frame}}}, \quad k = 0, 1, \dots \quad (5)$$

可得产生的分组数  $k_1 \leq k \leq k_2$  的概率为:

$$P\{k_1 \leq k \leq k_2\} = \sum_{k=k_1}^{k_2} \frac{(\lambda T_{\text{frame}})^k}{k!} e^{-\lambda T_{\text{frame}}} \quad (6)$$

由此可得,节点在时间  $T_{\text{frame}}$  产生的分组在一次时隙内发送完的概率为:

$$P_1 = P\{0 \leq k \leq \mu T_{\text{slot}}\} \quad (7)$$

在 2 次时隙内发送完的概率为:

$$P_2 = P\{\mu T_{\text{slot}} < k \leq 2\mu T_{\text{slot}}\} \quad (8)$$

依次类推在  $m$  次时隙内发送完的概率为:

$$P_m = P\{(m-1)\mu T_{\text{slot}} < k \leq m\mu T_{\text{slot}}\} \quad (9)$$

分组在即将发送时的时隙内的排队情况属于标准的 M/D/1 排队系统,其平均等待时间为:

$$W = \frac{n\lambda}{2\mu(\mu - n\lambda)} \quad (10)$$

因此分组在队列中的平均排队时间为:

$$T_{\text{queue}} = \sum_{m=1}^{\infty} P_m(m-1)T_{\text{frame}} + \frac{1}{2}T_{\text{frame}} + W, \quad (11)$$

$m=1,2,\dots$

## 2.2 HFTP 协议时延性能分析

在无线令牌环协议中,节点持有令牌的最大时间为  $T_{\text{max-ring}}$ ,上一次接收到令牌到本次收到令牌的时间间隔为  $T_{r\text{-ring}}$ ,且  $T_{r\text{-ring}} \leq nT_{\text{max-ring}}$ 。节点在一次令牌持有期内最大可发送分组数为  $\mu T_{\text{max-ring}}$ ,由式(5)可得节点在一次令牌周期内产生的分组数  $k$  小于  $\mu T_{\text{max-ring}}$  的概率为:

$$P'_1 = P\{0 \leq k \leq \mu T_{\text{max-ring}}\} \quad (12)$$

节点在一次令牌周期内产生的分组需要  $m$  次令牌持有期发送的概率为:

$$P'_m = P\{(m-1)\mu T_{\text{max-ring}} < k \leq m\mu T_{\text{max-ring}}\} \quad (13)$$

由于令牌在传递中受短波信道影响,在传输错误时会发生令牌丢失。设短波信道的误码率为  $P_e$ ,令牌大小为  $Q$  bit,在传输过程中只要有一个比特发生错误,接收端则认为令牌丢失。则令牌丢失的概率为:

$$P_{\text{miss-ring}} = 1 - (1 - P_e)^Q \quad (14)$$

当令牌丢失后,将由下一个接收令牌的节点重新发起令牌,时间为:

$$T_{\text{restart}} = (n-1)T_{\text{max-ring}} - \frac{n-1}{n}T_{r\text{-ring}} \quad (15)$$

式中:  $T_{r\text{-ring}}$  为令牌传递一周需要的平均时间,可以解得:

$$T_{r\text{-ring}} = \frac{n(n-1)P_{\text{miss-ring}}T_{\text{max-ring}} + nT_{\text{token}}}{1 + (n-1)P_{\text{miss-ring}} - \frac{n\lambda}{\mu}} \quad (16)$$

式中:  $T_{\text{token}}$  是一次令牌发送和传输所用的时间,由此可得,分组在队列中的排队时间为:

$$T'_{\text{queue}} = \sum_{m=1}^{\infty} P'_m(m-1)T_{r\text{-ring}} + \frac{1}{2}T_{r\text{-ring}} + W, \quad (17)$$

$m=1,2,\dots$

## 2.3 基于令牌的 TP-TDMA 协议时延性能分析

在 TP-TDMA 协议中,节点发送分组的时隙长度和时帧长度同 TDMA 协议一样,分别为  $T_{\text{slot}}$  和  $T_{\text{frame}}$ 。每个时隙内最大可发送分组数为  $\mu T_{\text{slot}}$ ,等于时隙内划分的微时隙个数  $M$ 。当某节点在时隙内需要发送的分组数小于  $M-2$  个时,立即向业务量最大的节点发出令牌。某一节点发出令牌的概率为:

$$P_{\text{token}} = \sum_{k=0}^{M-3} \frac{(\lambda T_{\text{frame}})^k}{k!} e^{-\lambda T_{\text{frame}}}, k=0,1,\dots \quad (18)$$

