



# 无线通信网络中的功率控制

## 及相关控制理论问题

作者：赵云波

Power Control in Wireless Communication Networks

and the Interrelated Control Theory Problems

(中国科学院数学与系统科学研究院, 北京 100080) 赵云波, 张纪峰

**摘要:** 介绍了无线通信网络中的功率控制问题, 分析了功率控制与传统控制问题的异同, 指出了可能存在的若干控制理论问题, 提出了一些可能有效的解决方法和思路。

**关键词:** 功率控制; 控制理论; 无线通信网络; ad hoc 网络

**Abstract:** This paper introduces the power control problems in the wireless communication networks. The similarity and difference between the power control and the conventional control problems are investigated. Some potential control theory problems are also pointed out, and the effective methods and ideas to solve these problems are given.

**Key words:** Power control; Control theory; Wireless communication network; ad hoc network

### 1 引言

无线通信网络在很多领域都得到了广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。按照控制方式的不同, 这类网络大致可以分为两类。一类是集中控制式网络, 以蜂窝电话系统为代表。在蜂窝网络中, 每个基站和在此基站内的手机通过“手机-基站”的控制模式形成一个简单的单跳无线网络, 基站(以及移动中心)对网络运行负有控制职责; 另一类则是分布控制式网络, 以 ad hoc 网络为代表。在 ad hoc 网络中, 节点没有主次之分, 共同对网络的运行负责, 网络的设计符合计算机网络“分层设计、层间独立”的设计原则<sup>[3,4]</sup>。

无线通信网络中的节点往往能量有限并且共享传播媒体, 前者要求在达成通信要求的前提下尽量减少无线节点的能量消耗, 后者则需要各个节点使用最合适的发射功率来减轻信号之间的干扰。在计算机网络中, 不同的功率分配策略甚至会导致不同的网络拓扑, 影响网络的连通。这些都对有效的功率控制策略提出了迫切的要求<sup>[3,4,5,6]</sup>。

功率控制的目标是减少无线节点的能量消耗, 减轻网络

收稿日期: 2005 - 08 - 16

基金项目: 国家自然科学基金项目(60334040)“复杂动态系统的建模与控制及其算法实现”资助。

作者简介: 赵云波, 男, 中科院系统控制重点实验室硕士研究生, 主要研究方向为无线通信网络中的功率控制; 张纪峰, 男, 中国科学院数学与系统科学研究院研究员、博士生导师、系统科学研究所副所长、系统控制重点实验室主任、中国自动化学会理事、副秘书长, 《系统科学与数学》和《自动化学报》副主编、美国 IEEE 协会高级会员, 研究方向为系统建模与适应控制。

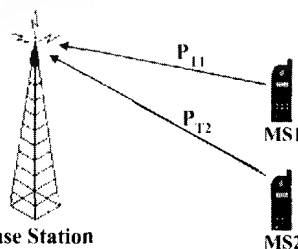


图1 集中式控制: 蜂窝网络

中的信号干扰, 更好的利用无线媒体, 达成所需的通信要求。功率控制是无线蜂窝网络中的一项关键技术, 在 CDMA 和 WCDMA 等蜂窝网络中起着不可替代的作用; 在 ad hoc 网络中, 其设计跨越网络中物理层、MAC 层、网络层、传输层等若干层次, 影响到网络连通性、拥塞控制、路由算法等重要问题<sup>[7,8]</sup>, 是 ad hoc 网络中的一个核心问题。

目前, 功率控制问题已得到不同学科领域(如通信、网络、计算机等)学者的广泛关注, 取得了一系列研究成果。这些研究大多是从网络和通信技术的角度, 提出新的功率控制算法和基于功率控制的接入控制与路由算法, 对算法进行仿真和性能分析等<sup>[8,9]</sup>。本文试图从控制理论的角度, 分析功率控制中存在的控制理论问题, 提出一些可能有效的解决方法。

