

无线通信网络的功率和速率控制综述^①

韩存武^② 童 薇 李梦奇 刘 蕾

(北方工业大学现场总线及自动化北京市重点实验室 北京 100144)

摘 要 功率和速率控制是无线通信网络的关键技术,它对提高网络的服务质量、降低能耗、有效利用有限的网络资源具有重要的作用。本文分析了无线通信网络中存在的特殊问题,包括网络故障、信道衰落、传输时滞以及网络资源的优化配置等;在此基础上,综述了已有的无线通信网络功率和速率控制方法以及网络资源的优化配置方法,分析了这些方法的优缺点以及目前研究中所存在的问题,指出了可能的未来研究方向。

关键词 无线通信网络, 功率控制, 速率控制, 网络资源配置

0 引 言

功率和速率控制是无线通信网络的关键技术。功率控制的目的是在保证网络可靠连接及通信质量的前提下,使发射功率最小化,从而节省能源、延长电池寿命,并使系统容量最大化;而速率控制的目的是在保证网络不出现拥塞的前提下,使传输速率最大化,从而使网络的吞吐量最大化,以便充分利用有限的网络资源,使用户享受流畅的通信服务并使经济效益和社会效益最大化。同时,功率和速率之间相互影响并相互制约。因此,如何对无线通信网络的功率和速率进行有效地联合控制是目前具有挑战性的研究课题之一^[1,2]。

近年来,无线通信网络的功率和速率控制引起了控制领域和通信领域专家学者的极大兴趣,并取得了大量的研究成果。本文分析了无线通信网络功率和速率控制中存在的特殊问题以及国内外研究现状,介绍了已有的功率和速率控制方法及其优缺点,指出了目前研究所存在的问题以及可能的未来研究方向。

1 无线通信网络功率和速率控制中需要考虑的特殊问题

无线通信网络采用蜂窝形式,如图 1 所示,每一个蜂窝称为一个小区,在每一个小区中,有一个基站 (base station, BS) 和 n 个用户或称移动台 (mobile station, MS)。如果在第 i 个小区 C_i 中的移动台 MS_i 要和第 j 个小区中的移动台 MS_j 通信,首先 MS_i 要与其自身所在小区中的基站 BS_i 接通,然后由 BS_i 与 BS_j 接通,再通过 BS_j 与用户 MS_j 接通。 BS_i 与 BS_j 之间采用有线连接,而 MS_i 与基站 BS_i 之间采用无

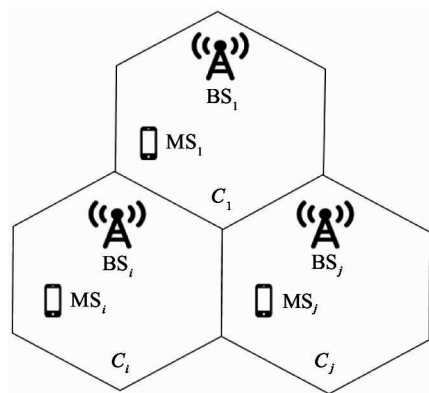


图 1 蜂窝无线通信网络示意图

① 国家自然科学基金(61573024)和北京市自然科学基金(4142014)资助项目。

② 男,1961 年生,博士,教授;研究方向:无线通信网络,计算机网络等;E-mail: cwihan@ncut.edu.cn (收稿日期:2018-08-15)

线网络连接。这样,要完成 MS_i 与 MS_j 之间的通信,需要 4 条无线信道,即 MS_i 到 BS_i , BS_j 到 MS_j , MS_j 到 BS_j 和 BS_i 到 MS_i 。

1.1 无线通信网络中的网络故障

无线通信网络中通常有 3 种形式的故障,即移动台侧的故障、基站侧的故障以及基站与基站之间的连接故障^[3]。

移动台侧的故障。包括移动台本身出现的故障以及移动台与基站之间的无线连接故障,例如,当移动台与基站之间的信道条件很差时,将出现连接故障。一般说来,信道条件越差,所使用的发射功率就越大。当这种状况的持续时间超过某一预先设定的门限时,已建立的连接就要被迫中断,因而系统的中断概率就会增加。一般移动台侧的故障发生率要比基站侧的故障和基站与基站之间的连接故障高得多。