将令牌传递过程消耗的时间近似为一个微时隙,则业务量最大的节点收到令牌后,获得的平均时隙长度为:

$$T_{\text{remain}} = \sum_{k=0}^{M-3} P(k) \frac{\mu T_{\text{slot}} - (k+1)}{\mu} \quad (19)$$

依据优先将令牌发送给业务量大的节点的原则,节点在  $T_{\text{frame}}$  内产生的分组数越多,收到令牌的可能性越大,当节点产生  $K$  个分组后得到令牌的概率  $P_{\text{ring}}(K) \propto F(K)$ ,其中  $F(k)$  为  $P(k)$  的概率分布函数,取  $P_{\text{ring}}(k)$  为:

$$P_{\text{ring}}(k) = \sum_{k=0}^K P_{\text{token}} P(k) \quad (20)$$

对于获得令牌的节点来说,收到不同节点传送的令牌时,发送分组提前的程度不同。例如,系统有  $M$  个节点,第  $l$  个节点收到第  $i$  个节点发送的令牌。如果第  $l$  个节点是第  $i$  个节点的后一个节点,则对于第  $l$  个节点的所有分组来说,发送提前了  $T_{\text{remain}}$ ;如果第  $l$  个节点是第  $i$  个节点后的  $M-1$  个节点,则对于第  $l$  个节点的中被发送的分组,发送提前了  $(M-2)T_{\text{slot}} + T_{\text{remain}}$ ,其它分组提前了  $T_{\text{remain}}$ ,即发送令牌的节点和目的节点的相对位置不同,分组提前发送跳过的时隙数不同,对被发送的分组而言是跳过了两节点间隔的时隙数与获得的时隙长度之和,而对于排队的其它分组而言是节约了提前所发送的分组包占用的时间。由于节点收到其它节点令牌的概率相同,跳过的时隙数从  $0 \sim N$  均匀分布。取提前的时隙数为  $\frac{N}{2}T_{\text{slot}}$ ,因此分组在队列中的平均排队时间为:

$$T''_{\text{queue}} = (1 - P_{\text{ring}})T_{\text{queue}} + P_{\text{ring}}(1 - P_{\text{miss-ring}})[T_{\text{queue}} - T_{\text{remain}} - \sum_{m=1}^{\infty} P_m \frac{mN}{2}T_{\text{slot}}] \quad (21)$$

## 3 仿真分析

### 3.1 不同信道条件

由于短波信道属于时变色散信道,尤其以天波方式传输时,信道质量受电离层影响较大。将短波信道对分组传输的影响集中反应在信道误码率上,取信道误码率  $10^{-5}$  到  $10^{-1}$  几个数量级,代表信道质量从优到差的情况,对各协议的时延大小进行仿真。其它仿真条件:节点数目 12 个,TDMA 协议时隙大小 1 s,HFTP 协议令牌最大持有时间 1 s,分组产生速率为 1,发送速率 20。时延  $T$  随信道误码率  $P_e$  变化的曲线见图 5。

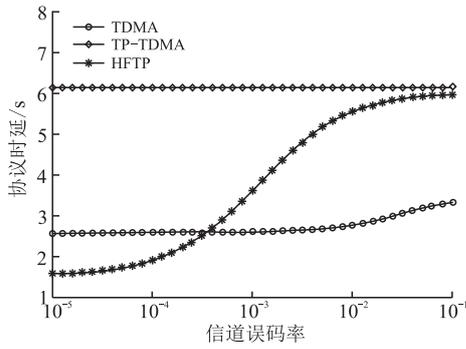


图 5 T 随  $P_c$  变化的曲线

Fig.5 The curve of  $T$  changed with  $P_c$

由图 5 可以看出, HFTP 协议随着信道误码率的增大, 时延迅速上升, 尤其当误码率介于  $10^{-4}$  到  $10^{-2}$  之间, 时延上升速度更快, 这个区间正好是短波信道由极差到很好的变化范围。TDMA 协议由于信道的占用不需要交换信息包, 在不要求分组重传的情况下, 分组时延与信道质量无关, 但由于浪费了大量空闲时隙, 时延保持在较高水平。TP-TDMA 协议中, 节点不仅可以在属于自己的时隙内发送分组, 也能通过传递令牌发送分组, 但误码率升高可能使得令牌发送失败, 导致时延增加。与 HFTP 协议不同的是, TP-TDMA 协议时延明显增加的误码率区间大约为  $10^{-2}$  到  $10^{-1}$ , 这是因为 HFTP 协议中, 令牌传输失败将增加所有后续节点的传输分组时间, 而 TP-TDMA 协议即使令牌传输失败, 仍然可以在自己的时隙内传输分组, 所以对误码率的反应没有 HFTP 协议那样敏感。总体上, TP-TDMA 协议的时延约为 TDMA 协议的一半, 在误码率大于  $5 \times 10^{-3}$  后, TP-TDMA 协议时延与 HFTP 协议相比有较大改善。

