

数据驱动下基于感知频谱的物联网数据传输

李轩衡¹, 孙怡¹, 王洁², 张海霞³

(1. 大连理工大学信息与通信工程学院, 辽宁 大连 116023; 2. 大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026;
3. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250002)

摘要: 面向海量数据造成的频谱短缺问题, 以共享为解决手段, 研究了运营商如何合理利用感知频谱传输数据。考虑物联网设备的局限性, 设计了超密集认知异构网络架构, 基于流量需求和感知开销设计了最优的接入控制和感知决策方法, 以实现网络效用最大化。考虑感知频谱的不确定性, 将最优规划方案建模成混合整数随机优化问题, 并提出了数据驱动下基于统计特征的概率随机求解方法, 在可用带宽概率分布未知的情况下, 统计满足各种服务请求的数据传输要求。

关键词: 频谱共享; 感知频谱; 网络效用; 频谱不确定性; 数据驱动

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00103

Data-driven data transmission of the Internet of things based on sensing spectrum

LI Xuanheng¹, SUN Yi¹, WANG Jie², ZHANG Haixia³

1. School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China
2. Information Science and Technology College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China
3. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250002, China

Abstract: Facing the problem of spectrum shortage caused by the mass data, in order to share as a solution, how operators use the sensing spectrum reasonably to transmit data was studied. Considering the limitation of Internet of things(IoT) devices, the ultra-dense cognitive heterogeneous network architecture was designed, based on traffic demand and perception cost, an optimal access control and perception decision method was designed to maximize network utility. Considering the uncertainty of the perceived spectrum, the optimal programming scheme was modeled as a mixed integer stochastic optimization problem, and a data-driven probabilistic solution method based on statistical characteristics was proposed. In the case of unknown probability distribution of available bandwidth, data transmission requirements meeting various service requests were counted.

Key words: spectrum sharing, sensing spectrum, network utility, spectrum uncertainty, data-driven

1 引言

随着信息技术的飞速发展, 人与物品需要“对话”, 物品之间需要“交流”, 促使万物互联的物联网 (IoT, Internet of things) 时代到来^[1]。海量设备入网使得移动数据流量呈现前所未有的骤增

趋势, Cisco 公司的预测白皮书显示, 到 2021 年, 全球移动入网设备将超过 100 亿部, 从 2016 年到 2021 年, 全球流量将增长 7 倍。爆发式的流量增长需要更多的频谱作为支撑, 国际电信联盟预测, 到 2020 年, 全球大多数国家将存在 1 000 MHz 以上的频谱赤字^[2], 如何为蜂窝网补充足够的频

收稿日期: 2018-10-29; 修回日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61801080); 大连理工大学基本科研业务费资助项目 (No.DUT18RC(3)012)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61801080), The Fundamental Research Funds of Dalian University of Technology (No.DUT18RC(3)012)

谱资源以应对大规模 IoT 数据传输已成为 5G 蜂窝网络的研究重点之一。

考虑中低频段 (<6 GHz) 频谱资源的拥挤现状, 目前对 5G 频谱的补充策略主要针对尚未利用的高频段进行开发, 如 24.25~29.5 GHz、31.8~33.4 GHz 等。然而, 高频段存在覆盖范围小、信号衰落大等缺点, 仅适用于某些特殊场景, 难以作为 5G 网络的基础频段以提供覆盖广的数据传输。因此, 如大量报告显示, 低、中、高频段的多样化频谱补充是未来网络的必由之路^[3]。目前, 在静态频谱管理策略下, 不同系统以专享的方式固定使用某段频谱, 这使得中低频段, 尤其是具有良好传输特性的低频段 (<3 GHz) 几乎被分配殆尽, 因此, 如何实现多样化频谱扩充, 尤其是 3 GHz 以下的“黄金频段”频谱扩充, 对于未来承载 IoT 数据传输重任的 5G 网络来说至关重要。

虽然中低频段已十分拥挤, 但在专享分配方式下, 大量地域和时段内存在严重的频谱闲置现象, 导致频谱利用率低下, 这与网络对频谱资源的迫切需求形成了强烈的矛盾^[4]。因此, 近年来, 学者们开始重新审视静态频谱管理的合理性, 并提出将“专享”变为“共享”的管理理念, 即频谱共享^[3,5-6]。具体来说, 频谱共享允许没有频谱牌照的用户机会式地使用频谱牌照商空闲的频谱。在共享中, 牌照商是主用户, 其对频谱具有优先使用权; 非牌照商是次用户, 其对频谱的使用需要以不影响主用户为前提, 当主用户欲使用时, 次用户需要及时退出并清空该频段。这种共享模式可以在不改变频谱规划现状的前提下, 有效提高频谱利用率, 被视为未来多样化频谱资源补充的有效手段, 一些欧美国家政府已开始对此进行尝试以缓解频谱短缺危机, 如欧洲在 2.3 GHz 频段提出的授权共享接入 (LSA, licensed shared access) 方案、美国在 3.5 GHz 频段提出的频谱接入系统 (SAS, spectrum access system) 等^[3]。