基站侧的故障。包括基站本身出现的故障以及由于其所在小区的移动台过多引起网络拥塞或没有可用的信道分配而造成的故障。一般每一个通信连接需要两条无线信道,一条是 MS_i 与 BS_i 之间的无线信道,另一条是 BS_j 与 MS_j 之间的无线信道。无线信道是有限的系统资源,需要尽可能多地重复使用。为了减少信道之间的干扰,各小区之间采用相互正交的无线信道。当两个小区之间的几何距离小于最小信道使用距离 $D_{\min}$ 时(此时,这两个小区称为干扰邻居),同一条信道不可以在两个小区同时使用,即,如果信道 r 在小区 C_i 使用,则任何与 C_i 相邻的干扰邻居(小区)都不可以再使用这条信道 r ,否则将造成互信道干扰。如果 BS_j 没有可用的(正交)无线信道分配给 MS_j ,就不得不拒绝 MS_j 的通信请求,这时,称 BS_j 出现了基站故障。

基站与基站之间的连接故障。假设基站 BS_i 与 BS_j 之间的有线连接出现了故障,则 BS_j 无法从相邻的 BS_i 收到响应信息,而不得不无限期地等待,这必将严重地影响网络资源的利用。与 BS_i 出现基站故障所不同的是, BS_i 与其相邻小区中的互信道干扰仍然存在。

1.2 无线通信网络中的小区切换

如图 2 所示,无线通信网络中的小区切换是指

当移动台 MS_i 已经与其原所在小区 C_i 的基站 BS_i 建立了通信连接后,由于(乘坐交通工具)快速移动而离开 C_i 时,其与 BS_i 之间通过无线信道 r_i 本已建立的通信连接就要中断,而切换到另外小区 C_j ,与 C_j 中的基站 BS_j 通过无线信道 r_j 建立通信连接。如果这种切换出现问题,就会出现故障。

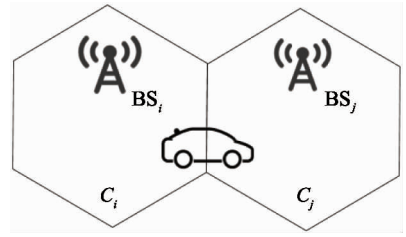


图 2 无线通信网络中的小区切换

无线通信网络中的小区切换是导致网络故障的一个重要原因。一方面,如果无线信道 r_j 衰落严重,将导致移动台侧的故障;另一方面,如果小区 C_j 中没有可用的无线信道提供给该移动台,就会出现基站侧的故障。

1.3 无线通信网络中的信道衰落

无线通信网络中的信道衰落有 3 种不同的形式:(1)路径损耗,与移动台到基站之间距离的 m 次方成反比;(2)阴影效应,与建筑物等的遮挡有关;(3)瑞利衰落(多径干扰),由信号在多个建筑物之间经过多次反射后引起的。通常信道衰落(或称信道增益)可用下式表示^[4]:

$$g = f(d, m, x, y) \\ = d^{-m} \cdot 10^{-0.1y} \cdot \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$

其中,第 1 项为路径损耗,第 2 项为阴影效应,第 3 项为瑞利衰落; d 为移动台到基站之间的距离, m 为路径损耗指数, x 和 y 为随机变量, σ 为瑞利衰落因子。可见,信道衰落是非线性的、随机的和时变的。而这种信道衰落将导致通信质量下降,当信道条件很差时甚至会导致网络故障。

1.4 无线通信网络中的传输时滞

无线通信网络中包括 2 种传输时滞,即基站到移动台(下行链路)之间的传输时滞和移动台到基站(上行链路)之间的传输时滞。这种传输时滞通常是未知的,因为网络传输时滞与基站和移动台之

间的距离有关,而基站和移动台之间的确切距离无法事先知道,所以网络时滞也就无法事先知道。另外,网络传输时滞往往是时变的或随机的,其中一个简单的原因是当用户乘坐交通工具接近或远离基站时,它们与基站的距离会不同程(速)度地发生变化,从而传输时滞也就发生变化;另一个原因是即使距离变化不大,但由于各种干扰的存在,也将导致时滞的变化。

与传统的网络化控制系统相比,传输时滞对无线通信网络功率控制系统性能的影响更加严重,甚至会使系统失稳^[5]。

1.5 无线通信网络的网络资源优化配置

网络资源优化配置是无线通信网络功率和速率控制需要解决的重要问题。一方面,用户的传输速率受到有限的网络资源(信道、带宽)的限制,这就使得所有用户难以获得最大的传输速率,否则将导致网络拥塞。另一方面,小的传输速率虽然可以避免网络拥塞,但会造成网络资源的浪费,减少网络的吞吐量;同时还要考虑网络内各用户的利益公平均衡。这就需要网络资源的优化配置,对不同种类的业务分配不同的传输速率(如话音通信需要较低的传输速率,而视频和数据需要较高的传输速率),并保证用户的传输速率公平均衡。