### 2 问题描述与分析

无线通信网络中的功率控制问题是在网络节点能量有限、信道存在衰减等若干限制条件下, 利用网络中有限的反馈信息, 调节各无线节点的发射功率, 使网络满足连通性、容量最大化、稳定性等若干控制目标的一类控制问题。

由于实际网络的固有特性, 无线通信网络的功率控制问题有不同于传统控制问题的特点。

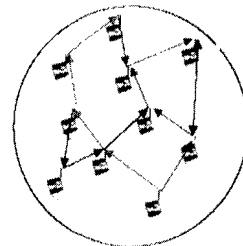


图2 分布式控制: ad hoc 网络

#### 2.1 有限的控制信息

在无线通信网络中, 由于下面的原因, 使得只有有限的信

息能够用于指导无线节点的功率调节:

## (1) 有限的带宽

无线带宽是网络中的稀缺资源。为使有用数据传输最大化,控制信息的通信量要受到严格的限制。如在 CDMA 系统的反向闭环功率控制中,仅使用一个比特携带反馈的功率控制信息。

## (2) ad hoc 网络中缺少中心设施以提供反馈控制信息

与蜂窝网络中的“手机-基站”模式不同,ad hoc 网络中所有节点都处于相同的层次上,没有地位特别重要的节点来控制各节点的功率分配。这使得在 ad hoc 网络中配置基于反馈的功率控制策略变得尤为困难。

## (3) 反馈控制信息的精确及时与带宽有限的矛盾

在实际的通信网络中,反馈的控制信息都是经过离散的时间间隔来传送的。时间间隔越短,反馈信息就越及时,调节也越精确,但因此而耗费的通信带宽资源也越多,反过来也是如此。

## 2.2 不可信任的控制结构

### (1) 不可信任的无线媒体

无线电波的传输要经受衰减,并受到周围环境噪声的干扰,一般而言,不经过确认,人们无法确信任何信号的传输是准确有效的,即便是控制信道上的信号也是如此,这造成了功率控制信息的不可信任。

### (2) 功率控制引发单向信道

尤其是在 ad hoc 网络中,由于信道衰减在方向上的不同,更重要的是因为采取的功率控制策略的影响,并非所有的节点都使用相同的信号发射功率,因而无法保证所有的信道都是双向的。而单向信道使得功率控制过程无法形成闭环。

## 2.3 执行机构的局限

作为功率调节的执行机构,无线节点往往并不能任意调节自己的发射功率。一般而言,节点的发射功率有严格的上限,同时在这个上限以内,功率也往往不能连续调节,而是只有几个离散的功率可用。以 CISCO Aironet 350 系列无线网卡为例,它仅有 6 个可调的功率水平(1, 5, 20, 30, 50 和 100 mW)<sup>[10]</sup>。

## 2.4 局部性与异步性

局部性的含义是指,无线节点在功率调节的过程中,往往并不具有网络中所有节点的功率信息,它们只能使用局部的信息,专注于自己的功率调节,而无法顾及其它节点的功率调节行为。在 CDMA 网络中,无线节点只跟当前小区中的基站联系,通过二者之间的信息交互,调节各自的功率水平。在 ad hoc 网络中,节点功率的调节也同样只能依赖它与周围的有限节点的局部信息交流。另外,各个节点的功率调节行为相互之间是独立的(或者只有邻近的几个节点有关联),没有一个全局的时钟来同步所有节点的调节行为。因而,从整个网络的角度看,这种调节是异步进行的。

## 2.5 复杂性

### (1) 子系统复杂互联

就 CDMA 网络中的功率控制系统而言,每个手机跟基站

之间都是一个独立的反馈控制系统,整个网络就是多个独立的反馈控制系统联合形成的一个复杂的大系统,而这种联合是比较松散的:各个小的反馈系统独立运作,它们之间仅通过发射信号功率的干扰而互相影响。这不同于传统意义上反馈系统的串联或并联。

ad hoc 网络没有蜂窝网络中明确的“手机-基站”模式的反馈系统,它里面的节点通过控制信息的反馈所形成的子系统以及子系统之间的互联模式要比蜂窝网络中更加复杂和难以处理。

