

基于 TDMA 的联合自适应 B-ACK 与 ACM 的 MAC 协议

王智宇, 王科翔, 刘畅

(中国航空无线电电子研究所, 上海 200233)

[摘要] 采用自适应块确认 (B-ACK) 减轻频繁握手造成的长延时, 通过自适应编码和调制 (ACM) 来克服吞吐量下降的问题, 提出了基于时分多址 (TDMA) 的联合自适应 B-ACK 和 ACM 的 MAC 协议, 根据误包率变化, 自适应地调整节点接入网络的策略, 从而解决现阶段航空无线协同网络存在的吞吐量低和延迟大的问题。

[关键词] 自适应块确认; 自适应编码和调制; 时分多址; 延时; 吞吐量

[中图分类号] TP212.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1006-141X(2021)03-0030-07

Self-adaptive B-ACK and ACM MAC Protocols Based on TDMA

WANG Zhi-yu, WANG Ke-xiang, LIU Chang

(Chinese National Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: Adaptive block acknowledgement (B-ACK) is used to reduce the long delay caused by frequent handshake, and adaptive coding and modulation (ACM) is used to overcome throughput decline. This method can avoid the long time delay caused by frequent retransmission of data packets, overcome the throughput decline, and improve the efficiency of nodes accessing the aviation wireless cooperative network. According to the change of the packet error rate, the strategy of node access to the network is adaptively adjusted to solve the problems of low throughput and large delay in the current aviation wireless cooperative network.

Key words: block acknowledgement; adaptive coding and modulation; time division multiple access delay; throughput capacity

随着航空领域关键技术的高速发展, 航空无线组网越来越受到关注。然而, 航空无线通信协同网络节点之间的距离较远, 传播延时较大^[1], 使得发送节点在传输下一个数据包之前需等待较长时间, 从而影响吞吐量。长传播延时是航空无线协同网络的固有特性, 例如两架飞机之间的单向传播延时可能超过毫秒级。本文给出了不同传播延迟对地面网络与航空无线协同网络发送数据包的影响, 分别采

用两个节点, A 节点发一个包, B 节点回一个确认, 如图 1 所示。航空无线网络中的发送节点在发送等待数据包之前, 要花费较长时间等待, 使网络中数据包传输延迟明显增加。与地面通信网络相比, 固有的大传播延迟是航空无线协同网络介质访问控制协议 (MAC: Medium Access Control) 面临的一个巨大技术难题^[2]。

收稿日期: 2020-11-26

引用格式: 王智宇, 王科翔, 刘畅. 基于 TDMA 的联合自适应 B-ACK 与 ACM 的 MAC 协议 [J]. 航空电子技术, 2021, 52(3): 30-36.

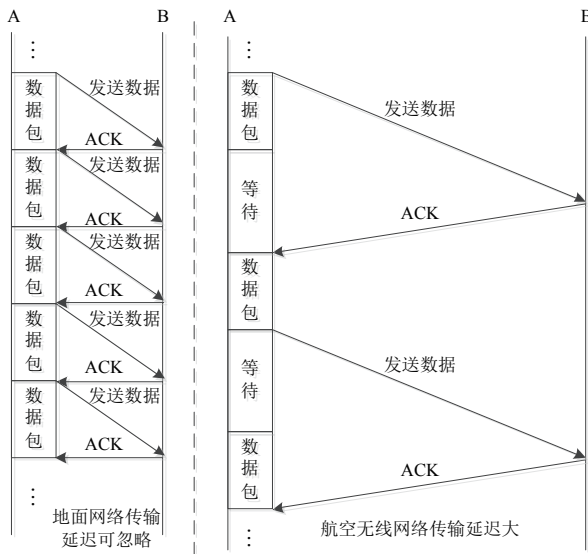


图 1 传播延迟对发送数据包的影响

另外, 由于航空无线协同网络链路信噪比波动大也是造成吞吐量低的一个原因, 现阶段的地面网络接入技术不能解决航空无线协同网络低吞吐量和大延迟的问题^[3]。所以需要采用新型的高效 MAC 协议技术。