2 国内外研究现状分析

2.1 无线通信网络的功率控制

无线通信网络的功率控制是移动通信中的关键技术之一。功率控制的任务是解决所谓的“远近效应”问题,即,由于信道衰落的影响,离基站近的移动台(用户)的信号较强,而离基站远的移动台的信号较弱,因此离基站近的移动台的信号将淹没离基站远的移动台的信号。如果离基站远的移动台加大发射功率,又会对其他用户产生干扰。功率控制的目的是控制移动台的发射功率从而使基站接收到的每个移动台的信噪比平衡。

用户的服务质量是由接收到的信噪比决定的。对于给定的信道干扰,用户总能通过增加自己的发射功率来达到所需的信噪比,但这同时会对其他用

户产生干扰,而其他用户为保持原有的信噪比,也会增加自己的发射功率,从而可能导致功率的循环增加,直到一些用户或所有用户达到他们的饱和功率值,却仍不能满足各自的服务质量,由此造成功率的竞争和攀比现象。可见合理有效的功率控制,将会提高系统的性能和增加系统的容量,避免因功率的竞争和攀比现象造成的系统不稳定。

功率控制通常分为 2 种形式,即集中式^[6]和分布式功率控制^[7]。由于集中式功率控制需要事先知道小区中所有用户的信道增益,这在实际中很难做到,所以用的较少。而分布式功率控制只需要知道每个用户的信道增益,这在实际中很容易做到,所以是研究的重点,并取得了大量的研究成果^[8]。

无线通信网络功率控制中需要解决的 2 个主要问题是传输时滞和信道增益的不确定性^[4]。由于自适应控制对时滞和参数不确定性所具有的控制优势,很多学者研究了无线通信网络的自适应功率控制问题,提出了一系列不同的自适应功率控制方法。如:基于最小方差和广义最小方差的自适应功率控制方法^[9,10],基于小区话务记录(cell traffic recording, CTR)的自适应功率控制方法^[11,12],基于 Kalman 滤波器^[13]和 Smith 滤波器^[14]的自适应功率控制方法,基于逆控制的自适应功率控制方法^[15],以及基于预测控制的自适应功率控制方法^[16,17]。

但是,所有这些方法都假设网络传输时滞是已知的且固定不变的。实际上,网络传输时滞往往是未知的、时变的或随机的。具有时变时滞的无线通信网络的功率控制近年来引起了人们的重视,但成果仍然不多。Yang 和 Chen^[5]提出了基于 Kalman 滤波的功率控制方法,有效地克服了时变时滞的影响,但缺点是没有考虑信道参数的不确定性。Lestas 针对具有时变时滞和参数不确定性的无线通信网络,利用 Lyapunov-Razumikhin 函数,证明了如果最优功率控制存在,则在此功率控制下的闭环系统是渐近稳定的^[18],但并没有给出最优功率控制的求法。Han 等人^[19]通过对时滞的估计,提出了具有时变时滞的无线通信网络的自适应控制,并针对具有随机时滞的无线通信网络,提出了一种改进的广义预测功率控制方法^[20]。

无线通信网络存在的另一个问题是由信道衰落引起的信道参数不确定性。到目前为止,几乎所有的自适应功率控制方法都假设这种衰落可用一种带白噪声的线性模型来描述^[4,12-20]。事实上,它是非线性的、随机的和时变的。Han 等人^[21]提出了一种含有非线性的功率控制方法。Subramanian 等人^[22,23]提出了一种时变信道模型并在此基础上提出了一种功率控制方法。Zhang 和 Pathirana^[24]提出了一种隐马尔科夫模型并在此基础上提出了一种基于自适应隐马尔科夫模型估计的功率控制方法。Khuzani 等人^[25]针对马尔科夫衰落信道提出了自适应功率控制方法。Zeineddine 等人^[26]提出了一种具有信道估计误差的干扰消除功率控制方法。Li 等人^[27]提出了功率控制的匿名评价机制,但这些方法都没有考虑时变/随机时滞的影响。为此, Samie 等人^[28]提出了具有时变时滞的无线通信网络的功率控制。