### (2) ad hoc 中的功率控制策略影响网络多个层

作为一类特殊的计算机网络,ad hoc 网络的设计同样要遵循计算机网络分层设计、各层功能独立、层间提供接口的设计理念。但由于无线网络中功率控制的特殊性,它的设计会影响到网络的几个层。首先,功率的调节影响信号是否可以正确传输,从而影响到物理层和 MAC 层;其次,各个无线节点不同的功率分配,影响到邻近的节点是否可达,这可能会导致不同的网络拓扑,从而影响到网络层的设计;另外,节点采用过大的功率有可能会阻塞信息的传输,而拥塞控制是传输层的任务。

这样,ad hoc 网络中的功率控制就跟计算机网络分层设计、层间独立的设计思路产生了矛盾。

## 2.6 多个控制目标

功率控制问题存在多个控制目标。可以从网络和控制的角度分为两类。

### (1) 网络角度

#### • 网络连通性

在 ad hoc 网络中,不合适的功率分配可能会使有的节点被孤立到网络之外,因而保持网络的连通性是功率控制策略的基本要求。

#### • 能量消耗

为了移动便利,无线节点一般由电池供电,在有些情况下,比如为森林防火而由飞机撒布传感器形成的无线网络,网络布好以后不允许再更换无线节点的电池。因而,在这些情况下,节省节点的能量消耗成为一项重要的要求。

#### • 网络容量

在蜂窝网络中,网络的容量一般是指小区中可以同时正常通话的用户数的最大值。而在 ad hoc 网络中,网络容量可能有不同的描述方式,比较常见的是“传输容量”的概念,它是网络发送的信息量与发送距离的乘积<sup>[11]</sup>。功率控制很重要的一个目标就是通过调节各节点的功率分配,使得网络达到最大的容量。

#### • 传输时延

这个指标是就 ad hoc 网络而言的。ad hoc 网络是分组多跳网络,功率控制策略会影响分组到达目的节点的路由,从而影响到传输时延。使网络具有较小的传输时延也是功率控制的重要目标之一。

### (2) 控制角度

#### • 收敛性



收敛性是功率控制算法的基本要求。不收敛或者不能快速收敛到稳定值的算法会严重损害网络的性能，甚至造成网络的崩溃。

• 鲁棒性

鲁棒性要求在网络受到外界的干扰或者由于节点的移动造成网络拓扑改变的等情况下，功率控制算法有良好的适应能力。由于外界干扰和节点移动等原因是不可避免的，鲁棒性也是功率控制算法必须具备的品质。

### 3 存在的控制理论问题

基于上述分析，笔者认为在无线通信网络的功率控制中至少存在如下的控制理论问题。

(1) 面向控制的建模

建模是分析问题的第一步。考虑到实际网络的复杂性，建立一个面向控制的模型并不容易。蜂窝网络中的“手机—基站”模式有着比较明确的反馈含义，因而在其中对功率控制问题建立一个面向控制的模型相对易于着手，现在也有了一些这样的结果<sup>[9]</sup>。而 ad hoc 网络中虽然存在着反馈控制信息，但具体的反馈模式则依赖于具体的功率控制策略，难以建立一个通用的模型。这方面的研究还需要加强。

(2) 网络连通性

连通是网络正常运行的基本要求。对一个节点不断移动，网络拓扑不断变化的网络，如何调节各个节点的发射功率，才能够使网络保持连通？网络节点密度和节点功率水平等因素是通过怎样的机制影响网络连通的？它们之间的确切关系是什么？这都是非常基本而又重要问题。