航空无线协同网络大传播延迟特性决定了多节点接入应采用能实现信道共享功能但尽可能地减少收发的握手次数来降低系统时延的 MAC 协议。然而现阶段的 MAC 协议技术主要集中在采用各种基于时分多址 (TDMA: Time Division Multiple Access) 的混合方法来优化网络的接入效率, 而未充分考虑信道大传播延迟的重传时延对吞吐量和延时影响, 以及信噪比动态变化导致的网络吞吐量下降的情况^[4-5]。

本文重点研究基于 TDMA 的联合自适应 B-ACK 与 ACM 的 MAC 协议, 根据误包率变化自适应的调整节点接入网络的策略, 从而解决现阶段航空无线协同网络存在的吞吐量低和延迟大的问题。

1 MAC 技术基础

航空无线协同网络的一个基本特点是所有节点均通过长距离无线通信的方式传输信息, 传播具有广播特性, 通信链路之间的干扰和复杂的信道环境会对通信质量带来明显的影响。MAC 技术旨在解决多个用户之间如何更好地使用共享无线资源并提供流程支持。无线网络的 MAC 技术大体可分为两种模式: 固定分配和动态分配^[6]。现阶段常用的动态

接入方式均以时间顺序、一定的接入算法、时隙为单位, 即以固定分配的 TDMA 接入方式为基础。

2 ACK 机制

由于无线环境复杂多变, 在无线通信系统中常用确认与重传机制来提高系统的可靠性。在地面网络中, 主要有无确认^[7] (N-ACK)、立即确认 (I-ACK)^[8] 和块确认^[9] (B-ACK) 三种 ACK 机制。

B-ACK 机制在 IEEE 802.11e 中引入, 该特性在 IEEE 802.11n 中得到了进一步增强, 并与帧聚合机制一起应用。B-ACK 机制的发端连续发送多个数据帧后, 接收端仅反馈一个 ACK 帧, 来反馈这些数据帧是否被正确接收。B-ACK 是介于 N-ACK 和 I-ACK 之间的一种机制, 不仅能提高可靠性而且可以保持较高的吞吐量。

3 协议基本思想

本文设计的 MAC 协议的核心思想如图 2 所示。

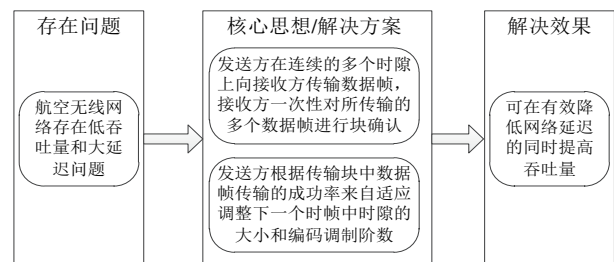


图 2 自适应 MAC 协议的核心思想

(1) 基于 TDMA 的自适应 B-ACK 技术

采用 TDMA 将信道划分为一个个时隙, 发送方在连续的多个时隙上向接收方传输数据帧, 接收方一次性对所传输的多个数据帧进行块确认, 发送方根据传输块中数据帧传输的成功率来自适应地调整块大小;

(2) ACM 技术

发送方根据 (1) 中块数据帧传输的成功率来自适应地调整编码调制阶数, 即让发送端发送数据包时根据不同的信道状态动态地调整数据包的调制编码方式, 可在保证吞吐量的情况下尽可能地提高信道的可靠性和降低数据包的重传概率, 这也有助于降低航空无线协同网络的延迟;

(3) 联合自适应协议

通过联合考虑基于 TDMA 的自适应 B-ACK 和 ACM 来克服航空无线协同网络固有的传播延迟、高链路误码及大信噪比波动导致的重传问题，从而解决现阶段航空无线协同网络接入存在的链路延迟大及吞吐量低的问题。

4 协议描述

4.1 协议帧结构

这种基于 TDMA 的联合自适应 B-ACK 与 ACM 的 MAC 协议，主要应用于基于 TDMA 的动态类型的 MAC 协议。其时帧结构如图 3 所示。

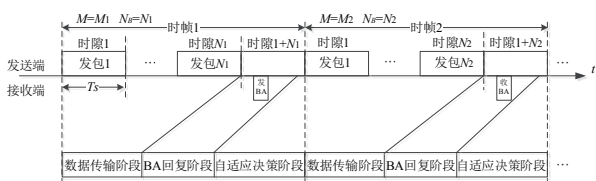


图 3 MAC 协议帧结构图

MAC 协议以块为单位，每一个块中都有若干时隙，分成三个阶段：数据传输阶段、B-ACK 回复阶段与自适应决策阶段、循环阶段。图中发 BA 表示接收节点反馈给发送节点的块确认包，收 BA 表示发送节点接收到接收节点反馈的块确认包。

