

一种适用于电力异构通信的链路速率跨层匹配机制

肖 勇 金 鑫 冯俊豪
南方电网科学研究院 广州 510663

摘 要 电力系统低压用户信息采集所采用的本地通信技术种类繁多,存在多种协议体制通信速率不统一、异构互通困难的问题。针对电力通信系统中异构链路接口间通信速率不匹配问题,提出一种适用于电力异构通信的链路速率跨层匹配机制。在链路层,设计基于业务速率需求的接入控制机制,提高链路利用率。提出网络接口动态存储转发机制,完成不同网络接口之间的通信速率匹配。在网络层,提出了一种面向网络层多路径传输的速率匹配算法,实现多路径下的路径选择策略与路径传输数据的动态优化。仿真结果证实了该跨层速率匹配机制的有效性。与 RBAR 协议和 ARF 协议相比,该机制提高了网络吞吐量,降低了时延和丢包率。

关键词: 智能电网;融合网关;异构网络;多业务接入;速率匹配
中图法分类号 TN915

Cross-layer Matching Mechanism of Link Communication Rate for Heterogeneous Communication in Power System

XIAO Yong, JIN Xin and FENG Jun-hao
Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China

Abstract Various local communication techniques are employed in the power system. The coexist of multiple protocols in power networks leads to various communication rates, resulting in difficulty of heterogeneous fusion. Aiming at this problem, a cross-layer communication rate matching mechanism between heterogeneous links is proposed. In the link layer, the link utilization rate is improved by means of the rate requirement based access control mechanism. Using the dynamic store-and-forward method, the communication rate is matched and forwarded among different network interfaces. Furthermore, in the network layer, data rate matching based on multipath transmission is proposed to achieve the maximum data rate matching and improve the communication efficiency. Simulation results have demonstrated the validity of the proposed rate matching mechanism based on cross layer design. In addition, compared with the RBAR protocol and ARF protocol, the proposed mechanism can be used to improve the network throughput, while reduce the delay and packet loss rate.

Keywords Smart grids, Fusion gateway, Heterogeneous network, Multipleserviceaccess, Rate matching

1 引言

中国电力系统的电网规模达到了世界领先水平,与之相适应的通信网络规模不断扩大,对网络的安全性、可靠性、时效性提出了更高的要求。同时,2019 年两会报告中提出建设“泛在电力物联网”的目标,旨在构建实时、全面、可靠、互联的电力能源网络^[1-2]。因此,建立完善高效的电力通信系统成为了必然趋势。

当前,在电网智能化、数据化、网络化发展需求的驱动下,电力系统通信网络设备对通信协议的兼容性不断提高,朝着多模式、多接口、多信道方向发展^[2]。然而不同制式的通信接口之间存在着通信速率不匹配的现状,导致异构分布式网络中的中继节点存在两端接口传输速率不同,时常产生无法控制的拥塞。

目前,电力系统本地通信技术种类繁多,如电力线载波、IEEE 802.15.4g、6LoWPAN、IEEE 802.11ah、LoRa、IEEE 802.11a/b/g/n/ac/ax 等^[3-4]。不同的本地通信技术协议复

杂,相互通信困难。各协议特点如表 1 所列,各种协议传输速率差异较大,通信速率匹配是电力系统完成多协议融合的关键技术之一^[5]。

表 1 电力系统本地通信协议对比
Table 1 Characteristics of communication protocol standards used in power system

协议	特点
IEEE 802.11a	工作频段 5 GHz,最高速率 54 Mbps,支持 OFDM
IEEE 802.11b	工作频段 5 GHz,最高速率 11 Mbps,采用 CCK-DSSS,支持动态速率转换
IEEE802.11n	工作频段 2.4/5 GHz,最高速率 600 Mbps,采用 MIMO-OFDM
802.11ac	工作频段 2.4 GHz,最高速率 1 Gbps
ZigBee	工作频段 2.4 GHz,最高速率 250 kbps
电力线载波	频率范围为 40~500 kHz,最高速率 12 Mbps
LoRa	工作频段 433/868.915 MHz,最高速率 37.5 kbps

