

一种联合功率域的 SPMA 协议性能改进策略

方 宇, 吕 娜, 陈柯帆, 陈 卓

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 为满足协同打击数据链严苛的低时延、高速率、高可靠性等战术信息传输性能要求, TTNT 数据链的 SPMA 协议基于随机竞争思想, 综合使用时分和频分接入策略, 降低不同用户信息发送的信道碰撞概率, 但高负载情况下的冲突解决效果仍不理想, 网络性能无法满足协同攻击要求。借鉴 NOMA 技术利用功率的差异同时多路传输信号的思想, 在 SPMA 协议时、频域基础上引入功率域, 提出一种联合功率域的 SPMA 协议性能改进策略, 达到扩展数据链网络的信道资源、进一步减小信息碰撞概率的目的。建模分析及仿真结果表明, 采用该改进策略可以使数据链网络承载更大的业务流量, 有效提高了网络吞吐量, 降低网络时延。

关键词 数据链; NOMA; SPMA; 碰撞概率; 吞吐量

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.01.015

中图分类号 TN92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)01-0092-07

A Performance Improvement Strategy of SPMA Protocol Based on Joint Power Domain

FANG Yu, LYU Na, CHEN Kefan, CHEN Zhuo

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

Abstract Aimed at the problem that the conflict resolution effect under high load conditions is still not ideal, and the network performance cannot meet the requirements of cooperative attacks, this paper draws on the idea of using the power difference of NOMA technology to multiplex signals simultaneously, and introduces the power domain on the basis of the SPMA protocol time and frequency domain. For this, the paper proposes a strategy for improving the performance of the SPMA protocol in the joint power domain, expanding the channel resources of the data link network and achieving the goal of reducing further the probability of information collision. The results show that the improved strategy makes not only the data link network carry more business traffic, but also effectively improves network throughput and reduces network delay.

Key words data link; NOMA; SPMA; the probability of collision; throughput

作为网络中心战的关键通信技术, 数据链将传感器平台、武器平台以及指挥平台有效互联为一个战术网络, 通过各平台战术信息的高效交互, 实现平台优势互补, 形成体系作战能力^[1]。从 Link 系列数

收稿日期: 2020-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(62072370, 61703423)

作者简介: 方 宇(1995—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士生, 研究方向: 航空数据链。E-mail: 1742398766@qq.com

通信作者: 吕 娜(1970—), 女, 陕西西安人, 教授, 研究方向: 航空数据链、通信网络。E-mail: lvna2007@163.com

引用格式: 方宇, 吕娜, 陈柯帆, 等. 一种联合功率域的 SPMA 协议性能改进策略[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(1): 92-98. FANG Yu, LYU Na, CHEN Kefan, et al. A Performance Improvement Strategy of SPMA Protocol Based on Joint Power Domain[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(1): 92-98.

据链的信息分发共享到 TTNT、CEC 数据链的协同打击,数据链的信息交互性能需求随作战形态的变化而不断提高^[2]。

TTNT(tactical targeting network technology, TTNT)数据链面向动目标的实时探测和精确打击,战术信息传输时延极低(小于 2 ms)、传输速率高(传输速率大于 2 Mbps)、可靠性高(最高优先级成功传输概率大于 99%)、吞吐量高(大于 10 Mbps)^[3]。针对战术信息传输的严苛要求,TTNT 数据链采用基于随机竞争信道接入技术的 SPMA(statistic priority-based multiple access, SPMA)多信道 MAC 协议,综合时间域和频率域扩展可用信道资源,大幅降低交互过程中的战术信息碰撞概率^[4]。但作为一种随机多址接入技术,SPMA 协议未完全解决信息碰撞问题,高负载情况下的碰撞现象仍十分严重,导致高优先级信息的可靠性、时延远低于性能要求,同时带来低优先级信息无法使用信道发送的饿死现象,网络吞吐量不能达到设计性能要求,信道利用率迅速降低^[5-6]。

关于降低 SPMA 协议碰撞概率、提高信道利用率的研究已有一段时间。文献[7]提出一种多优先级单阈值接入控制协议,可以增加无人机电网络的信道利用率,提高数据传输成功率和吞吐量。文献[8]设计出一种混合式信道负载统计方法,有效地降低了信道冲突,保证了战术信息发送的实时性和高优先级信息较高的成功传输概率。文献[9]设计一种新的动态回避算法提升网络吞吐量。但这些研究并未突破 SPMA 协议的时域和频域信道资源基础。