2.2 无线通信网络的功率和速率控制

传统的无线通信网络主要以话音业务为主。对于话音业务,仅采用功率控制即可满足要求,因为其传输速率在通话期间保持不变。随着无线通信的迅猛发展,移动用户不仅要求提供高质量的话音业务,而且要求提供可以和桌上电脑相比拟的宽带接入和高速无线多媒体(包括语音、图像、视频和数据等)通信业务。多媒体业务和话音业务是2种不同类型的业务,它们对资源的需求具有截然不同的特点。多媒体业务一般具有突发性,可以容忍时滞及时滞抖动,但对差错敏感,前反向链路的需求不对称,服务质量(quality-of-service, QoS)等级多,追求的目标是系统的吞吐量最大化;话音业务相对连续,对时滞和时滞抖动敏感,但能容忍一定的差错,前反向链路需求对称,QoS等级相对单一,追求的目标是系统的容量最大化。

在无线通信网络中,为了平衡各个用户的服务质量,系统需要保持所接收到的比特能量与噪声的谱密度之比(E_b/N_0)为某一常数。一般说来,信道条件越差,所使用的发射功率就越大。然而,当信道处在深衰落时,即使系统以最大功率发射,也可能达不到所要求的 E_b/N_0 值。当这种状况的持续时间超过某一预先设定的门限时,已建立的连接就要被

迫中断,因而系统的中断概率就会增加。而且,由于传输误码率(bit error rate, BER)的增加,重传次数就要增大,从而使系统的信息吞吐量降低。如果当信道条件很差时,不能一味地增加发射功率,而是通过降低传输速率来维持信号的 E_b/N_0 值,那么不仅可以节省系统的功率资源,而且可以减小系统的中断概率,增加系统的容量和吞吐量。尤其是在时变的移动信道环境下,对于多媒体业务,如果用户接入时的数据速率在传输期间保持不变,那么信道的时变特性可能会导致无线资源的浪费。因此,对这种不同QoS要求的多媒体业务,需要对发射功率和传输速率进行控制。

无线通信网络的联合功率和速率控制近几年引起了业内的广泛关注,并取得了可喜的研究成果,提出了许多有效的功率和速率控制方法。总的来说,这些方法可以分为以下3类。

第1类方法是基于有效功率控制的资源配置。这类方法首先通过功率控制策略将用户的发射功率控制在期望的水平上,然后以网络吞吐量最大化为目标来进行网络资源配置,优化传输速率。其中基于凸优化^[29-33]和基于博弈论^[34-39]的功率和速率控制是这类方法中2种典型的方法。由于问题的复杂性,基于凸优化方法的大部分成果都局限于解决一个非凸的优化问题,只得到了次优的结果^[29,30]。即使有的成果将非凸的优化问题转化为凸优化问题得到了最优解,但假设条件是用户的信噪比足够高^[32,33],并且基于凸优化方法和基于博弈论方法的网络资源优化配置都是在假设系统已经具有完备的功率控制的前提下进行的。

第2类方法是基于用户功率和速率的快速监测来实时地调节功率和速率^[40-42]。这类方法的缺点是要求调节速度高于链路增益的改变速度,较少使用。

第3类方法是基于信噪比分配的功率控制^[43-48]。由于传输速率与信噪比有关,因此根据用户的业务类型和传输速率的要求首先对信噪比进行合理的分配,然后利用功率控制来调节用户的发射功率,使用户的信噪比达到期望值。这类方法可以对功率和速率进行“无缝”调节,具有较好的控制效

果,但缺点是对时滞比较敏感,并要求知道信道参数。对于信道参数未知的情况,Zhao 和 Mark^[47]采用自适应控制策略,通过在线辨识来获得信道参数,然后对功率和速率进行有效的控制。Chen 等人^[48]提出了一种自适应模糊功率和速率控制方法。Subramanian 和 Sayed 从控制理论的角度,提出了无线网络联合功率和速率控制系统的状态空间模型,在此基础上,考虑状态时滞和信道参数已知但信道参数具有不确定性的情况,提出了无线通信网络的联合功率和速率鲁棒控制方法^[1,2]。Kong 等人^[49]将 Subramanian 和 Sayed 的结果推广到了具有输入时滞的情况,继而提出了一种联合功率和速率的预测控制方法。Fonda 等人^[50]将其推广到了信道参数未知的情况,提出了联合功率和速率的鲁棒控制方法。Rubio 等人^[51]针对多用户的多变量系统提出了功率和速率控制方法。Xu 和 Li^[52]提出了联合功率控制和时间配置方法。Li 等人^[53]提出了联合最优拥塞控制和功率控制方法。然而,所有这些方法都假设传输时滞是已知的且固定不变的,没有考虑时变时滞和随机时滞的情况,也没有考虑网络故障的影响。