(3) 基于反馈的功率控制算法

功率控制算法的研究结果已经有很多，但从控制理论的角度，基于“输入—输出—反馈”的模式的研究并不多。考虑到无线通信网络的功率控制问题在本质上具有控制理论意义下的反馈系统的基本特点，如 CDMA 网络的反向闭环功率控制实际上就是一个反馈控制系统。因此，如何利用控制理论中已有的思想和工具设计基于反馈的功率控制算法，将会是一个有趣的研究课题。

(4) 对算法的性能评价

上文列出了功率控制所应该达到的网络和控制两方面的若干目标。对现有的功率控制算法，按照提出的这些控制目标，比较它们的优劣，也会是一件有意义的工作。

(5) 多目标设计

功率控制问题存在着多个控制目标。一般而言，不存在一种算法使得所有的目标都达到最优，事实上，有些目标之间本身就是矛盾的。那么，应该如何在控制目标之间进行折衷，使功率控制策略达到最好的效果呢？在这里，有些目标是必须首先满足的，如对网络连通性的要求和算法稳定性的要求。

### 4 解决方法

由于无线通信网络功率控制问题的特殊性和复杂性，经

典控制论中的传递函数法和现代控制论中的状态控制法等控制理论中的许多方法在这里都失效了<sup>[9]</sup>，因此，有必要探讨新的研究思路和方法。

(1) 控制 Lyapunov 函数思想

控制 Lyapunov 函数的基本思想是：如果知道值函数，最好的方法是在当前时刻，选择使值函数最小的控制动作，而不考虑将来的情况（换句话说，忽略系统的动态），这样做就能确切的实现问题的最优控制。也就是说，值函数就是代价函数，使其最小化实际上实现了考虑系统动态的原始问题的最优控制。

值函数思想能巧妙的过渡到异步系统。通常多执行器必须协同工作。简单的实验表明同时运行两个有自己的传感器和执行器的反馈系统，将导致性能下降，甚至不稳定。但是如果有一个可以分别最小化的值函数或控制 Lyapunov 函数，则一切正常了；（依照值函数）控制动作得到了自动协调。

文献<sup>[9]</sup>中指出，控制 Lyapunov 函数思想也许可以在异步的基于包的 网络环境中得到应用。而在功率控制问题里，一个很直接的想法是，可否借用控制 Lyapunov 函数的概念来考虑功率控制算法这种异步算法的稳定性，进而指导算法设计呢？

(2) 大系统理论

在蜂窝网络中，单个手机与基站之间的功率控制过程实际上就是一个简单的反馈控制系统，而整个小区正是由这许多的子系统通过各自信号强度的影响耦合成的一个大系统。ad hoc 网络中也有类似的耦合，只不过这里面的耦合比起蜂窝网络中更复杂更隐蔽。

这个耦合成的系统因各种干扰而具有不确定性，因信息分散、控制分散而具有“非经典信息模式”，并且信道的衰减情况、子系统的个数等都随时间变化，因而这也是一个发展中系统：这些都是大系统的典型特征<sup>[12]</sup>。

使用大系统理论中已取得的成果，比如广义模型建模、稳定性分析、最优控制和协调控制等来研究功率控制问题，可能会催生有益的结果。

(3) 博弈论

从博弈论的观点来看，功率控制的过程就是网络中的节点为了有效的信息传输 而进行博弈的过程。这些网络节点是理性的，也知道其他节点是理性的，而且都采取同样的策略调节自己的行为，并且这种调节行为是独立的，与其他节点的调节互不干扰。这些特征也正是非合作博弈中的完全信息静态博弈的特征<sup>[13]</sup>。此外，基于网络中所有节点信息而得到的全局最优方案在实际中是难以实行的，但它给出了实际算法的性能上界。这种方案需要网络中的所有节点都具有这样的智能，它们知道所有其他节点的功率信息，并且也知道如何利用这些信息来调节自己的功率，以达到全局最优的效果。从博弈论的角度来看，这相当于是在寻找一个合作博弈的均衡结果。因此，利用博弈论中已有的方法和理论来研究功率控制问题，可能会有助于问题的有效解决。

(下转 96 页)