### 3.2 不同网络规模

使短波信道处于良好的通信状态, 信道误码率取  $10^{-3}$ , TDMA 协议时隙大小 1 s, HFTP 协议令牌最大持有时间 1 s, 分组产生速率为 1, 发送速率 20。以节点数目  $N$  为变量, 研究协议的时延性能。

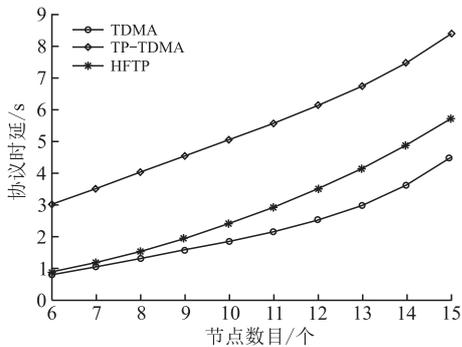


图 6 T 随  $N$  变化的曲线

Fig.6 The curve of  $T$  changed with  $N$

由图 6 可以看出, 随着节点数目的增加, 3 种协议的时延都增大。HFTP 协议中节点发送一次分组需要等待的令牌传递次数增加, 令牌丢失的可能性增大, 时延增加的幅度逐渐增大; TDMA 协议中时隙长度增大, 并且由于空闲时隙浪费, 使得时延始终处于一个较高的位置; TP-TDMA 协议由于空闲时隙的利用, 时延始终小于 TDMA 和 HFTP 协议。总之, 在信道条件一样, 且网络规模一样的情况下, TP-TDMA 协议可以获得更低的时延性能。

### 3.3 不同速率比

定义网络负载比为所有节点产生分组速率的总和与信道发送速率的比值, 表示为  $\rho$ , 以产生分组速率为变量, 发送分组速率为 20 个/s。其它仿真条件: 节点数目 12 个, 信道误码率 TDMA 协议时隙大小 1 s, HFTP 协议令牌最大持有时间 1 s, 信道误码率取  $10^{-3}$ , 结果见图 7。

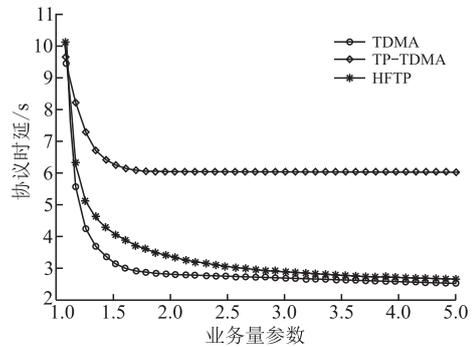


图 7 T 随  $\rho$  变化的曲线

Fig.7 The curve of  $T$  changed with  $\rho$

由图 7 可以看出, 当  $\rho$  非常靠近 1 时, 分组产生的速率很大, 超过了网络的负载能力, 网络处于拥挤状态, 此时, 3 种协议的时延都非常大; 随着  $\rho$  逐渐增加, 系统处于正常工作状态, 协议时延迅速减小, 且 TP-TDMA 协议时延小于 TDMA 协议和 HFTP 协议; 当  $\rho = 2$  附近, 即分组发送速率约为产生速率约 2 倍时, 时延趋于稳定, TP-TDMA 协议时延较 TDMA 协议大幅减少了约 50%, 较 HFTP 协议减少约 10%。总体上, TP-TDMA 协议在相同负载条件下时延小于 TDMA 协议和 HFTP 协议, 也说明了如果系统工作在较稳定的状态, 网络负载最好不要超过最大负载量的 1/2。

## 4 结语

本文针对短波天波信道的特点, 结合 TDMA 协议和 HFTP 协议, 提出了一种适用与短波信道的 TP-TDMA 协议, 并通过解析的方法分析了协议的时延性能。仿真结果证明该协议与 TDMA 协议和

HFTP 协议相比,在信道误码率大于约  $5 \times 10^{-3}$ ,以及相同网络规模和相同负载 3 种场景下,都具有更好的时延性能。说明 TP-TDMA 协议适用于短波网络,且具有优异的性能。