针对具有时变时滞的无线通信网络,Han 等人分别提出了自适应功率和速率控制方法^[54]、鲁棒功率和速率控制方法^[55]以及预测功率和速率控制方法^[56],继而针对随机时滞的无线通信网络,提出了鲁棒功率和速率控制方法^[57],另外针对具有输入和状态时滞的无线通信网络,分别提出了鲁棒功率和速率控制方法^[58]以及预测功率和速率控制方法^[59],并针对具有时变时滞和非线性信道衰落的无线通信网络,提出了一种自适应功率和速率控制方法^[60]。

2.3 无线通信网络的网络资源配置

无线信道和带宽是无线通信网络有限的网络资源,它将直接影响网络的性能和服务质量,因此,如何有效地进行网络资源配置成为近年来研究的热点^[61,62]。另外,无线通信网络有其自身的特点,例如,当某个小区 C_i 中的基站 BS_i 出现故障而没有可用的无线信道分配给 MS_i 时,可以向相邻的小区借一条可用的无线信道。这是信道的容错分配问题,已经引起了业内的关注,并取得了一些可喜的研究

成果^[3,63-67]。但到目前为止,所有研究都是围绕着信道的容错分配进行的。而将容错控制与功率和速率的联合控制结合起来,目前还未见报道。

3 目前研究中所存在的问题和可能的研究方向

综上所述,虽然无线通信网络的功率和速率控制已经取得了可喜的研究成果,但仍存在很多问题需要解决。下面简要地指出这些问题以及可能的未来研究方向。

3.1 无线通信网络的建模

到目前为止,大多数功率和速率控制方法所采用的系统模型都是一种带白噪声的线性模型^[8],虽然有的功率和速率控制方法采用了其他模型,如非线性模型^[21,22]、时变模型^[23]和隐马尔科夫模型^[24]等。Sharma 等人^[68]针对 1800 MHz 信号的 4G 网络提出了一种基于信道衰落预测的优化模型。Luo 等人^[69]针对 5G 网络提出了一种基于深度学习的信道状态信息预测方法。这些都是单纯地针对某一种特定情况来考虑,并没有将非线性信道衰落、随机信道衰落和时变信道衰落以及时变传输时滞和随机传输时滞放在整体的框架下统一考虑。因此,如何在统一的框架下,提出无线通信网络建模的新方法,建立同时考虑非线性信道衰落、随机信道衰落和时变信道衰落以及时变传输时滞和随机传输时滞的功率和速率控制系统的新模型,对于提高控制性能至关重要。

3.2 无线通信网络功率和速率容错控制

现有的 3 类功率和速率控制方法都试图解决网络资源的优化配置问题。第 1 类方法是基于有效功率控制的资源优化配置,缺点是在假设系统已经具有完备的功率控制的前提下进行的。第 2 类方法是基于用户功率和速率的快速监测来实时地调节功率和速率,缺点是要求调节速度高于链路增益的改变速度。第 3 类方法是基于信噪比分配的功率控制,缺点是对时滞比较敏感,而目前的研究都没有考虑时变时滞和随机时滞的影响。另外,到目前为止,这 3 类方法都没有考虑网络故障的影响。当网络出现

故障时,如何通过功率和速率的控制以及如何通过无线信道的容错分配来优化配置网络资源是一个具有挑战性的课题。

3.3 无线通信网络的故障诊断

现有的信道容错分配方法需要知道网络的故障模式,针对不同的网络故障采用不同的信道容错分配方法。但到目前为止,无线通信网络的故障诊断还没有相关的研究成果,因此很难知道网络的故障模式。由于无线通信网络在故障模式上与传统的网络化控制系统存在着较大的差异,这需要在网络化控制系统故障诊断方法的基础上进行一些创新性研究。

