

类有线的无线接入

Wired-Like Wireless Access

尹华锐/ YIN Huarui
陈晓辉/ CHEN Xiaohui
卫国/ WEI Guo

(中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027)
(University of Science and Technology of
China, Hefei 230027, China)

1 有线网络接入及资源共享机制

介质访问控制(MAC)机制要解决的基本问题是协调多个用户争用唯一的资源。在各类现场总线发展的历程中,形成了一些有益的访问控制思路,这些思路不仅可以解决总线中的访问控制等相关的一系列问题,也极大地影响了现代网络的MAC协议设计^[1]。

基于现场总线发展而来的MAC的一些主要技术思想包括以下几种:轮询,主节点定期询问各从节点并决定哪个从节点可以享有传输链路;仲裁,某个特殊节点决定其他节点的权限;时分复用;令牌;载波侦听(CSMA)等。

有线网络与总线中的访问控制类似,所有的节点共享传输介质。如何保证传输介质有序、高效地为许多节点提供传输服务,就是有线网络的MAC协议要解决的问题。无论在何种有线网络中,MAC协议都规定了共用信道的使用产生竞争时,分配信道

收稿日期: 2017-04-10

网络出版日期: 2017-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61571412)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0002-04

摘要: 提出了针对海量连接的、免调度和免资源分配的、类有线化的无线接入及资源共享方案。该方案为每一个参与传输的无线终端分配虚拟专用传输信道,终端按需在该虚拟传输信道进行数据传输。基于该方案的无线传输和有线传输仅仅在物理层使用不同介质进行,在此之上的各层可实现协议的统一化,有效降低无线传输的信令开销和相应的时延,降低无线传输的协议复杂度。

关键词: 无线通信; 海量连接; 多址接入; 虚拟专用信道

Abstract: In the paper, a novel wired-like strategy for wireless massive connection without scheduling and resource allocation procedure is proposed. The method allocates a virtual dedicated channel for each terminal, and the terminal can transmit the data packets via its dedicated channel when necessary. The only difference between wired network and wired-like wireless network is transmission media, the protocol of these two class of network can be unified for other layers. Such technique can help us to reduce the signaling cost, transmission latency and the complexity of protocol implementation.

Keywords: wireless communications; massive connection; multiple access; virtual dedicated channel

使用权的规则。这些MAC包括早期的ALOHA协议(包含纯ALOHA和Slotted ALOHA)^[2-4],令牌环网以及CSMA协议族等。

近年来基于以太网的局域网交换技术发展迅猛,逐步形成了星型、即插即用的主流有线网络标准架设方案,如图1所示,即某台计算机终端等有线终端独占交换机某特定端口及其对应的传输介质,虽然协议上仍然兼容原有的基于CSMA基础上的以太网资源共享机制,但是端口链路资源被某终端独占的方式逐步成为主要的资源利用方式^[5-6]。

有线网络传输能力取决于中心节点的所能提供的通道数(即中心控制器端口数目和数据缓存器大小)。有线网络支持终端数不受限于传输

通道容量限制,主要取决于中心控制器的端口数目;传输能力取决于控制器数据缓存大小。主流的观点认为:现有的基于交换机为中心的有线网络无需复杂的资源调度即可正常使用(不排除通过流量控制等资源调度控制手段)。事实上,在图1所示结构下,有线网络的传输资源分配可视



▲ 图1 有线网络示意

为对交换机端口的事前分配,按照某个规划技术方案(资源调度为可修改)为某个(批)终端建立一个专有物理通道,该通道一旦建立即该网线对应的单个(若干)终端固定拥有。网线安装是有线网络的主要资源调度方式,辅助的资源管理调度也是管理员发起的对端口的流速(流量)等相关手段。

2 无线接入与资源共享方式

无线网络的特殊性在于信息承载信号具有广播和叠加特性,即任何终端辐射的无线信号总是以某种线性组合的方式出现在基站天线。如果我们将空间看成一个共享信道,则无线网络相当于所有参与信息传输的终端以某种方式(竞争、分配等)共享该公共传输信道。这个特性为网络的扩展带来了显而易见的好处:自由空间的广播性和叠加性为终端接入带来便利性,任何被基站(AP)信号覆盖的终端(节点)均可得到网络覆盖,不再受物理媒质严格约束和交换机端口的限制。