(1) 数据传输阶段

发送节点 (STA: Station) 在自己的时隙资源占用阶段，连续在 N_B 个时隙上向接收节点 (AP: Access Point) 传输数据帧， N_B 的大小和发送数据采用的编码调制方式 M 由自适应决策阶段给出，在 MAC 协议开始工作时，需要对 N_B 和 M 进行初始化。数据传输阶段共占用 N_B 个时隙。

(2) B-ACK 回复阶段

接收节点接收到 N_B 个时隙的传输数据后，仅回复一个 BA 包，该 BA 包含 N_B 个数据包接收成功与否的状态信息。经过信道传播时延后发送节点收到 BA 包，即指从接收端回复 BA 包到发送端接收到 BA 包这段时间。

(3) 自适应决策阶段

发送端根据接收端反馈的 BA，来自适应调整下一个时帧中的数据传输的 N_B 及采用的编码调制阶数 M 。该阶段结束后即返回 (1) 阶段。此时需要将 BA 中错误的帧号记录下来，让其在下一个时帧的数据传输阶段重传。

B-ACK 回复阶段和自适应决策阶段仅占用一个时隙，所以该 MAC 协议的一个时帧的长度为 $N_T=N_B+1$ 个时隙。

4.2 自适应调整算法

根据 MAC 协议时帧结构，B-ACK 和 ACM 的自适应调整算法如图 4 所示。

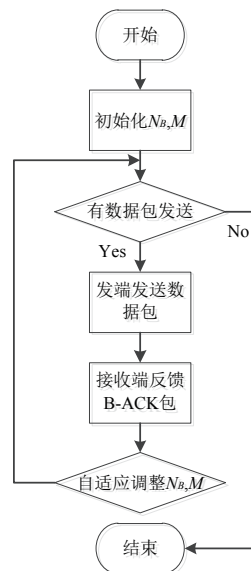


图 4 自适应 MAC 协议的流程图

为了更清晰地表述基于 TDMA 的联合 B-ACK 和 ACM 的自适应调整算法，下面从发送节点和以其对应的接收节点的角度来详细地描述该混合 MAC 协议的处理流程，步骤如下：

(1) 初始化

$N_B = 1$ ，即 STA 每发一个数据包，AP 回复一个 ACK 包。ACM 的编码调制阶数 $M=1$ ，即采用纠错性能最好的编码调制方式。

(2) 自适应调整

发送节点判断 N_B 个数据帧传输的成功率 $p_t > p_{max}$ 时，即认为当前的信道较好，需要增大 N_B 和 M ，此时 STA 连续发送的数据包个数翻倍，即 $N_B = 2N_B$ ，同时，ACM 的编码调制阶数加 1，即 $M=M+1$ ；当 $p_t < p_{max}$ 时，则认为当前信道较差，需要减少 N_B 和 M ，此时每个时帧中数据包个数减半，即 $N_B = N_B/2$ ，同时，ACM 的编码调制阶数减 1，即 $M=M-1$ 。这两种情况均认为 N_B 和 M 的值与当前信道状态不匹配，需要对 N_B 和 M 的值进行调整。

(3) 越界处理

当信道状态较差时， N_B 最小是 B_{min} ， M 最小是 M_{min} ，此时保持每 B_{min} 包回复一个 ACK 包，且采用

最低阶的编码调制方式 M_{min} ; 当信道状态较好时, N_B 最大是 B_{max} , 此时保持每 B_{max} 包回复一个 ACK 包, 且采用最低阶的编码调制方式 M_{max} 。

(4) 超时处理

STA 在超时重传计时期间没有收到 ACK 包或者收到的 ACK 包中有错误的包标号时, STA 需要重传传输过程中发生错误的数据包。

本文设计的基于 TDMA 的联合 B-ACK 和 ACM 的自适应调整流程对应算法 4.1, 算法 4.1 中的参数定义如下: T_R 表示超时重传计时器的最大值, r 表示超时重传计时器。BACK 表示 STA 连续 t 次收到 AP 反馈的 ACK 状态, BACK=1 表示 STA 连续 t 次收到的 ACK 均指示成功, STA 连续 t 次中有一次数数据包失败, 则 BACK=0。BACK_b 表示第 b 个时帧的数据包状态, ACK_i 表示第 b 个时帧中的第 i 个数据包的状态。