近年来提出的非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NOMA)技术可以在功率域对相同

时频资源块上信号进行区分,为解决随机多址接入的信号碰撞问题提供新的思路,相关研究已逐步展开。文献[10]提出将 NOMA 技术与 ALOHA 相结合的思想,分析系统的吞吐量与丢包率等指标,仿真结果说明系统性能得以显著提升。文献[11]分析了将 NOMA 技术应用在时隙 ALOHA 中的性能,并推导了系统的各项性能的解析表达式。文献[12]将博弈论思想应用到 ALOHA-NOMA 中,为提升随机多址接入技术性能提供了新的研究方法。

NOMA 技术对随机多址接入系统的性能具有提升作用。因此,本文借鉴 NOMA 技术思想^[13-14],针对 SPMA 协议高负载情况下信道利用率迅速降低的问题,提出联合功率域的 SPMA 协议(sPMA based on joint power domain, SPMA-JPD)的改进接入策略。SPMA-JPD 协议引入功率参数,通过给同时同频信号分配不同的发送功率,使用户信号进一步在功率域得以区分,将信道资源域扩展到时、频、功率三域,增加了数据链网络的可用信道资源,从而在降低高优先级信息碰撞概率的同时可增加低优先级信息发送概率,提高了信道利用率。仿真结果表明,采用该改进策略的 SPMA-JPD 协议可承载更大的网络流量,有效提高了网络吞吐量,降低了网络时延。

1 SPMA-JPD 协议的接入策略改进

1.1 SPMA 协议接入策略描述

SPMA 协议采用随机竞争时间域基础上划分频率域的多信道接入策略^[15],其基本接入控制机制如图 1 所示。

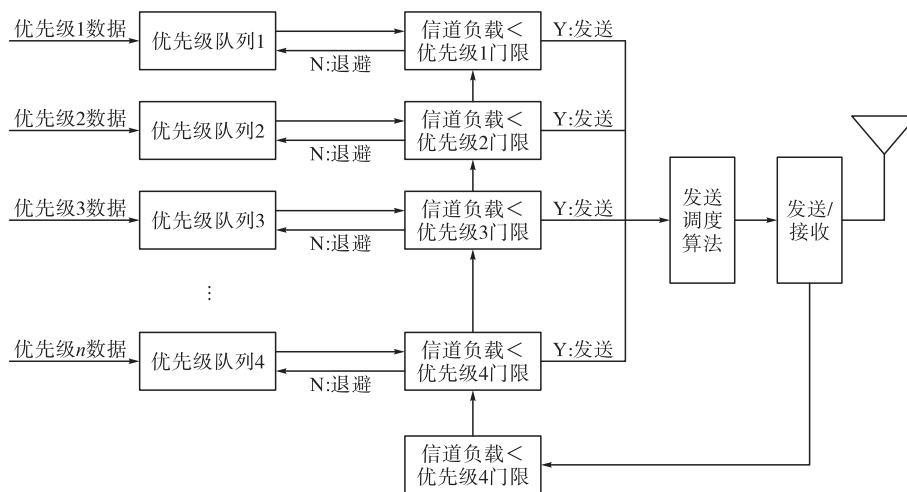


图 1 SPMA 协议接入控制机制框图

SPMA 协议通过将用户战术信息分散到不同频点的多个信道上并行发送,从而有效降低信号的

碰撞概率。然而由于频谱资源有限,在高负载时,系统仍然无法承载全部的业务信息。为此,SPMA 协

议根据作战紧急关系将战术信息划分为不同的优先等级,当信道资源无法满足全部业务信息时,规定高优先级信息优先接入和使用信道资源,保障紧急信息的可靠传输。

如图 2 所示,与单信道的随机竞争 CSMA 协议相比,SPMA 协议通过多信道发送机制,增加了信道资源,使网络吞吐量得到了有效提高。同时,图 2 中 SPMA 协议的吞吐量曲线稳定性也优于 CSMA 协议。这主要在于 SPMA 协议的优先级区分机制,即吞吐量达到饱和后,由于机制对低优先级战术信息的“发送抑制”,信道资源首先让给了高优先级战术信息,不同优先级信息有序发送,使网络吞吐量保持稳定。但是,从图 2 中可以看出,随着业务负载的持续增加,当负载高到一定程度时,SPMA 协议的吞吐量仍存在下降。说明高优先级信息开始出现碰撞,并导致低优先级信息始终无法使用信道资源,直至最后“饿死”。