另一方面,有线网络地址区分是通过交换机(路由器)端口进行区分,网络对传输资源的控制主要通过交换机或者路由器的缓存管理来实现。无线通信与此不同,核心因素在于空口资源受限,链路地址区分和资源调度必须在物理层实现。

与每个局域网交换机管理有限个(通常从几个到几十个)端口不同,一个无线网络的中心控制器服务的终端数目变化巨大,既有服务数十个终端的WiFi,也有服务上万个传感器物联网(IoT)。无线传输服务节点的大跨度业务需求广泛存在;共享信道下大量数据传输链路的资源管理和协调问题一直都是无线网络的核心问题。

无线网络主要有两大阵营:一类面向短距离覆盖;一类面向广域覆盖。前者的典型代表是WiFi,后者的典型代表是2G/3G/4G移动通信网

络。前者以CSMA方式实现资源的竞争和调配;后者多采用终端(节点)通过竞争接入信道向基站申请传输资源的方式实现资源的使用权,技术上不同的AP的调度下使用包含但不限于诸如时分多址(TDMA)、频分多址(FDMA)、码分多址(CDMA)、正交频分多址(OFDMA)和空分复用(SDMA)等正交接入技术;另外,面向短距覆盖的无线个人局域网(WPAN)等也有采用资源申请-分配方式。面向广域覆盖的移动网络数据传输过程用图2所示,其中粗虚线上方为终端接入网络的过程。接入过程一般有几个步骤:

(1)终端(节点)进入AP服务区,并且获取AP有关本服务区的一些相关参数;

(2)终端提交接入申请,AP根据终端的相关资料统一接入。

粗虚线下方描述的是数据传输过程,一般有几个步骤(终端进入等待状态,当有数据需要传输时进入下一个状态,否则停留在该状

态):

(1)终端有数据需要传送时,首先竞争随机接入信道;

(2)随机接入信道竞争成功则请求AP分配传输资源,否则继续参与随机接入信道竞争;

(3)基站根据当前可供调配的资源和资源请求情况,按照某种准则进行资源分配,在基于TDMA、FDMA、CDMA以及OFDMA等正交资源分配的系统,AP通过本地维护互斥的资源调度策略保证不同链路之间至少在一个维度上保持正交;

(4)终端(节点)根据分配的资源进行数据传输;

(5)传输完毕释放链路资源,AP收回传输资源。

从上述过程中,我们可以看出:1个消息的传送需要经历4次交互,对于现有的智能终端大量存在的即时通信业务以及未来5G面临的IoT节点来说,小数据包业务虽然占据上行数据总流量比例不高,但是其高的系统开销使得小报数据业务成为无线