算法 4.1: 基于 TDMA 的联合自适应 B-ACK 与 ACM 的 MAC 协议算法流程:

初始化:

B-ACK 中数据包个数 $N_B = 1$, ACM 的编码调制阶数 $M=1$

$r=0$, BACK=1

FOR 有数据需要发送 DO

FOR $b = 1$ to t DO

$r=r+1$

IF $r > T_R$ THEN

重传第 b 个时帧

END IF

BACK_b=1

FOR $i = 1$ to N_B DO

IF ACK_i=0 THEN

BACK_b=0, 同时记录 ACK_i 中需要重传错误的包号

END IF

END FOR

IF BACK_b=0 THEN

BACK=0, 同时重传该时帧中错误的包

END IF

END FOR

IF BACK=0 THEN

$N_B = \max \{N_B / 2, B_{min}\}$

$M = \max \{M-1, M_{min}\}$

ELSE

$N_B = \min \{2N_B, B_{max}\}$

$M = \min \{M+1, M_{max}\}$

END IF

END FOR

对于航空无线协同网络固有的大传播延迟问题, 如果直接采用 ACK 或者 B-ACK 策略, 会使时间大部分浪费在数据包的重传上。自适应 B-ACK 不仅可以尽可能地减少收发的握手次数来降低系统时延, 也有助于实现航空无线协同网络的高吞吐量。

对于每个时帧, 需要采用不同的编码调制方式, 系统中物理层采用信道估计技术来估计信道状态, 根据信道估计结果, 来选择不同的 ACM 方式, 可极大地提高各个时帧数据包传输的可靠性, 从而降低重传帧的概率。这也有助于降低航空无线协同网络的延迟。

通过联合考虑自适应 B-ACK 和 ACM 来克服通信固有的传播延迟、高链路误码及大信噪比波动导致的重传问题, 可解决航空无线协同网络存在的链路延迟大及吞吐量低的问题。为了实现简单, 采用 TDMA 接入方式, 对于不同的时帧, 可能传输的是不同接入节点的数据, 比较适合航空无线协同网络大时延的应用场景。

5 仿真验证与分析

对于航空无线协同网络的节点来说, 由于价格昂贵、复杂度高, 往往难以通过实测进行验证, 且与地面通信网络相比, 固有的大传播延迟是航空无线协同网络的一个显著特征, 这导致使用地面网络系统难以对其进行实测, 所以对大传播延迟的 MAC 协议的仿真就显得尤为重要。因此本节主要采用仿真的方法来验证基于 TDMA 的自适应 B-ACK 和 ACM 相结合的 MAC 协议吞吐量和时延特性。

5.1 仿真场景

为了使仿真结果与真实情景更加接近, 需要设计更符合航空无线协同网络特点的通信场景。信噪比在航空无线协同网络的通信中不可忽略, 为了仿真基于 TDMA 的联合自适应 B-ACK 与 ACM 的 MAC 协议的延迟和吞吐量性能, 需要计算航空大延

迟链路的信噪比。一般用接收机输入的信噪比 E_b/N_0 来表征航空通信链路的干扰及噪声。

接收机的信噪比：

$$E_b/N_0 = E - LS - k + G/T_e - R$$

其中， E 表示天线的等效全向辐射功率， LS 表示传输损耗， R 表示传输数据的码速率， G 表示接收天线增益， k 表示不同种编码调制模式， T_e 表示温度。

仿真中用信噪比（SNR：Signal-to-Noise Ratio）的变化来模拟航空无线协同网络的信道环境。当航空无线协同网络传输采用 ACM 技术后，在传输上根据不同的信噪比采用相应的 ACM 模式，每种模式对应一个频谱效率或数据传输速率。

本章的仿真场景下，航空无线协同网络中 MAC 参数配置如表 1 所示。表中：发送方根据传输块中数据帧传输的成功率 p_i 与升高门限 p_{max} 或降低门限 p_{min} 进行对比来判断传输块中数据包个数和 ACM 值是否需要调整。