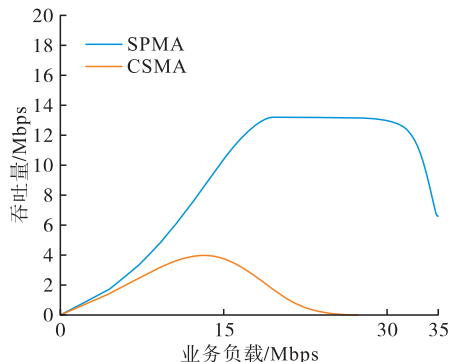


图 2 随机多址接入技术负载与吞吐量关系图

因此,从进一步改善 SPMA 协议吞吐量稳定性,减缓高负载情况下吞吐量下降趋势的角度,SPMA-JPD 协议主要对 SPMA 协议中的信号发送机制与信道检测机制进行改进。

1.2 信号发送机制的改进

SPMA-JPD 协议的信号发送机制改进基于 SPMA 协议的多信道发送机制。图 3 为 SPMA 协议信号发送的时频关系图。在发送端,节点发送的信息按照协议规则被分为多个一定长度的小数据包,发送调度算法给不同小数据包赋予随机的时间和频率后,将这些小数据包以图 3 所示时频域形式在信道中发送;在接收端,采取相应的时频域关系接收、解析小数据包并恢复信息。分析 SPMA 协议的信号发送机制发现,由于分布式拓扑结构,每个网络节点的发送调度算法随机分配给本节点小数据包的发送时间和频率不可能完全正交,即不同节点发送信号的时频关系图可能重叠,同时同频的不同用户数据包在接收端重叠,从而导致碰撞现象的出现。业务负载越高问题将越明显。

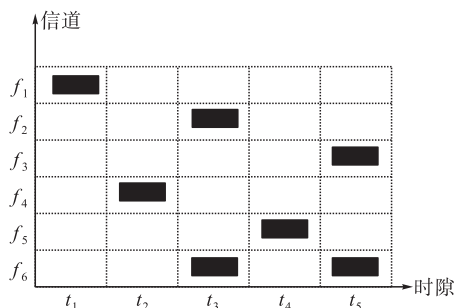


图 3 SPMA 协议时频关系图

针对 SPMA 协议发送机制中的上述问题,参考 NOMA 技术的思想,SPMA-JPD 协议改进信号发送机制,令同频同时信号根据信号功率的差异进一步进行功分。SPMA-JPD 协议在给小数据包分配不同频率与时间的基础上,增加功率分配参量,同时赋予其不同的发射功率。改进 SPMA 协议的发送调度算法具体表述为:首先,根据收发信机功率性能参数,在调度算法中设置 N_p 个不同的可调功率;其次,设计相应的功率分配算法;最后,扩展调度算法的信号发送参数分配机制,联合时间、频率和功率发送数据包。由于 SPMA 协议在接收端无法在功率域上对数据包进行区分,SPMA-JPD 协议需要在接收端添加相应的串行干扰删除(successive interference cancellation, SIC)接收机制,以正确解码不同功率的数据包。SIC 为 NOMA 技术的解码手段,其解码思想为先对功率最大的数据包进行解码,将其其他数据包当作干扰信号处理。在成功解调出功率最大的数据包后,在叠加的数据包中减去已被解调出的数据包,对剩余的数据包再次重复之前的解码过程,直到全部数据包被成功解调为止。考虑到叠加的不同功率数据包越多,SIC 接收解码难度越大,功率数 N_p 不宜设置过多。

通过改进 SPMA 信号发送机制,SPMA-JPD 协议可以使战术信息在时间域、频率域、功率域 3 个维度进行传输,有效降低高负载时的碰撞概率,改善吞吐量的持续稳定性。