因此,有必要开展适用于由不同本地通信协议承载的多业务接入的速率匹配关键技术研究,完成电力系统多种通信技术的融合,实现多设备模块的全局统一接入以及链路层和

网络层协议速率匹配。

本文针对电力通信系统多体制融合通信场景,提出了一种跨层联合优化的速率匹配机制。在 MAC 层设计中,采用节点速率与物理资源竞争概率匹配的竞争窗口控制算法,提高信道利用率;在多网络接口转发时,提出动态存储转发机制,提高了中间节点的转发效率。更进一步,提出了一种网络层多路径传输的速率匹配算法,实现多路径下的路径选择策略与路径传输数据的动态优化。

2 链路层速率匹配机制

2.1 多速率接入机制

MAC 层多速率协议主要根据 MAC 层历史数据进行速率自适应调节。统计 MAC 层信道质量、历史吞吐量、帧错误率等状态数据,并基于历史状态推测下一步的状态,推测结果作为传输速率自适应的根据。现有的多速率 MAC 协议可以分为基于发送节点的多速率 MAC 协议和基于接收节点的多速率 MAC 协议两种类型,这两种类型的区分方式依据的是不同的信道质量估计和传输速率的执行位置^[4]。

基于接收节点的速率自适应协议主要包括 RBAR (Receiver Based Auto Rate),OAR (Opportunistic Auto Rate)等,此类协议中,数据传输速率主要由接收节点确定。接收节点向控制帧 CTS 添加数据传输速率信息,并将控制帧发送到发送节点。

(1)RBAR 协议。在 RTS/CTS 帧握手交换过程中,接收节点对信噪比 SNR、BER 等信道质量参数做出估测,并基于香农定理选择合适的数据传输速率,接收信噪越高说明信道质量越好,可以适当调高发送速率^[6]。具体机制是:在 RTS 和 CTS 帧中均添加特殊标识字段,在 RTS 与 CTS 帧的握手交换期间,接收节点接收发送节点的 RTS 帧,提取物理层信息并估算信噪比值后对信道质量进行评估,最后将接收节点估算的信噪比值与多个速率的理论信噪比值进行比较,基于比较结果调整传输速率。该协议的优点是基于接收节点进行信道质量估计,对信道状态估计的实效性更高,对信道变化的适应性更强;缺点是较多地改动了标准协议栈并增加了 RTS 帧占用较多带宽,且协议达到接入次数公平,并不能充分利用信道状态好的情况。

(2)OAR 协议。该协议基于 RBAR 协议接收端调整速率并将速率调整结果反馈给发送节点的思想。OAR 协议对 RBAR 协议做出了改进,在信道状态相对较好时,发送节点能够以高于基本速率的发送速率一次性连续发送数个数据帧,基于此 OAR 协议能够更充分地利用信道状态好的情况。

基于发送节点的速率自适应协议主要有 ARF(Auto Rate Fallback),CARA(Collision-Aware Rate Adaptation)等,此类协议中,通过估计 ACK 信号强度等局部信息来调整数据传输速率。

(1)ARF 协议。发送节点计算其接收到 ACK 帧的次数,当发送节点对同一个分组连续 3 次未接收到 ACK 帧,则将其调整为较低一级传输速率并重传该分组;若连续 10 次成功接收到 ACK 帧,则将其调整为较高一级传输速率。该协议的优点是简单、反应快;缺点是缺乏应对冲突的机制。

(2)CARA 协议^[9]。该协议基于 ARF 协议进行了改进,增加了 RTS/CTS 机制,在发送节点连续收到 ACK 帧时出现

了一次未接收 ACK 帧的情况,发送节点开启 RTS/CTS 机制,减小冲突对吞吐量的影响,同时也防止过量应用 RTS/CTS 机制。

公平的退避机制下,高速率节点与低速率节点获得信道资源的概率相同^[14-15]。在同时竞争物理资源的情况下,无法动态适配高速节点的吞吐,影响网络性能。

通信系统中,物理资源的竞争通常以竞争窗口来实现^[16]。本文在多速率无线网络中根据传输速率比例来调整初始竞争窗口大小,且使得接入概率与速率成比例,从而提高时间的公平性。如式(1)所示,通过设定基准速率,基于实时业务速率来动态调整此业务的竞争窗口大小,动态适配业务速率与物理信道的竞争概率。

$$CW_i=\alpha\times\frac{R_b}{R_i}\times CW_b$$

(1)