表 1 MAC 参数

参数名称	参数值
干扰	0-9.9
SNR	8.96464-18.8646
初始编码调制方式	1
ACM 值	1
初始块大小	16
降低门限	0.5
升高门限	0.9
ACM 变化范围	1-8
N_b 变化范围	1-128
时隙长度	3
符号速率	5
业务时间	11
仿真时间	11
业务速率	50-500

5.2 业务速率对吞吐量和平均延迟的影响

在业务速率变化时，采用不同的 B-ACK 尺寸和 ACM 方式来观察平均吞吐量和平均延迟的变化。仿真中将本文的 MAC 协议与 I-ACK 策略、固定 B-ACK 策略和 I-ACK 联合 ACM 策略的网络性能进

行对比。

仿真业务速率对网络性能影响的参数配置如表 2 所示。

表 2 仿真参数配置

参数名称	参数值
N_b 初始值	16
初始 ACM	1
降低门限	0.5
升高门限	0.9

不同接入策略下业务速率与吞吐量之间的关系仿真结果如图 5 所示。横坐标为业务速率，纵坐标为网络吞吐量，四种 MAC 协议的网络吞吐量均随着业务速率的增加而不断上升，当达到饱和状态后系统总体稳定因此吞吐量持平，这描绘出了网络负载由非饱和和逐渐达到饱和状态的变化过程。

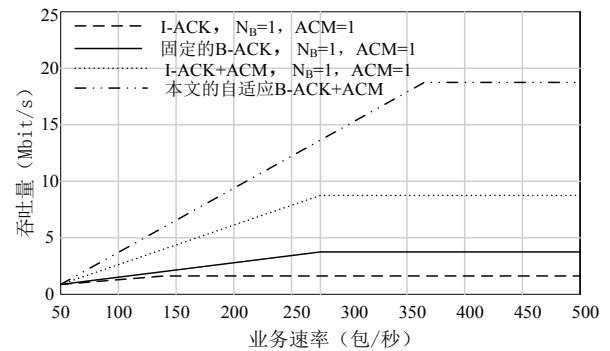


图 5 业务速率与吞吐量的关系图

从平均吞吐量的仿真图中可以看出，与 I-ACK 策略和固定 B-ACK 策略的网络吞吐量相比，本文提出的自适应 MAC 协议的平均吞吐量最大，在 350 包 / 秒时达到饱和吞吐量 19 MBit/s，然而，I-ACK 策略的吞吐量最低，在 150 包 / 秒时即达到饱和，饱和吞吐量仅为 1.9 MBit/s，本文的方法相对于 I-ACK 策略可提高大约 10 倍。固定的 B-ACK 的策略，在 300 包 / 秒时即达到饱和，饱和吞吐量仅为 3.6 MBit/s，本文相对于固定的 B-ACK 策略可提高大约 5 倍。I-ACK 联合 ACM 策略这种方式相对于 I-ACK 策略和固定的 B-ACK 策略也能提升吞吐量，在 300 包 / 秒时即达到饱和，饱和吞吐量为 9 MBit/s，但仍然低于本文提出的联合自适应 B-ACK 与 ACM 的 MAC 协议策略，仅为本方法的一半。这是由于基于 TDMA 的联合自适应 B-ACK 与 ACM 的 MAC 协议更能适应一体化网络的大延迟和信噪比波动的特性，当 SNR 较大时，ACM 越大，吞吐量也随之增大。

系统选用最大的 N_B 和 ACM 即能满足可靠传输的要求, 所以较大的 N_B 和 ACM 都将带来吞吐量的提升。

不同接入策略下业务速率与平均延迟之间的关系仿真结果如图 6 所示。横坐标为业务速率, 纵坐标为数据包平均时延, 在业务速率较小时, 四种 MAC 协议的数据包平均时延都非常小, 接近零。