1.3 信道检测机制的改进

信道检测机制主要用于判断信道空闲状态或使用情况,判断结果直接关系节点信号的发送机制实施,影响网络吞吐量。由于 SPMA-JPD 协议信号发送机制的改进,其信道检测机制也需要进行对应改进。SPMA-JPD 协议继续采用 SPMA 协议的信道侦听方式进行检测,但在 SPMA 协议“软侦听”的基础上增加“硬侦听”。

SPMA 协议通过对一段时间内不同频率信道的信号脉冲数目的统计进行“软侦听”,并以此为依据确定信道的忙闲状态。如 Δt 时间内侦听到 f_i 频

率的信号脉冲数为 n_i , 记为 (f_i, n_i) 。SPMA 协议侦听时仅对脉冲的频率加以区分, 并不考虑信号功率的大小。

直接采用 SPMA 协议的信道检测机制, 会导致 SPMA-JPD 协议无法充分发挥功率域上的优势, 导致即使网络中存在空闲的功率域资源, 但因无法被感知而白白浪费, 因此 SPMA-JPD 协议在侦听信道中信号脉冲个数的同时, 需要增加对脉冲信号功率的侦听(即硬侦听)。假设网络中各用户间信道状态信息已知, 则可以通过侦听到信号的功率及一定的算法对信号发射功率进行推测, 并根据发射功率的不同对每一个频率的信号脉冲数进行二次统计。如 Δt 时间内 SPMA-JPD 协议侦听到 f_i 频率的信号脉冲数共 n_i , 其中发射功率为 P_j 的信号脉冲分别为 n_j , 则记为 (f_i, P_j, n_{ij}) 。

2 SPMA-JPD 协议建模分析

2.1 SPMA-JPD 协议模型

本文中假设各个节点之间均为单跳传输, 网络中战术信息具有多个优先级且在满足泊松分布。在分析 SPMA-JPD 协议时, 可以参考对 SPMA 协议的分析方法。结合排队论的知识, SPMA 协议模型如图 4 所示, 可以将其抽象成 M/G/1 优先级排队模型后再进行理论分析^[16]。

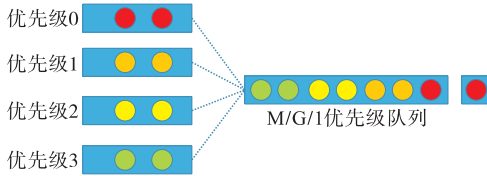


图 4 SPMA 协议模型

SPMA-JPD 协议同样可以用排队论的知识对其分析。与 SPMA 协议不同的是, 在 SPMA-JPD 协议中, 战术信息根据其发射功率需要排不同的队列, 将之前的单条队列变为多条队列。考虑到 SIC 技术对多功率叠加信号进行解调时, 信号越多, 解调难度越大, 为方便分析, 本文假设发射机预先设定 2 个功率。SPMA-JPD 的协议模型如图 5 所示。

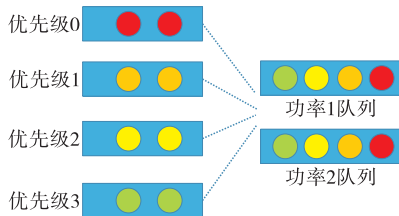


图 5 SPMA-JPD 协议模型

2.2 时隙传输概率分析

假设优先级为 m 的战术信息服从到达率为 λ_m

的泊松分布, 则在那么在时间段 t 中有 k 个优先级为 m 的战术信息的概率为:

$$g_m(k, t) = \frac{e^{-\lambda_m t} (\lambda_m t)^k}{k!} \quad (1)$$

由于 SPMA-JPD 协议需要保证高优先级的战术信息先发送, 其排队方式为抢占式, 即高优先级的战术信息到达时, 如果存在低优先级的战术信息正处于回退过程等待发送时, 高等级的战术信息会抢占低等级战术信息的位置, 而低等级的战术信息将取消回退过程。本文设定不同 2 个发射功率, 每条战术信息的发送功率满足两点分布。对于一个优先级为 m 的战术信息来说, 在 t 时间内没有比其更高级的同功率战术信息到达的概率可以表示为:

$$f_m(k, t) = \begin{cases} \prod_{j=0}^{m-1} C_2^j g_j(0, t) + 0.5, & m \geq 1 \\ 1, & m = 0 \end{cases} \quad (2)$$