其中, α 是为了规范 CW_i 的数值而设置的调整因子, R_b 为基准速率, CW_b 为基准速率对应的初始化竞争窗口, CW_i 表示速率为 R_i 时的初始竞争窗口。由式(1)可以得出,高速率节点具有的竞争窗口小于低速率节点的竞争窗口,从而使得高速率节点接入信道的概率更大。

2.2 动态存储转发机制

针对多接口转发产生的速率不匹配问题,采用动态存储转发机制,通过测试网络中每个网络接口的参数,推算出每个网络接口允许发送的最大吞吐率,进而与实时检测到的目标网络接口发送吞吐率进行对比,即可判断是否需要延迟转发。图 1 所示为动态存储转发机制的示例场景,具体实现过程如下。

步骤 1 在中继设备 A 空闲期,使用设备 A 自带的测量模块测量 A 与其邻居之间的网络质量,在发送连接请求并建立连接后开始通信测试。

步骤 2 中继设备 A 通过定时测量机制,测试其所有不同制式的网络接口的参数,并将其存储到中继设备 A 的存储模块。这些参数包括最小往返时延、最小丢包率等,网络接口的制式包括但不限于以太网接口、RS-232 串行接口、RS-485 串行接口、USB 接口、无线网络接口等。

步骤 3 中继设备 A 在与其他通信制式的通信设备进行测试通信时,以 Δt 为单位时间,根据步骤 2 中测得的参数,推算出每种不同制式的网络接口允许发送的最大吞吐率,并存储在中继设备 A 的存储模块中。

步骤 4 中继设备 A 的网络接口 A_{01} 接收到报文,并希望将报文转发至网络 B,中继设备 A 通过查路由转发表得知需要使用另一个不同制式的网络接口 A_{02} 将报文转发至网络 B。

步骤 5 通过计算得到网络接口 A_{02} 当前的发送吞吐率 R_2 ,通过查询存储模块得到网络接口 A_{02} 允许发送的最大吞吐率 R_1 。基于式(2)来估算每个网络接口允许发送的最大吞吐率,其公式为:

$$B(p)=\frac{1}{RTT\sqrt{\frac{2bp}{3}}+RTT\min(1,3\sqrt{\frac{3bp}{8}})p(1+32p^2)}$$

(2)

其中, B 为 TCP 吞吐率, p 为丢包率,RTT 为测量获得的往返时延,令参数 $b=2$ 。

步骤 6 如果 $R_2\leq R_1$,则将报文直接转发至网络接口 A_{02} 。

步骤7 如果 $R_2 \geq R_1$,缓存报文,设置定时器,延迟转发报文至网络接口 A_{02} 。定时器到时,执行步骤6。具体实现过程如图2所示。

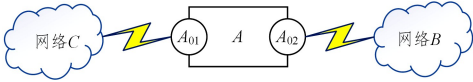


图1 动态存储转发机制场景示意图
Fig. 1 Schematic diagram of dynamic store and forward mechanism

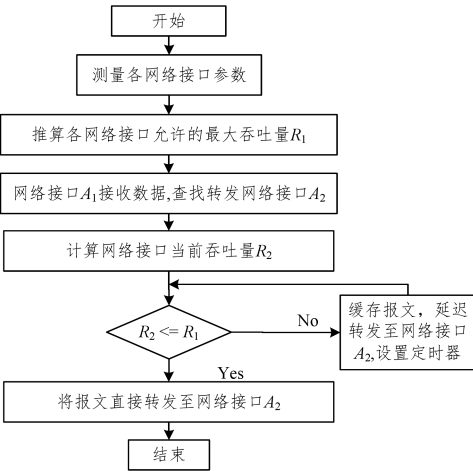


图2 基于动态存储转发的速率匹配过程
Fig. 2 Multi-interface rate matching process based on dynamic store-and-forward method