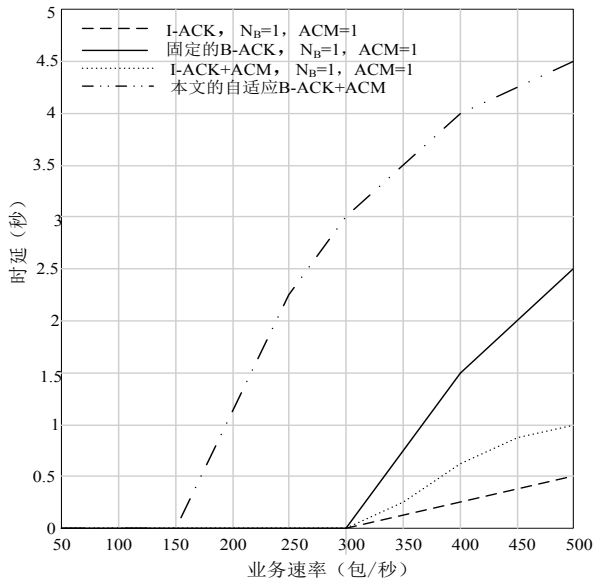


图 6 业务速率与平均延迟的关系图

从平均时延的仿真图中可以看出, 随着业务速率的增大, 本文提出的自适应 MAC 协议策略对数据包平均时延的改善更明显, 比固定 B-ACK 策略的平均时延降低大约 1 倍, 比 I-ACK 联合 ACM 策略的方法降低 4 倍, 比 I-ACK 策略的方法降低 8 倍。这是由于当 SNR 较大时, ACM 越大, 吞吐量也随之增大。系统选用最大的 N_B 和 ACM 即能满足可靠传输的要求, 所以较大的 N_B 和 ACM 都将带来吞吐量的提升。

6 结论

针对航空无线协同网络中的低吞吐量和大延迟问题, 本文提出了一种基于 TDMA 的自适应 B-ACK 和 ACM 相结合的 MAC 协议。该协议以 TDMA 为基础采用自适应 B-ACK 能在保证吞吐量的情况下尽可能地减少收发的握手次数来降低平均时延; 另一方面, 采用 ACM 能纠正链路高误码和适应信噪比波动, 可在保证吞吐量的情况下尽可能地降低数据包的重传概率从而降低平均时延。通过联合考虑基于 TDMA 的自适应 B-ACK 和 ACM 来克服航空节

点通信固有的大传播延迟、高链路误码及大信噪比波动导致的重传问题, 从而可以在提高航空无线协同网络吞吐量的同时降低延迟。

参考文献

- [1] 叶佳宇, 陈晓刚, 张新家. 基于 AFDX 的航空电子通信网络的设计 [J]. 测控技术, 2008: 56-58, 60.
- [2] 古志春, 肖德琴. 基于 TDMA 与 CDMA 混合传感器网络 MAC 协议 [J]. 计算机科学, 2011, 038 (006): 84-87, 100.
- [3] LATHA D H, RAO T, REDDY D. Implementation of TCP congestion control mechanism for wireless network using TCP reserved field and signal to noise ratio[J]. 2014.
- [4] SONG W Z, HUANG R, SHIRAZI B, et al. TreeMAC: localized TDMA MAC protocol for real-time high-data-rate sensor networks[J]. Pervasive & Mobile Computing. 2009, 5(6):750-765.
- [5] OIKONOMOU K, STAVRAKAKIS I. Analysis of a probabilistic topology-unaware TDMA MAC policy for Ad Hoc network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(7): 1286-1300.
- [6] 王尉任, 徐昌彪, 范俐伽, 等. 无线传感器网络中的 MAC 协议及其节能技术研究 [J]. 信息技术, 2007 (02): 28-31.
- [7] 马计刚, 刘同佩. IEEE802.11e 中基于无确认策略的 EDCA 机制研究 [J]. 微计算机信息, 2005 (1):111-112.
- [8] A GARWAL P, HAMMERSCHMIDT J S, RAJAKARUNANAYAKE Y N, et al. Polling using B-ACK for occasional back-channel traffic in VoWiFi applications[J]. 2012.
- [9] T. SUZUKI. Effect of block ACK on application-level QoS in IEEE 802.15.6 CSMA/CA wireless bans[C]. 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), JeJu, Korea (South), 2019: 23-26.
- [10] QI T Y, FENG X X, WANG Y Z, ZHAO S H. Performance analysis of ACM system used by earth observation satellite[C]. IEEE 3rd International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP). Shenzhen, China, 2018: 13-15.
- [11] CHOU E S, KAHN J M. Adaptive coding and modulation

for robust optical access networks[J]. *Journal of Light wave Technology*, 2020, 38(8): 2242-2252.

[12] KIM S, OH D, PARK J. Standardization on performance objectives of satellite systems using adaptive coding and modulation[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2020, 38.