假设优先级 0 为最高优先级。优先级 0 的回退永远不会中断。如果在处理期间内没有优先级更高的战术信息出现, 则优先级为 m 的战术信息的平均服务时间应为:

$$\bar{X} = \sum_{s=1}^K l_s \gamma_m^s \prod_{S=1}^K y^{(m)}(l_s) \quad (3)$$

式中: l_s 为回退窗长; γ_m 优先级为 m 的战术信息的回退概率; K 为最大回退次数。优先级为 m 的战术信息经 n 次回退后成功发送的概率为:

$$\phi_n^{(m)} = \gamma_m^n \prod_{S=1}^n y^{(m)}(l_s) (1 - \gamma_m) \quad (4)$$

由式(4)可以得出, 战术信息没有被抢占, 则可以成功发送的概率为:

$$P_{\text{sent}}^{(m)} = \sum_{j=0}^K \phi_j^{(m)} \quad (5)$$

根据 M/G/1 排队论理论可知, 优先级为 m 的战术信息正在发送中的概率为:

$$p_m = \frac{\lambda_m \bar{X}_m}{\sum_{j=0}^K \lambda_j \bar{X}_j} \quad (6)$$

根据式(3)、式(5)~(6), 时隙传输概率可以表示为:

$$p_{\text{STP}} = \sum_{j=0}^{P_{\text{max}}} p_m p_{\text{sent}}^{(m)} \frac{1}{\bar{X}_m} \quad (7)$$

假设战术信息被成功发送的概率为 p_{out} , 则信道检测窗口内出现 k 条战术信息的概率可以表示为:

$$P(N = k) = C_n^k p_{\text{out}}^k (1 - p_{\text{out}})^{n-k} \quad (8)$$

当优先级 m 的战术信息设定的阈值小于检测到信道中的脉冲数时, 该战术信息将进入回退状态。假设优先 m 的战术信息对应的阈值为 R_m , 根据式

(8)可以得出其回退概率为:

$$\gamma_m = 1 - \sum_{k=0}^{R_m} P(N=k) \quad (9)$$

根据式(7)和式(9)可以得出,存在以下关系式:

$$P_{\text{out}} = \Gamma(P_{\text{STP}}) \quad (10)$$

对式(10)进行仿真,即可得出网络的时隙传输概率。

2.3 吞吐量分析

假设网络中存在 $node_{\text{NUM}}$ 个节点,每个节点发送战术信息时,会随机在 2 个功率中选取发射功率。当进行信道编码时,一条战术信息会被分成 N_b 个小数据包,在 N_f 个频点上随机发送,每个时隙的长度为 l_{slot} 。由此可以得出,在单个信道内,每秒会出现的小数据包的个数为:

$$\lambda = \frac{node_{\text{NUM}} N_b P_{\text{out}}}{2 l_{\text{slot}} N_f} \quad (11)$$

假设一个小数据包的长度为 l_b ,在单个信道内,如果 2 个小数据包的发送时间间隔小于小数据包长度,2 个小数据包就会发生碰撞。小数据包未发生碰撞,可以被成功解调的概率为:

$$P_{bs} = e^{-2l_b \lambda} \quad (12)$$

由于 SPMA-JPD 协议采用 Turbo 码的方式进行编码,接收方成功接收至少一半的小数据包才能对战术信息进行恢复,单条战术信息传输成功的概率可以表示为:

$$P_s = \sum_{m=N_b/2}^{N_b} C_{N_b}^m P_{bs}^m (1 - P_{bs})^{N_b-1} \quad (13)$$

假设每条战术信息的长度为 L ,由式(10)、(13)可以求出网络的吞吐量:

$$Throughput = \frac{N_{\text{node}} P_s P_{\text{STP}} L}{l_{\text{slot}}} \quad (14)$$