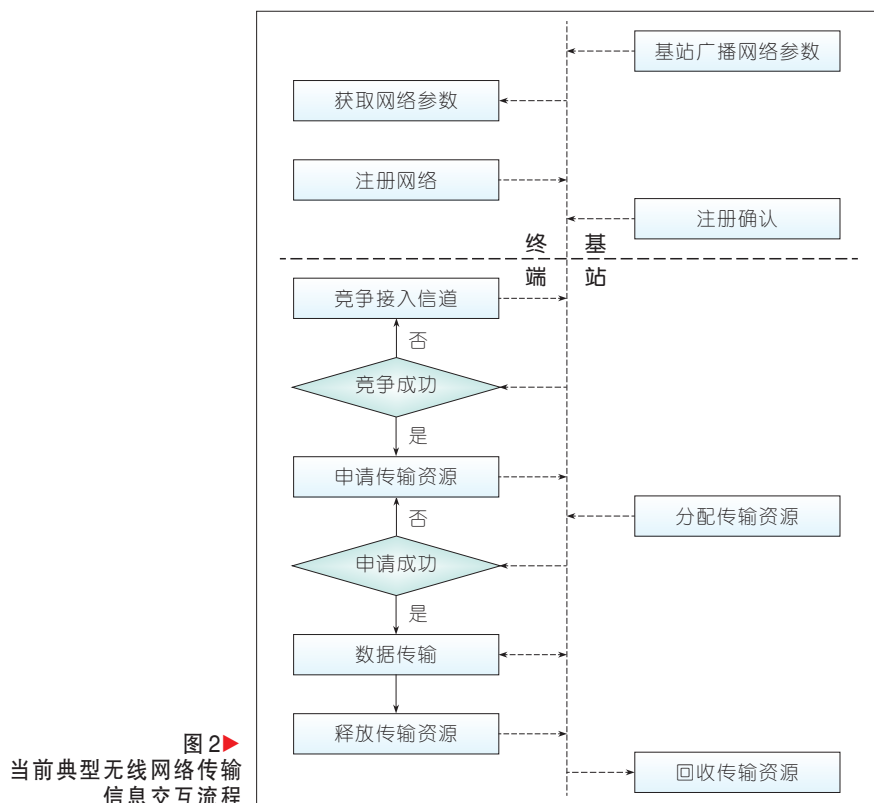


图2

当前典型无线网络传输信息交互流程

通信上行链路资源的重要占用者;对于低时延约束业务,多个超帧级别的信令时延交互成为传输时延的重要贡献因素。当前在窄带物联网(NB-IoT)技术方案中有提出缩短超帧时间来减小数据传输时间;但是若干倍超帧时间长度的时延和数倍于传输数据的数据传输链路资源管理和调度开销并没有因此而减少。

从上述分析可以看出:基于竞争-分配-传输-释放的方式不仅引入了大量的信令开销,同时也引入了消息传输的时延。因而探寻合适的方法来改变这种现象显得日益重要。借鉴有线网络的发展,最初多个终端利用某种协议(竞争、分配)共享传输介质传输,后来逐步转变到终端独占交换机端口的方式,这种转变简化了网络协议,提高了网络传输效率。若在无线网络中实施类似的设计则会带来两个问题:

(1)能否为无线网络的每个终端固定分配一根虚拟网线,其资源为该终端独占,后续使用无需资源协调和调配?

(2)采用这样的资源协调和管理方式会对无线网络相应技术提出哪些要求,能否有解决的可能性?

近年来非正交的多址方法研究逐步进入学术圈和工业界的视野,其理论基础在于C.E.Shannon的认识:在利用恰当的信道编码的前提下,当链路的等效信号与干扰加噪声比(SINR)大于某个门限时即可以接近1的概率实现正确数据传送。这个结论告诉我们如果可以恰当控制各个链路之间的干扰水平,可实现若干链路的并发传输。基于该假设,相对于正交传输,非正交多址方式可同时容纳的链路数目将远远多于正交多址方式所能支持的链路数目。

非正交多址接入(NOMA)的主要思想是不同终端(节点)之间发送信号不再要求正交,而是利用特定的策略保证不同链路间的干扰低于某个门限。接收端利用干扰消除的方式

实现对不同链路的数据解调。当前学术界和产业界关注的几个主要非正交多址方式有:基于功率域拓展的NOMA^[7]技术、基于码域的稀疏码分多址(SCMA)技术,以及多用户共享接入(MUSA)技术等。

NOMA技术的核心思想是控制不同数据链路的发送功率,不同链路的信号在接收端形成功率分层。接收端利用串行干扰消除(SIC)实现对不同分层的信号逐次解调和干扰消除。该方案主要应用在下行多址技术方案中。基于功率域的多址方式可以扩展较多的链路资源,但是基于功率分层的NOMA方案在无线传输上行链路应用面临一定的技术困难,困难在于实现功率分层需要链路增益作为输入参数,在此基础上控制各终端(节点)的发送功率使得接收端形成功率梯度,这就意味着系统需要付出较多的信令开销;另外,上行链路的用户调度也需要大量的信令参与才可以完成,因此该技术方案是否能够得到应用产业界和学术界尚处于讨论和观望之中。另一方面由于使用NOMA技术方案,利用不同链路的功率差别进行串行干扰消除,随着期望并发链路数目的增加,功率效率将快速下降,这就意味着如果需要支持的独占链路数目上升将会引起终端发送功率的急剧增加,最终可实现的虚拟独占链路数目将会受到很大的限制。