动态存储转发机制对于基于 TCP 协议的上层电力应用而言,具有端到端流量调控的作用:通过动态存储机制实现了部分报文的延迟发送,从而实现了 对端到端路径时延的调整,通过时延变化对端系统的 TCP 传输控制机制产生了影响,使之降低报文发送速率,避免了因端系统的反复发送和 无序竞争导致网络拥塞的加剧,实现了高速率接口对低速率接口的适应和匹配。

3 基于多路径传输的网络层速率匹配机制

网络层速率匹配机制的设计基于多路径传输思想:在数据流分配时,把待发送的数据流根据节点处承载数据流量的大小进行分割,利用多路径传输实现速率匹配,并采用一种基于 ACK 的反馈机制对数据速率的分配做出动态调整。数据速率匹配示意图如图3所示。

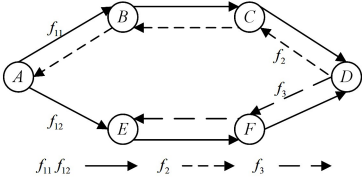


图3 网络层多路径传输数据速率匹配示意图
Fig. 3 Schematic diagram of data rate matching in network layer based on multipath transmission

图4中,假设节点A需传输1条数据速率为5Mb/s的数据流 f_1 到节点D。数据流沿着路径 $D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ 传输的数据速率为2Mb/s;数据流 f_3 沿着路径 $D \rightarrow F \rightarrow E$ 传输数据的速率为3Mb/s。由图2可见,可将数据流分割为 f_{11} 和 f_{12} 两部分。 f_{11} 按照路径 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ 以2Mb/s的数据速率传输,剩下的一部分 f_{12} 按照路径 $A \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow D$ 以

3 Mb/s 的数据速率传输。

3.1 路由度量设计

(1)编码节点数量

首先定义编码节点数量 $Count_f(P_i)$ 的概念。 $Count_f(P_i)$ 是从目的节点到源节点的路径 P_i 中,能够与其他数据流一起编码的中间节点的数量,该参数可以用来估计传输路径上编码机会的多少。

假设网络中有1条新数据流 f ,从源节点 S 发送到目的节点 D ,经过寻路发现存在多条通往目的节点的传输路径。组成路径集合 P ,其中1条路径为 $P_i = S \rightarrow N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow \dots \rightarrow N_k \rightarrow D$,其中 N_i 为路径 P_i 上的中间节点, $0 \leq i \leq k$ 。

当数据流 f 沿路径 P_i 传输时,定义 $C_f(N_i)$ 来描述经过某一中间节点 N_i 处是否存在网络编码机会。当 N_i 满足流间编码判断准则时, $C_f(N_i) = 1$,数据流 f 可与其他数据流编码一起发送;当 N_i 不满足该判断准则时,数据流 f 需单独发送。

$Count_f(P_i)$ 可表示为:

$$Count_f(P_i) = \sum_{0 \leq i \leq k} C_f(N_i) \tag{3}$$

$Count_f(P_i)$ 值越大,该条路径上的网络编码机会就越多,选择该路径传输时,可充分利用网络中的编码机会。

(2)速率匹配

若数据流 f 在中间节点 N_i 处与其他数据流存在编码机会,用 $Rate_f(N_i)$ 表示该节点的编码匹配速率,其大小为多条流经编码节点 N_i 的数据流中数据传输速率最大的那一条数据流的传输速率;若在中间节点 N_i 处不存在编码机会,则 $Rate_f(N_i)$ 为无穷大。