2.4 平均时延分析

网络中优先级为 m 的战术信息的平均时延可以表示为:

$$E(T_s^{(m)}) = E(D_m + X_m + I_m + T_p + T_t) \quad (15)$$

式中: D_m 是优先级为 m 的战术信息的等待时间。由于在网络中存在多个优先级的战术信息,优先级为 m 的战术信息需要等高优先的战术信息全部发送后才能进行发送。根据 M/G/1 排队论理论可知:

$$E(D_m) = \frac{\sum_{n=0}^m \rho_n E(A_m)}{(1 - \sum_{n=0}^m \rho_n)(\sum_{n=0}^{m-1} \rho_n)} \quad (16)$$

式中: $\rho_m = \lambda_m \bar{X}_m$; A_m 为战术信息的平均残留服务时间,可以如下求出:

$$E(A_m) = \frac{E(X_m^2)}{2E(X_m)} \quad (17)$$

式中: $E(X_m)$ 可由式(3)求出。

I_m 表示由于 SPMA-JPD 协议的抢占式排队造成的优先级为 m 的战术信息的等待时间。当优先级为 m 的战术信息正在排队进行发送时,如果有高优先级的战术信息到达,会抢占该战术信息的位置进行发送,而低优先级的战术信息须进入回退状态。根据抢占式排队理论可知:

$$E(I_m) = \frac{E(X_m)}{1 - \sum_{n=0}^m \rho_n} \quad (18)$$

T_p 表示战术信息发送过程中需要的时间。假设单条战术信息被拆分成 N_b 个小数据包,每个时隙长度为 l_{slot} ,单条战术信息长度为 L ,则战术信息所需的发送时间可表示为:

$$T_p = \frac{(N_b - 1)l_{\text{slot}}}{P_{\text{out}} N_b} + L \quad (19)$$

T_t 为战术信息在两节点间的传输时间,其大小与节点间距离有关。假设节点间距离为 D ,则传输时间可表示为:

$$T_t = \frac{D}{c} \quad (20)$$

根据以上公式即可求出平均时延。

3 仿真分析

本文采用 Matlab 平台对 SPMA-JPD 协议进行仿真。假设 P_1 、 P_2 为 2 个不同的功率,且发射机在发送信号时会随机选取其中一个作为自身的发送信号。在仿真时为网络中战术信息设定了 4 个优先级,分别为优先级 0~优先级 3,数字越小表示该优先级等级越高,对应的阈值分别为 22,18,14,10。这 4 种不同优先级战术信息满足泊松分布,到达率之比为 $\lambda_0 : \lambda_1 : \lambda_2 : \lambda_3 = 1 : 2 : 3 : 4$,其他的仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

仿真参数	值
频点数 N_f	5
单条战术信息拆分小数据包个数 N_b	28
时隙长度 $l_{\text{slot}}/\mu\text{s}$	20
单条战术信息长度 L/bits	1 000
退避窗长 $l_s/\mu\text{s}$	40
节点间距离 D/km	100

3.1 传输成功率

图 6 为不同优先级战术信息的传输成功概率。从图中可以看出,高优先级的战术信息具有更高的传输成功概率。随着业务负载的增加,传输成功概率在不断降低,且优先级低的战术信息传输成功率下降的更快。不难看出,当高负载时,网络牺牲了低

优先级的战术信息的传输来保障高优先级的战术信息正常传输。使用 SPMA-JPD 协议可以保证最高优先级的序列在业务负载为 11 Mbps 以下时,达到 99% 的传输成功率。可以看出,SPMA-JPD 协议可以以协议 TTNT 数据链高可靠性的要求。

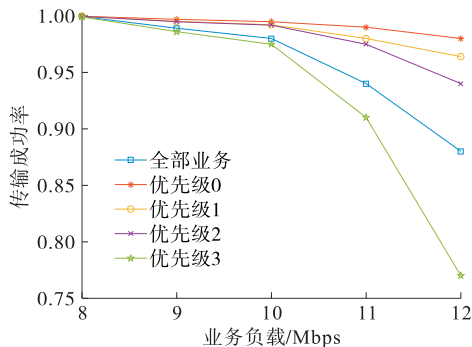


图6 各优先级数据传输成功率

3.2 网络吞吐量

图7所示为当节点数为10时,网络中不同优先级战术信息的吞吐量。从图中可以看出,当业务负载达到12 Mbps时,网络已经不能再承载优先级为3的战术信息,此时网络已经达到饱和。达到饱和时网络的吞吐量约为11 Mbps。