SCMA^[8]将同一个用户的发送数据映射到多个子载波上,不同用户在同一子载波上的映射采用不同的星座图旋转的方式实现,接收端则利用了置信度传播的方法。MUSA^[9]的技术特点是充分利用了远、近用户的发射功率差异,在发射端使用非正交复数扩频序列对数据进行调制,并在接收端使用连续干扰消除算法滤除干扰,恢复每个用户的数据。SCMA允许多个用户复用相同的空口自由度,可以显著提升系统的资源复用能力。

尽管上述两类多址方式在一定程度上拓展了无线网络中可同时传输的链路数目,但是考虑到实际情况,真正可支持的独立链路数目并不多,无法解决无线传输中的资源使用协调问题。理论上,SCMA和MUSA可以利用竞争的方式实现无调度传输,但是由于可供选择的码本严重不足制约了上述扩展能力,随着参与传输的用户数目越来越多,竞争冲突会使性能急剧下滑。

3 类有线的无线传输方法

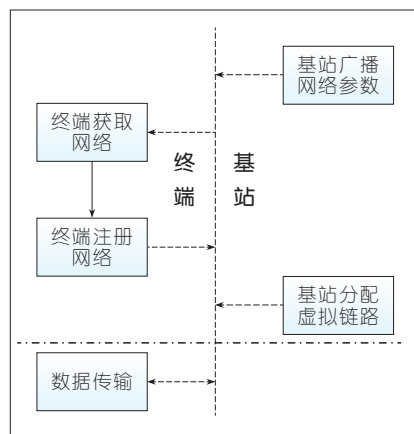
在5G标准化研究过程中,研究者们明确提出了未来5G网络的特性,包括每平方公里 10^6 个活跃连接用户,延迟不超过100ms等。传统的基于竞争或调度的资源使用方式无法满足上述需求,因此我们提出一种类有线的资源共享方式基础上的无线接入方式。相应的传输过程由图3给出,具体的流程描述如下。

(1)终端(节点)进入AP服务区,获取有关服务区的相关参数;

(2)终端提交接入申请,AP根据终端的相关资料统一接入并分配一条专属于该终端(节点);

(3)终端(节点)进行相关的数据传输。

上述无线接入和传输方法的核心思想在于:终端申请接入时,AP为该终端分配一条专属于该终端的传输链路,该虚拟专用链路在终端停留



▲图3 有线化后的无线传输流程

在 AP 覆盖范围内保持不变。如图 3 所示,此时基站和终端之间的资源分配完成(横向点划分割线上方),从网络接口看相当于基站为每个无线终端预留一个虚拟的专用无线信道,终端(节点)需要发送数据时,无需与 AP 进行有关资源分配的交互,直接利用虚拟独占传输链路进行数据传输。图 4 给出类有线的无线网络结构,注意每用户对应的专用通道实际上是虚拟产生的,我们利用虚线表示该专用链路。所有终端获得虚拟专用通道的类有线的无线传输对网络传输性能有着重要的意义:

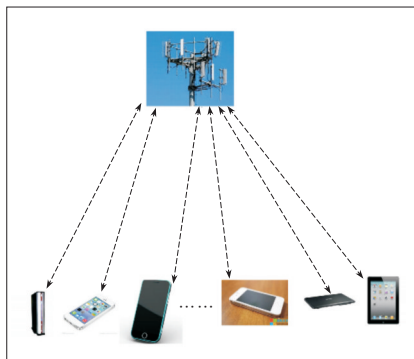
- (1)一旦接入,连接永远保持;
- (2)无需调度即时传输,只要在不超过总吞吐量的前提下,任意用户的组合均可采用类似于有线网络的资源使用方式实现数据传输;
- (3)上层协议实现无线传输和有线传输的统一,降低了协议维护和开发复杂度。