3.4 无线通信网络的网络资源容错配置

虽然无线通信网络的信道容错分配取得了一些研究成果,但到目前为止,所有成果都是由计算机软件编程实现的,没有从控制理论的角度来进行研究,也没有考虑无线信道容错分配中的优化问题,所得结果具有很大的局限性。另外,将无线通信网络的信道容错分配与功率和速率控制结合起来,目前还未见报道。而这是无线通信网络资源配置时必须解决的关键技术和难点。

4 结 论

本文在分析了无线通信网络中存在的特殊问题的基础上,对现有的功率和速率控制方法进行了综述,分析了现有方法存在的问题和不足,提出了从故障诊断和容错控制的角度来研究无线通信网络功率和速率控制的必要性,并给出了可能的研究方向。

参考文献

- [1] Subramanian A, Sayed A H. Joint rate and power control algorithms for wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(11): 4204-4214
- [2] Subramanian A, Sayed A H. A robust power and rate control method for state-delayed wireless networks [J]. *Automatica*, 2005, 41: 1917-1924
- [3] Boukerche A, Abrougui K, Huang T. QoS and fault-tolerant based distributed dynamic channel allocation protocol for cellular networks [C]. In: Proceedings of IEEE 30th Anniversary Conference on Local Computer Networks, Sydney, Australia, 2005. 59-67
- [4] Chen B S, Lee B K, Chen S K. Adaptive power control of cellular CDMA systems via the optimal predictive model [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(4): 1914-1927
- [5] Yang C Y, Chen B S. Robust power control of CDMA cellular radio systems with time-varying delays [J]. *Signal Processing*, 2010, 90: 363-372
- [6] Grandhi S A, Vijayan R, Goodman D J, et al. Centralized power control in cellular radio system [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1993, 42(4): 466-468
- [7] Foschini G J, Miljanic Z. A Simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1993, 42(4): 641 - 647
- [8] Koskie S, Gajic Z. SIR-based power control algorithms for wireless CDMA networks: an overview [J]. *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems*, 2006, 13: 187-220
- [9] Su H J, Geraniotis E. Adaptive closed-loop power control with quantized feedback and loop filtering [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(1): 76-86
- [10] Rintamaki M, Koivo H, Hartimo I. Adaptive closed-loop power control algorithms for CDMA cellular communication systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, 53(6): 1756-1768
- [11] Patachaianand R, Sandrasegaran K. An adaptive step size power control with transmit power control command aided mobility estimation [C]. In: Proceedings of the 4th IASTED Asian Conference on Communication Systems and Networks, Phuket, Thailand, 2007. 34-39
- [12] Patachaianand R, Sandrasegaran K. Performance study of new adaptive power control algorithm [C]. In: Proceedings of International Symposium on Communications and Information Technologies, Sydney, Australia, 2007. 505-510
- [13] Choi S O, You K H. Channel adaptive power control in the uplink of CDMA systems [J]. *Wireless Personal Communications*, 2008, 47(3): 441-448
- [14] Chen B S, Yang C Y, Li S Y. Adaptive two-loop power tracking control in CDMA systems with the utility optimization [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(4): 1358-1368
- [15] Höyhtyä M, Mämmelä A. Adaptive inverse power control using an FxLMS algorithm [C]. In: Proceedings of the 65th IEEE Conference on Vehicular Technology, Dublin,