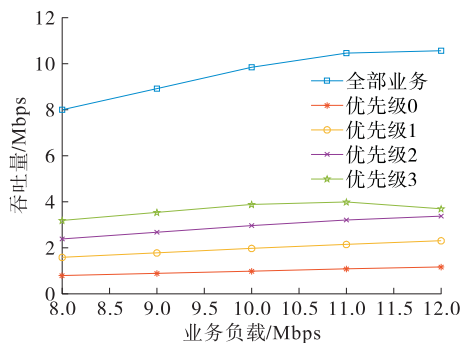


图7 各优先级数据吞吐量

图8对比了 SPMA-JPD 协议与 SPMA 协议的吞吐量,从图中可以看出,在低负载时,SPMA 协议与 SPMA-JPD 协议吞吐相相差不大,此时网络还没有达到饱和。当业务负载到达 9 Mbps 时,SPMA 协议达到饱和状态,网络中无法承载更多的业务流量。通过对比可以看出,SPMA-JPD 协议可以使网络承载更多的流量,且吞吐量有一定提升。

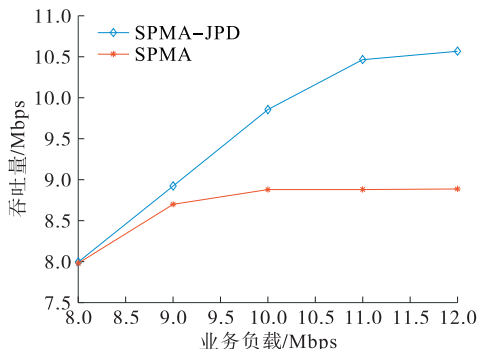


图8 SPMA-JPD 与 SPMA 吞吐量对比图

3.3 网络时延

图9所示为当节点数为10时,网络中不同优先级战术信息的时延。从图中可以看出,随着业务负载的不断增加,数据的时延也随之提升,且低优先级数据时延上升速度更快。从图中数据可以看出,当传输速率小于12 Mbps时,最高优先数据的时延始终在0.2 ms左右,最低优先级数据的时延在1.3 ms左右。与 SPMA 协议相比,SPMA-JPD 协议具有更低的传输时延,可以更好地满足 TTNT 数据链严苛的低时延要求。

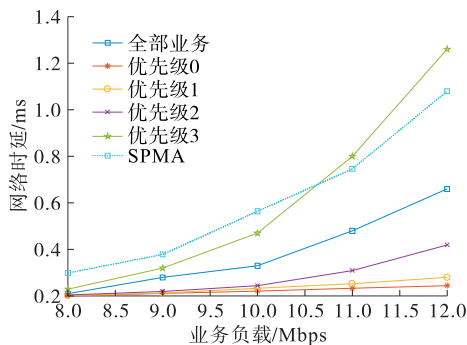


图9 各优先级数据的平均时延

4 结语

NOMA 技术作为 5G 的重要技术之一,可以有效缓解随机多址接入中的信息碰撞问题。针对 SPMA 协议高负载情况下,战术信息碰撞严重的问题,本文提出了一种联合功率域的 SPMA 协议性能改进策略。实验结果表明,该策略可以降低碰撞概率,使网络承载更多的业务流量,能够有效提高吞吐量、降低网络时延。

参考文献

- [1] 骆光明. 数据链—信息系统连接武器系统的捷径[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 吕娜,张岳彤,陈柯帆,等. 数据链理论与系统[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2018.
- [3] 黄振,周永将. 美军网络中心战的重要元素-协同数据链[J]. 现代导航,2017,8(1): 70-73.
- [4] FANG Z, ZHENG B, ZHAO W, et al. A Novel Statistical Multi-Channel Busy Recognition Mechanism in the MAC Layer for Airborne Tactical Networks[J]. IEEE Access, 2017, 5: 19662-19667.
- [5] FANG Z, QIU Q, DING Y, et al. A QoS Guarantee Based Hybrid Media Access Control Protocol of Aeronautical Ad Hoc Network[J]. IEEE Access, 2018, 6: 5954-5961.
- [6] LIU J, PENG T, QUAN Q, et al. Performance Analysis of the Statistical Priority-Based Multiple Access