当一条路径上出现多个编码节点时,为了保证路径上最大程度的编码数据速率匹配,定义路径 P_i 上的编码匹配速率 $Rate_f(P_i)$ 为路径上所有节点的 $Rate_f(N_i)$ 中的最小值,即可表示为:

$$Rate_f(P_i) = \min_{0 \leq i \leq k} Rate_f(N_i) \tag{4}$$

3.2 路由发现过程

源节点 S 广播的路由请求分组为 RREQ,分组 RREQ 需要携带所经节点的 ID 和这些节点一跳范围内所有邻居节点的 ID,RREQ 数据包格式如图4所示。

源节点ID	目的节点ID	路由记录	路由请求序列号	路径及邻近节点ID
-------	--------	------	---------	-----------

图4 RREQ 数据包格式

Fig. 4 RREQ packet format

路由回复时,需利用修改后的 RREP 分组将路径上的编码节点数量和编码匹配速率传递给源节点,具体的 RREP 数据包格式如图5所示。

源节点ID	目的节点ID	路由请求序列号	路径及邻近节点ID	$Count_f(P_i)$	$Rate_f(P_i)$
-------	--------	---------	-----------	----------------	---------------

图5 RREQ 数据包格式

Fig. 5 RREQ packet format

路径上节点及节点的邻居节点的 ID 信息是从 RREQ 中直接拷贝而来;编码节点数量 $Count_f(P_i)$ 的初始值为0;编码匹配速率 $Rate_f(P_i)$ 的初始值为无穷大。

RREP 每经过一个中间节点 N_i 时,节点需要根据 RREP 携带的节点的邻居节点 ID 字段信息来判断该节点是否存在编码机会。若存在编码机会,则将编码节点数量 $Count_f(P_i)$

加 1,并把该节点的 $Rate_f(N_i)$ 与 $Rate_f(P_i)$ 进行比较,用两者中较小的值来更新 RREP 中的 $Rate_f(P_i)$ 值;若不存在编码机会,则 $Count_f(P_i)$ 和 $Rate_f(P_i)$ 的值保持不变。更新路由请求序列号后继续发送 RREP,直到 RREP 到达源节点。

3.3 数据速率分配

源节点收到目的节点回复的多个 RREP 分组后,即获得了到达目的节点的多条路径。假设新的待发送数据流 f 的速率为 R_f ,源节点首先将集合 P 内的各条路径按照 $Count_f(P_i)$ 的值由大到小排序,为排序最高的路径优先分配大小为 $Rate_f(P_i)$ 传输速率,此时还未分配的速率为 $R_f - Rate_f(P_i)$;接着判断 $R_f - Rate_f(P_i)$ 的值是否大于 0,若 $R_f - Rate_f(P_i) > 0$,则按顺序选择第二条路径继续对数据速率进行分配;若 $R_f - Rate_f(P_i) < 0$,则结束数据速率分配。其余未使用的路径可作为备选路径。

3.4 基于 ACK 反馈的数据速率调整机制

由于数据传输完成造成的数据流减少或因新增数据业务导致网络中的数据流增加,都会使某一中间节点原本的编码机会消失或出现新的编码机会。因此,需实时监测网络并对路径和数据匹配速率做出及时调整。

本节提出了基于 ACK 反馈的数据速率调整机制,利用目的节点向源节点回复的 ACK 包来周期性地监测网络中节点的编码机会以及流经节点的数据流情况。该机制的具体实现过程如下。

(1) 首先进行 ACK 数据包格式的修改。在 802.11 协议的 ACK 包格式的基础上增加两个字段,分别为编码节点数量 $Count_f(P_i)$ 字段和编码匹配速率 $Rate_f(P_i)$ 字段,将修改后的 ACK 包称为 M_ACK,其具体的格式如图 6 所示。

Frame Control	Duration	Receiver Address	$Count_f(P_i)$	$Rate_f(P_i)$	FCS
---------------	----------	------------------	----------------	---------------	-----

图 6 M_ACK 数据包的格式
Fig. 6 M_ACK packet format

图 6 中,Frame Control 为帧控制域;Duration 为帧交换所需的时间长度;Receiver Address 为地址域;FCS 为帧校验域,用于检错。