- Ireland, 2007. 3021-3025
- [16] Aldajani M A, Sayed A H. Adaptive predictive power control for the uplink channel in DS-CDMA cellular systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2003, 52(6): 1447-1462
- [17] Rintamäki M, Koivo H. Adaptive robust power control for WCDMA systems [C]. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Atlantic, USA, 2001, 1: 62-66
- [18] Lestas I. Power control in wireless networks: stability and delay independence for a general class of distributed algorithm [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(5): 1253-1258
- [19] Han C, Sun D, Dong Z. Adaptive power control for wireless communication systems with time-varying delays [C]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communication Systems, Singapore, 2010. 705-709
- [20] Han C, Sun D, Li Z. Modified generalized predictive power control for wireless networked systems with random delays [C]. In: Proceedings of the 6th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Toronto, Canada, 2010. 509-514
- [21] Han C, Sun D, Li Y. Adaptive power control for wireless communication systems with nonlinear disturbances [C]. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, Wuhan, China, 2010. 261-264
- [22] Subramanian S, Shea J M, Dixon W E. Power control for cellular communications with channel uncertainties [C]. In: Proceedings American Control Conference, St. Louis, USA, 2009. 1569-1574
- [23] Subramanian S, Shea J M, Dixon W E. Prediction-based power control for distributed cellular communication networks with time-varying channel uncertainties [C]. In: Proceedings of the Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, Shanghai, China, 2009. 1998-2003
- [24] Zhang H, Pathirana P N. Uplink power control via adaptive hidden-Markov-model-based pathloss estimation [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2013, 12(4): 657-665
- [25] Khuzani M B, Saffar H E, Mitran P. On adaptive power control for energy harvesting communication over markov fading channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(2): 863-875
- [26] Zeineddine K, Honig M L, Nagaraj S. Uplink power allocation for distributed interference cancellation with channel estimation error [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(10): 6785-6795
- [27] Li S, Shao Z, Huang J. ARM: Anonymous rating mechanism for discrete power control [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2017, 16(2): 326-340
- [28] Samie H, Moulay E, Coirault P, et al. Power control in wireless cellular networks with a time-varying delay [J]. *Automatica*, 2017, 83: 179-185
- [29] Mark J W, Zhu S. Power control and rate allocation in multirate wideband CDMA systems [C]. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Atlanta, USA, 2000. 168-172
- [30] Chiang M. Balancing transport and physical layers in wireless multihop networks: jointly optimal congestion control and power control [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(1): 104-116
- [31] Papandriopoulos J, Dey S, Evans J. Optimal and distributed protocols for cross-layer design of physical and transport layers in MANETs [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(6)
- [32] Tran N H, Hong C S. Joint rate and power control in wireless network: a novel successive approximations method [J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(9): 872-874
- [33] Wai H, Li Q, Ma W. Discrete sum rate maximization for MISO interference broadcast channels: convex approximations and efficient algorithms [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(16): 4323-4336
- [34] Chen L, Leneutre J. A Game theoretic framework of distributed power and rate control in IEEE 802.11 WLANs [J]. *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, 2008, 26(7): 1128-1137
- [35] Ginde S, MacKenzie A, Buehrer R, et al. A game theoretic analysis of link adaptation in cellular radio networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(5): 3108-3120
- [36] 李可维,涂来,王芙蓉,等. 联合速率控制与功率分配的多信道无线网络跨层优化 [J]. *电子学报*, 2009, 36(6): 1203-1209
- [37] Musku M R, Chronopoulos A T, Popescu D C, et al. A Game-theoretic approach to joint rate and power control for uplink CDMA communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(3): 923-932
- [38] Zhang X J, Gong Y, Letaief K B. On the diversity gain in MIMO channels with joint rate and power control based on noisy CSITR [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(1): 68-72
- [39] Yuan S, Liang Q. Game theoretical method for sum-rate maximization in full-duplex massive MIMO Heterogeneous