- [C]//2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu, China: IEEE, 2018:30-35.
- [7] 陈少峰. 基于 SPMA 协议的混合式信道负载统计方法[J]. 现代导航, 2017, 8(1): 42-47.
- [8] 郑文庆, 金虎, 郭建蓬. 基于信道占用及优先级的 MAC 协议退避算法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(11): 80-84, 116.
- [9] 任智, 杨迪, 胡春, 等. 一种高信道利用率的无人机自组网单阈值接入协议[J/OL]. 计算机工程: 1-6. [2020-01-16]. <https://doi.org/10.19678/jissn.1000-3428.0056849>.
- [10] CHOI J. Throughput Analysis for Coded Multichannel ALOHA Random Access[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(8): 1803-1806.
- [11] MURTI F W, SIREGAR R F, SHIN S Y. SU-MIMO Based Uplink Non-Orthogonal Multiple Access for 5G[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2018, 110: 87-96.
- [12] YU W J, FOH C H, QUDDUS A, et al. Throughput Analysis and User Barring Design for Uplink NOMA-Enabled Random Access[J]. ARXiv, 2002: 03458.
- [13] BABICH F, COMISSO M, CUTTIN A, et al. Exploiting Capture and Interference Cancellation for Uplink Random Multiple Access in 5G Millimeter-Wave Networks[J]. Annals of Telecommunications, 2020, 75(6): 1-15.
- [14] WANG W D, AI-DHAHIR N, MINN H, et al. A Game-Theoretic Approach for Exploiting Multiuser Diversity in Cooperative Slotted Aloha[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 11(7): 4215-4225.
- [15] LIU Y F, JIN H, YU Q M, et al. Research on Transmission Waveform Structure and Rate Scaled of New Generation Data Link[C]//2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). Changsha, China: IEEE, 2017: 1686-1689.

(编辑: 徐楠楠)

(上接第 91 页)

- [10] TSAMARDINOS I, BROWN L F, ALIFERIS C F. The Max-Min Hill Climbing Bayesian Network Structure Learning Algorithm [J]. Machine Learning, 2006, 65(1): 31-78.
- [11] 刘浩然, 孙美婷, 李雷, 等. 基于蚁群节点寻优的贝叶斯网络结构算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 143-150.
- [12] DALY R, SHEN Q. Learning Bayesian Network Equivalence Classes with Ant Colony Optimization[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2015, 35(4): 391-447.
- [13] WANG T, YANG J. A Heuristic Method for Learning Bayesian Networks Using Discrete Particle Swarm Optimization[J]. Knowledge and Information Systems, 2010, 24(2): 269-281.
- [14] 刘浩然, 张力悦, 范瑞星, 等. 基于改进鲸鱼优化策略的贝叶斯网络结构学习算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(6): 1434-1441.
- [15] 高晓光, 邸若海, 郭志高. 基于改进粒子群优化算法的贝叶斯网络结构学习[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(5): 749-755.
- [16] 李冰寒, 高晓利, 刘三阳, 等. 利用互信息学习贝叶斯风格结构[J]. 智能系统学报, 2011, 6(1): 68-72.
- [17] MENG X B, GAO X. Z, LU L H, et al. A New Bio-inspired Optimization Algorithm: Bird Swarm Algorithm[J]. Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, 2015, 6(1): 1-15.
- [18] IBRAHIM A, HOSSAM F, SEYEDALI M. Evolving Neural Networks Using Bird Swarm Algorithm for Data Classification and Regression Applications[J]. Cluster Computing, 2019, 22(4): 10-16.
- [19] MNASRI S, NASRI N, VAL T. A New Multi-agent Particle Swarm Algorithm Based on Birds Accents for the 3D Indoor Deployment Problem[J]. ISA transactions, 2019, 91(1): 2-8.
- [20] WANG S T, LIU S Y, CHE X G. Recognition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Fluorescence Spectrometry Combined with Bird Swarm Algorithm Optimization Support Vector Machine [J]. Spectrochemical Acta Part A-Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 224(1): 12-18.
- [21] 王海羽, 刘浩然, 张力悦, 等. 基于节点块序列约束的局部贝叶斯网络结构搜索算法[J/OL]. 自动化学报. 2020, 46(6): 1210-1219.

(编辑: 徐敏)