

无线通信中的最优资源分配—复杂性分析与算法设计

刘亚锋

摘要

最优资源分配问题是无线通信系统设计中的基本问题之一。最优地分配功率、传输波形、频谱等资源能够极大地提高整个通信系统的传输性能。从用户的角度,多用户之间的相互干扰是制约整个通信系统高速稳健传输的最主要因素,适当地分配系统资源可以有效地消除多用户之间的相互干扰,从而提高整个通信系统的传输性能。从系统运营者的角度,最优地分配系统资源可以有效地提高功率和频谱等昂贵资源的利用率,从而降低运营费用。目前,相对于通信技术在现实生活中的蓬勃发展,通信系统优化的数学理论和方法显得相对滞后,在某些方面已经成为影响其发展和应用的关键因素,因此研究通信中的资源分配问题是非常有意义的。

本文研究无线通信中的最优资源分配问题,这些问题常常是带有特殊结构的非凸非线性优化问题。一方面,通信中的最优资源分配问题常常具有高度的非线性性,一般情况下难于求解;另一方面,这些优化问题又有自身的特殊结构,例如隐含的凸性和可分结构等。本文着重考虑多用户干扰信道中物理层资源最优分配问题的复杂性刻画,以及如何利用问题的特殊结构设计计算有效且满足实时性和分布式应用等实际要求的计算方法。

本论文首先考虑多输入单输出 (MISO) 干扰信道中的合作波束成形设计问题。在无线通信中,处在小区边沿的用户常常受到来自其他小区的严重干扰,我们考虑利用合作波束成形的提高处在小区边沿用户的传输速率。Luo 和 Zhang (2008) 分析了在单天线情况下此问题的计算复杂性。我们证明在多天线情况下调和平均和几何平均这两个效用函数准则下的最优合作波束成形设计问题是 NP-难的,这一结果完全不同于单天线时的结果。对于一般的效用函数,我们提出了一种非精确循环坐标下降法,并证明此方法产生的点列全局收敛于原问题的 KKT 点。该算法的最大优点在于只需交换少量信息,每个基站就可以调整各自的波束成形向量。

其次,我们讨论多用户多输入多输出 (MIMO) 干扰信道中干扰对齐的可行性判定问题。Cadambe 和 Jafar (2008) 证明干扰对齐能够使得多用户时变信道无干扰地传输最多一半的信号数。Yetis 等 (2009) 和 Gomadam 等 (2008) 指出判断常数 MIMO 干扰信道中干扰对齐的可行性是一个公开问题。我们完备地刻画了此问题的计算复杂性。我们证明,当每个传输端装有的天线数大于或等于 3 (2) 每个接收端装有的天线数大于或等于 2 (3) 时,干扰对齐的可行性判定问题是强 NP-难的。我们也讨论干扰对齐问题的进一步推广,如干扰对齐松弛问题和干扰极小化问题等。

再次,我们考虑最大最小准则下的联合传输/接收波束成形设计问题。我们证明在 MIMO 干扰信道中,给定一组信干噪比 (SINR) 目标,判断是否存在一组可行的传输/接收波束成形向量使得每个用户的 SINR 值大于或等于预先给定的 SINR 目标这一可行性判定问题是强 NP-难的,这一结果完全不同于 MISO 干扰信道中的已有结果。上述结果也说明 MIMO 干扰信道中的最小 SINR 最大化问题是强 NP-难的。考虑到问题的特殊结构,我们提出交替地升级传输波束成形向量和接收波束成形向量,从而将原问题分解为一系列简单凸优化子问题。我们证明提出算法产生的点列的任一聚点都是原问题的 KKT 点。

最后,我们考虑单输入单输出 (SISO) 干扰信道中联合功率/接入控制问题。传统的功

率控制通过发射最小的功率满足系统中所有用户的 SINR 要求。但是，由于系统资源的有限性以及系统中同频用户之间的相互干扰，系统中用户的 SINR 要求常常不能同时满足。我们考虑联合功率/接入控制问题，即通过剔除一部分用户使得系统中剩余用户的 SINR 要求得到满足，目标是极大化系统中同时服务的用户个数，并且极小化系统总发射功率。我们首先证明此联合设计问题可以等价地转化为一个稀疏优化问题；然后对其进行松弛，进一步证明松弛问题本质为线性规划；我们也给出了系统中所有用户可同时接入的必要条件，以及系统可同时接入最多用户数的上界估计；基于前述分析，我们设计了一个启发式的逐步删除用户算法。数值试验表明提出的算法好于当前这一问题公认的两个最好算法。