#### 参考文献(References):

- [1] 景渊,曹鹏,黄国策,等.短波令牌环协议排队模型的分析与优化[J].计算机工程,2011,37(2):75-84.  
JING Yuan,CAO Peng,HUANG Guoce,et al. Analysis and Optimization of Queuing Model in HFTRP [J]. Computer Engineering, 2011, 37(2): 75-84. (in Chinese)
- [2] 胡中豫.现代短波通信[M].北京:国防工业出版社,2005:2-140.  
HU Zhongyu .The Modern Short Wave Communication [M].Beijing:The National Industry Press,2005 : 2-140. (in Chinese)
- [3] MIL-STD-188-110C.Interoperability and Performance Standard for Data Modems[S].Washington DC: Department of Defense Interface Standard,2011.
- [4] Furman W N, Nirto J. On-Air Testing of a Wideband HF Data Modem [C]//Proceedings of The Nordic Shortwave Conference. Edinburgh,2009: 74-76.
- [5] J W Nieto, W N Furman. Investigating the Effects of Interleaver Size and FEC Code Constraint Over-the-Air for the US MIL-STD-188-110C Appendix D WB-HF Waveforms [R]. York:HFIA, 2012.
- [6] 毛建兵,毛玉明,冷甦鹏,等.基于 802.11 的多信道 MAC 协议性能分析[J].计算机研究与发展,2009,46(10):1652-1659.  
MAO Jianbing, MAP Yuming, LENG Supeng,et al. Performance Analysis of Multi - Channel MAC Schemes Based on 802.11 [J]. Journal of Computer Research and Development, 2009,46(10):1652-1659. (in Chinese)
- [7] 李瑞芳,李仁发,罗娟,等.DSMAC:一种适于无线多媒体传感器网络的信道接入协议[J].计算机研究与发展,2009,46(12): 2014-2023.  
LI Ruifang, LI Renfa, LUO Juan, et al. DSMAC: Media Access Control Protocol for Wireless Multimedia Sensor Network [J]. Journal of Computer Research and Development, 2009,46(12): 2014-2023. (in Chinese)
- [8] JongKwan Lee, HongJun Noh, Jaesung Lim.A Co-operative TDMA MAC Protocol Using Dynamic Slot Assignment Scheme[J]. IEEE ICOIN,2013,5(13): 216-220.
- [9] 姜之一.第三代短波通信组网研究与实现[D].西安:西安电子科技大学,2007.  
JIANG Zhiyi. Research and Implementation of the Third-Generation HF Communication Network [D]. Xi'an: Xidian University,2007. (in Chinese)
- [10] Eric E Johnson, Gary Anaya, Zibin TANG, et al. Performance of the HF Token Protocol [J]. IEEE MIL-COM 2004, 2004, 2(1): 1021-1027.
- [11] 梁俊,田斌,全海波,等.一种支持 QoS 的 D-TDMA 协议性能分析与仿真[J].空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(1):59-63.  
LIANG Jun, TIAN Bin, TONG Haibo, et al. Performance Analysis and Simulation of the D-TDMA Protocol Supporting QoS [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2010, 11(1): 59-63. (in Chinese)
- [12] M Balakrishnan, E E Johnson. Queueing Analysis of DCHF and Token-Passing Protocols with Varying Turnaround Time [C]//IEEE International Conference on Performance, Computing & Communication. IEEE Press,2004:315-316.
- [13] 李西洋,范志平.移动自组织网络中的多信道 MAC 调度码的设计与分析[J].通信学报,2014,35(5): 57-69.  
LI Xiyang, FAN Zhiping. Design and Analysis of Multi-Channel MAC Scheduling Code for Mobile Ad hoc Network [J]. Journal on Communication, 2014, 35(5): 57-69. (in Chinese)
- [14] 梁欢,赵凯瑞. TDMA 原理在机载数据采集系统中的应用[J].计算机科学,2013,40(11):13-25.  
LIANG Huan, ZHAO Kairui. Application of TDMA Theory in Data Collection System Onboard [J]. Computer Science, 2013,40(11):13-25. (in Chinese)
- [15] 周得敏,刘芸江,李曼,等.一种基于令牌的短波网动态 TDMA 协议设计与仿真[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2015,27(5):595-601.  
ZHOU Demin, LIU Yunjiang, LI Man, et al. Design and Simulation of a Dynamic TDMA Protocol Based on Token for HF Network [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunication: Natural Science Edition, 2015, 27(4): 595-601. (in Chinese)
- [16] Eric E Johnson, Eric Koski, William N Furman, et al. Third-Generation and Wideband HF Radio Communications [M]. Boston: Artech House, 2013.
- [17] 贺骁,刘芸江,李曼,等.基于令牌的短波地空 IP 网络接入控制协议[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2015,27(5):0762-0769.  
HE Xiao, LIU Yunjiang, LI Man, et al. Access Control Protocol Based on Token in High Frequency Ground-to-Air IP Network [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunication: Natural Science Edition, 2015, 27(5): 762-769. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)