(2) 目的节点成功收到数据包并向源节点回复确认消息时,每隔一段时间 T 使用 1 次 M_ACK 数据包进行回复。M_ACK 数据包每到达 1 个中间节点 N_i 时,判断该节点的编码机会,若存在编码机会,则 $Count_f(P_i)$ 值加 1,并把该节点的 $Rate_f(N_i)$ 与 $Rate_f(P_i)$ 进行比较,用两者中较小的值来更新 M_ACK 中的 $Rate_f(P_i)$ 值;若不存在编码机会,则 $Rate_f(N_i)$ 与 $Rate_f(P_i)$ 的值均保持不变。将 M_ACK 数据包进行更新后,发送给下一个节点,直到源节点 S 成功接收。

(3) 源节点通过将 M_ACK 携带的 $Count_f(P_i)$ 与数据传输前 RREP 携带的 $Count_f(P_i)$ 进行比较。若 M_ACK 的 $Count_f(P_i)$ 值未改变,则继续使用当前路径;当 M_ACK 的 $Count_f(P_i)$ 增加时,传输路径不变,根据 $Rate_f(P_i)$ 值调整数据流速率;当 M_ACK 的 $Count_f(P_i)$ 减少时,若存在备选路径的编码机会数量大于 $Count_f(P_i)$,则选择备选路径,若不存在,则重新执行上述路由发现过程。

4 仿真实验及分析

本文使用 NS3 软件对协议进行仿真,为测试本文优化协

议在不同通信制式、不同通信速率的环境下的性能,设计了如图 7 所示的网络,网络中存在源节点 2,3,4,其中 2,3 为低速节点,其通信速率分别为 224 bps,240 Kbps,高速节点 4 的通信速率为 720 Kbps,节点 0,1 为中间节点,通信速率分别为 480 Kbps,240 Kbps,节点 5 为目的节点。

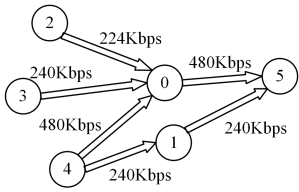


图 7 仿真场景
Fig. 7 Simulation scene

本文的优化协议记为 CBRM (Cross-layer Based Rate Match),仿真对比协议为速率自适应协议 RBAR,ARF。

各协议吞吐量仿真结果如图 8 所示,横坐标为发包速率,纵坐标为网络平均吞吐量。从图中可以看出,随着发送速率的增加,各协议吞吐量逐渐增加。本文协议吞吐量高于 RBAR 和 ARF,这是因为基于速率的接入机制,使得高速率节点优先级接入网络,提高了接入效率。通过路由的优化,合理分配不同速率的数据流,使节点数据流速率得到最大程度的匹配。

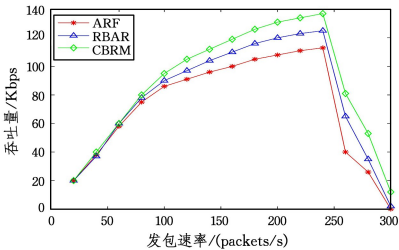


图 8 吞吐量
Fig. 8 Throughput

图 9 给出了各协议包投递率仿真结果。从图中可以看出,随着网络发包速率的增加,各功率控制的协议包投递率逐渐下降,在网络负载较重的情况下,数据冲突严重。本文协议丢包率低于 RBAR 和 ARF,这是因为信道接入机制的优化,减小了信道竞争冲突,提高了信道利用率。合理的路由选择,使得路径通信速率与实际需求相适应,减小了丢包的概率。

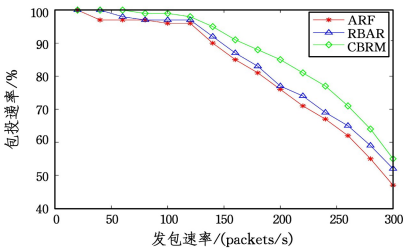


图 9 包投递率
Fig. 9 Packet delivery rate

图 10 给出了各协议时延的仿真结果,随着发包率的增加,网络负载加重,网络时延迅速上升。本文协议时延明显低于 RBAR 和 ARF。这是因为多接口速相匹配机制提高了中间节点的数据转发效率,降低了时延。高速率节点优先接入信道,信道占用时间短,降低了网络的平均时延。