4 类有线的无线接入和资源共享方式存在的技术问题和进展

类有线的无线接入和资源使用方式有着诱人的前景,但是也将面对诸多挑战。

(1)支持海量连接的虚拟专用链路设计。

如何为覆盖范围内的海量终端提供足够多的虚拟专用链路是类有线接入方法面临的首要问题。基于



▲图 4 有线化后的无线网络结构

功率域 NOMA 和基于码域的 MUSA、SCMA 等非正交多址方式一定程度上拓展了无线网络可同时支持的虚拟专用链路数目;但可供选择的码本严重不足,尚不足以支撑为每个终端(节点)建立一个虚拟专用链路。

我们针对支撑海量终端虚拟专用链路的可能性开展研究,提出了一种利用预编码实现的上行小数据包免调度传输方法——SpMA^[10]。该传输方案和现有的基于符号级的预编码方式不同:包括 CDMA、SCMA、MUSA 在内的码域多址传输方案中,同一用户的不同符号会以较快的重复周期重复使用一个码本以对不同符号进行调制,SpMA 方案中每个发送符号使用不同的预编码码本以将每个传输符号均随机扩展到整个时频资源空间,进一步利用 AP 域终端(节点)之间的信道响应实现对空域资源的利用。该方案优势在于:预编码码本可将任意的随机序列作为预编码码本,每个终端(节点)注册网络后即得到与预编码码本相对应的虚拟专用链路。我们在理论上已经证明只要同时参与传输的用户量不超过一个门限,所有参与传输的链路接收性能和单用户传输性能相比损失可小于 1 dB。特别地,我们进一步联合功率域、码域,人为控制和利用远近效应引起的功率分层,实现了对海量用户的虚拟专用链路的支持。数值仿真和理论分析都显示:该方案在基站天线数 $M=8$,时频符号数 T 的前提下,可以为超过上万个终端(节点)提供专属于每个终端的虚拟链路;传输能力上,在数据符号数 d 满足 $T=8d$,相对于正交传输存在 2 dB 信噪比损失的前提下,可支持的并发连接数可超过 80。

(2)信道估计。

无线网络和有线网络的区别还体现在信道响应随时间和空间的变化特性。有线网络电磁波传输信道响应相对固定,随时间、空间发生改变极小,不同链路之间的信道差异通

过链路速度自适应技术和信道均衡技术可获得近乎完美的解决;无线网络中接收信号不仅仅取决于发送信号,还取决于随时间和空间变化的信道响应。在类有线方式的无线传输中,作为发送方的终端和接收方的基站对各虚拟专用链路信道响应处于未知状态,信道估计需要面临的问题一是在没有先验知识的前提下快速寻找出发数据用户的集合;二是在可能参与传输的终端(节点)为小区内全部注册用户的情况下,需要进行信道估计的用户集合庞大,数目上远远超过天线数目。这也是类有线的无线接入和资源使用方式中必须要解决的一个问题。我们的初步研究表明:通过选择恰当的帧结构和参数,信道估计问题可以在一定程度上得到解决。仿真结果显示:使用了信道估计进行接收和准确知道信道状态信息进行接收,其性能差别不到 1 dB。我们认为这个结果工程实践上可以接受的。

(3)载波同步和时钟恢复。

有线网络主要采用光纤和双绞线作为信号传输媒质,数据承载波形多采用数字基带波形。无线网络因为天线辐射效率的原因,多利用载波信号传递数据。为了保证信号的有效接收,必须进行载波同步。理论上终端(节点)可以利用 AP 的 Pilot 信号与 AP 的载波同步,进而使所有参与传输的终端(节点)保持载波同步,但是任何载波恢复算法或者载波跟踪同步环路都不能保证终端(节点)和 AP 之间保持载波的完全同步,这导致多个发送终端(节点)上行数据传输的载波产生偏差,系统留给终端(节点)和 AP 导频进行同步的资源受限。需要注意的是:终端(节点)之间的本振独立,载波偏差彼此不同,载波偏差会使得干扰消除,这使得传统的载波跟踪和同步算法都不再适用,如何解决本问题是实现无线传输有线化的关键;另一方面,由于各终端

►下转第 34 页