- Networks [J]. *Signal Processing*, 2016, 126: 4-11
- [40] Jantir R, Kim S. Selective power control with active link protection for combined rate and power management [C]. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Tokyo, Japan, 2000. 1960-1964
- [41] Ulukus S, Greenstein L J. Throughput maximization in CDMA uplinks using adaptive spreading and power control [C]. In: Proceedings of IEEE 6th International Symposium on Spread-spectrum Techniques and Application, Parsippany, USA, 2000. 565-569
- [42] Berggren F, Kim S L. Energy-efficient control of rate and power in DS-CDMA systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(3): 725-733
- [43] Chai C C, Tjhung T T, Leck L C. Combined power and rate adaptation for wireless cellular systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(1): 6-13
- [44] Kim S W, Lee Y H. Combined rate and power adaptation in DS/CDMA communications over Nakagami fading channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2000, 48(1): 162-167
- [45] Mo R, Chen Y H, Chai C C. Capacity of DS/CDMA system under multipath fading with different adaptive rate adaptive power schemes [C]. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, New Orleans, USA, 2003. 190-195
- [46] Bahaei M S, Kingue M M, Charbit G. Joint optimisation of outer-loop power control and rate adaptation over fading channels [C]. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Los Angeles, USA, 2004. 26-29
- [47] Zhao L, Mark J W. Joint rate and power adaptation for radio resource management in uplink wideband code division multiple access systems [J]. *IET Communications*, 2008, 2(4): 562-572
- [48] Chen Y L, Lin Y S, Wang J W, et al. Adaptive fuzzy-based rate management and power control in multimedia CDMA cellular systems [J]. *Computer Communications*, 2008, 31: 1901-1910
- [49] Kong S L, Zhang H S, Zhang Z S, et al. Joint predictive control of power and rate for wireless networks [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(7): 761-764
- [50] Fonda J W, Jagannathan S, Watkins S E. Joint adaptive distributed rate and power control for wireless networks [C]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Singapore, 2008. 3216-3221
- [51] Rubio J, Pascual-Iserte A, Palomar D P, et al. Joint optimization of power and data transfer in multiuser MIMO systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(1): 212-227
- [52] Xu D, Li Q. Joint power control and time allocation for wireless powered underlay cognitive radio networks [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 6: 294-297
- [53] Li C, Xie R, Huang T, et al. Jointly optimal congestion control, forwarding strategy and power control for named-data multihop wireless network [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 1013-1026
- [54] Han C, Sun D, Shi Y, et al. Adaptive power and rate control for wireless networks with time-varying delay [C]. In: Proceedings of IASTED International Conference on Control and Applications, Honolulu, USA, 2013. 60-66
- [55] Han C, Sun D, Liu L, et al. Robust H_∞ power and rate control for wireless networks with time-varying delay [C]. In: Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, Shenyang, China, 2014. 4537-4541
- [56] Han C, Sun D, Liu L, et al. Robust model predictive power and rate control for uncertain wireless networks with time-varying delays and input constraints [C]. In: Proceedings of the 26th Chinese Control Conference, Nanjing, China. 2014. 5547-5552
- [57] Han C, Sun D, Shi Y, et al. H_∞ power and rate control for wireless networks with random communication delays [C]. In: Proceedings of the 8th Asian Control Conference, Kaohsiung, China, 2011. 149-154
- [58] Han C, Sun D, Bi S, et al. Modeling and model predictive power and rate control of wireless communication networks [J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2014, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/642673>
- [59] Han C, Sun D, Li X, et al. Robust H_∞ power and rate control for uncertain wireless networks with time-varying state and input delays [C]. In: Proceedings of the 19th World Congress of International Federation of Automatic Control, Cape Town, South Africa, 2014. 9721-9726
- [60] Han C, Li M, Li Y, et al. Adaptive power and rate control for wireless communication networks with nonlinear channel fading and time-varying delays [J]. *IFAC Papers On Line*, 2017, 50-1: 6552-6557
- [61] Yang Z, Huang N, Xu H, et al. Downlink resource allocation and power control for device-to-device communication underlaying cellular networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(7): 1449-1452
- [62] Jiang Y, Liu Q, Zheng F, et al. Energy-efficient joint resource allocation and power control for D2D communications [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*,

- 2016, 65(8): 6119-6127
- [63] Cao G, Singhal M. Distributed fault-tolerant channel allocation for cellular networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(7): 1326-1337
- [64] Tipper D, Dahlberg T. Providing fault tolerance in wireless access networks [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2002, 44(1): 58-64
- [65] Yang J, Jiang Q, Manivannan D. A fault tolerant channel-allocation algorithm for cellular networks with mobile base stations [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(1): 349-361
- [66] Sridevi A, Sumathi V. Improved fault tolerant model for channel allocation in wireless Communication [C]. In: Proceedings of International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation, Perundurai, India, 2009. 1-6
- [67] Kim V, Liu W, Cheng W, et al. An improved fault-tolerant model for channel assignment in cellular networks [C]. In: Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, Chengdu, China, 2010. 1-5
- [68] Sharma P, Sharma D, Sai T V. Optimization of propagation path loss model in 4G wireless communication systems [C]. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Inventive Systems and Control, Coimbatore, India, 2018. 1245-1248
- [69] Luo C, Ji J, Wang Q, et al. Channel state information prediction for 5G wireless communications: a deep learning approach [J]. *IEEE Transactions on network Science and Engineering*, 2018, doi: 10.1109/TNSE.2018.2848960

Review of power and rate control for wireless communication networks

Han Cunwu, Tong Wei, Li Mengqi, Liu Lei

(Beijing Key Laboratory of Fieldbus Technology and Automation,
North China University of Technology, Beijing 100144)

Abstract

Power and rate control is a key technology for wireless communication networks, which plays an important role in increasing quality of service, reducing energy consumption, and utilizing limited network resources effectively. Based on analysis of the special problems in wireless communication networks, such as network faults, channel fading, transmission delays and optimal allocation of network resources, this paper gives a review on power and rate control as well as network resource allocation for wireless communication networks, and indicates the existing problems and possible research directions.

Key words: wireless communication networks, power control, rate control, network resource allocation