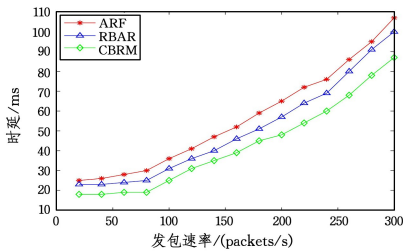


图 10 时延

Fig. 10 Time delay

结束语 本文针对电力网络系统中,多种网络协议之间速率不匹配、通信效率低的问题,提出了一种跨层的通信速率匹配机制。首先,在 MAC 层设计中,采用基于多速率接入的资源竞争窗口控制算法,以满足节点速率与物理资源竞争概率匹配,提高信道利用率;基于动态存储转发机制,提高了中间节点的转发效率。在网络层设计中,提出了一种基于多路径传输的速率匹配算法,通过路径的优化,选择与实际业务速率匹配的路径传输数据,并通过反馈机制,对数据速率分配做出动态调整。仿真实验结果证明了所提 CBRM 协议在融合网络通信多速率匹配上的有效性。同时,与速率自适应协议 RBAR 和 ARF 相比,本文所提 CBRM 协议的网络平均吞吐量、传输时延、包投速率均得到了有效改善。

参 考 文 献

[1] MA Y,LI B S,HU Q G. Wireless network planning of typical SG-IoT[J]. Telecommunications Science, 2019, 35 (12): 122-130.

[2] LI L Y,ZHANG Y J,CHEN Z X,et al. Models for the integration of smart grids and energy networks and their development prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11):1-9.

[3] WANG Y M. Research framework for a strong smart grid technology standard system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22):1-6.

[4] DING H,ZHU N,CHEN X G. Application of Electric Power Communication Technology in Smart Grid[J]. Telecom World, 2017(18).

[5] GUO Q L,ZHONG W F,ZHANG H C,et al. Adaptive Rate Control in Smart Grid Heterogeneous Communications Network[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2017(49):34.

[6] PENG M G,WANG W B. Investigation of Convergence Mechanisms and Cooperative Power Allocation Algorithms in Heterogeneous Wireless Communication Systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(10):2348-2353.

[7] GUO T ,CARRASCO R. CRBAR: Cooperative relay-based auto rate MAC for multirate wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12):5938-5947.

[8] ZHAO B S,LI J X,CHEN Y. An Efficient Rate Adaptive Algorithm Based on RBAR[J]. Radio Engineering, 2020(1):3.

[9] ASHRAF M,JAYASURIYA A,REPOSITORY A . Improved Opportunistic Auto Rate protocols for wireless networks[C]// IEEE International Symposium on Personal. IEEE, 2008.

[10] MAGUOLO F ,LACAGE M ,TURLETTI T . Efficient collision detection for auto rate fallback algorithm[C]// IEEE Symposium on Computers & Communications. IEEE, 2008.

[11] CHOI J,NA J,LIM Y,et al. Collision-aware design of rate adaptation for multi-rate 802. 11 WLANs[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(8):1366-1375.

[12] ZHANG J J,TANG Y J. Design and simulation analysis of rate adaptation for WLANs[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(4):109-113.

[13] SETIAF A,ARIFT Y,MUNADI R. Collision-Aware Rate Adaptation Algorithm for High-Throughput IEEE 802. 11n WLANs[C]// 2018 6th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT). 2018.

[14] LIU H. Access Methods For Adhoc Networking Based On Back-off Mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[15] CHEN G,XIA W W,SHEN L F. Dynamic bandwidth allocation algorithm based on transmission rate adaptation[J]. Journal on Communications, 2014, 35(5):25-32.

[16] ZOU W,WANG E,ZHENG Z,et al. A contention window adaptive MAC protocol for Wireless Sensor Networks[C]// 2012 7th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM). IEEE, 2012.



XIAO Yong, born in 1978, professor, senior engineer. His main research interests include intelligent power consumption and measurement technology.