认知无线电 (CR, cognitive radio) 被视为实现频谱共享的重要技术手段^[7-9]。通过感知周围频谱环境, CR 能有效获取各频带的使用状态, 并据此进行自身传输参数的调整, 从而实现对各空闲频带的动态接入, 而这些被捕获的空闲频谱被称为感知频谱。基于共享模式引入感知频谱能够有效实现对频谱的多样化补充, 缓解海量数据给网络容量带来的冲击。因此, 近年来, 学者们提出了基于感知频谱

传输 IoT 数据的思想, 被称为 CR-IoT^[10-12]。尽管该方案能缓解频谱稀缺对 IoT 发展的制约, 但其仍存在许多问题急需解决。

首先, 大量 IoT 设备是能耗受限的, 其通信模块的设计相对简单, 很难承担复杂的 CR 功能, 甚至不具备直接使用各感知频带的能力。因此, 对于运营商来说, 如何基于感知频谱为各 IoT 服务商提供数据传输是一个难点。

其次, 如何制定最佳的频谱感知策略是另一个重要问题。目前, 对于频谱感知的研究大多是从物理层角度出发^[13-14], 针对不同类型的接收信号设计不同的处理和分析方法, 以提高频谱感知精度, 如能量检测算法^[15]、匹配滤波器设计方法^[16]、特征检测算法^[17]等。感知结果的正确性固然重要, 但感知频谱的目的是传输数据, 所以频谱感知需要与实际的流量需求紧密结合, 从网络层角度考虑, 应妥善规划各节点的感知策略, 即不同节点在不同时段、针对哪些频段进行感知。具体来说, 由于频谱感知存在一定开销, 如能量消耗、感知时延、频谱租金等, 所以各网络节点对频谱的感知不能简单地对全频段进行扫频, 而是要根据具体的流量需求进行妥善规划, 以最低的感知代价满足传输要求, 同时, 应考虑不同节点之间的同频干扰问题, 避免邻近节点在同频段上进行感知, 从而造成不必要的感知开销。

另外, 感知频谱与传统的注册频谱不同, 受主用户行为的制约, 其在一段时间内的可用性存在不确定性, 被称为频谱不确定性, 这为感知策略的制定带来了挑战, 如何在不确定性的频谱供应条件下满足数据的传输需求是一个难题。实际上, 感知频谱的不确定性在许多针对频谱共享的研究中都被考虑。在参考文献[18]中, Zhang 等假设不同感知频带具有不同可用概率, 并据此设计了频谱接入、功率控制、用户规划联合方案。在参考文献[19]中, Li 等假设各感知频带在每个时隙中的可用概率服从伯努利独立同分布, 并据此设计了频谱分配方案。在参考文献[20]中, Cheng 等将各感知频带的可用时长建模成服从指数分布的随机变量, 并据此为 CR 车联网设计了动态频谱接入方案。现有工作在考虑频谱不确定性时, 大多给定感知频带的可用概率, 或假设其可用时长 (带宽) 服从某个具体概率分布。然而, 在实际场景下, 这些概率信息通常很难获得, 其可用时长 (带宽) 的真实分布可能与

采用的假设分布相差甚远，这将限制方案设计的可行性。尽管一些数据驱动的预测算法能够对这些概率信息进行估计，如线性预测、马尔可夫模型预测、神经网络预测等^[21]，但通过估计得到的概率分布通常有误差，基于这些具有误差的概率分布对感知频谱进行评估，并据此设计感知策略很可能导致实际的传输需求无法被满足。因此，在制定规划方案时，为保证数据传输质量，需要对频谱的不确定性进行有效评估。

针对上述存在的问题，本文的主要贡献点如下：1) 设计了超密集认知异构网络架构，通过在网络边缘布设认知中继节点，为海量 IoT 设备提供多制式入网连接，并在网络内部实现基于感知频谱的数据传输；2) 从服务提供角度出发，针对具体传输需求设计了最优的网络规划方案，包括接入控制和感知决策，以实现网络效用（收益—开销）的最大化；3) 考虑频谱的不确定性，将最优规划方案建模成混合整数随机优化问题，以一定概率满足各服务请求的传输速率要求。针对该随机优化问题，与现有工作中基于概率分布假设的求解方法不同，考虑在实际场景下难以获得感知频谱的精确概率分布信息，设计了数据驱动下基于统计信息（期望和方差）的概率稳健求解方法，使得规划结果在所有满足该统计特性的概率分布下，均能保证各服务的数据传输性能。

2 超密集认知异构网络

2.1 网络模型

通常来说，大量物联网设备具有低成本、低功耗特性，其通信模块的设计一般相对简单，很难像许多关于 CR-IoT 的文献中所假设的那样具有宽带频谱感知功能，甚至不具备直接使用感知频段的能力。因此，针对频谱短缺问题，政府如何在频谱管理策略上做出共享的调整，允许运营商动态地接入其他频谱牌照商的空闲注册频谱，如何有效地发现这些空闲频谱并合理利用将成为一个难题，是实现基于感知频谱的 IoT 数据传输的掣肘。

除了上述针对感知频谱的动态接入问题，随着设备数量的骤增，如何实现大规模设备接入对于未来网络来说同样是一项挑战。基于蜂窝网的 IoT 设备通常只能工作在注册频谱中，如 NB-IoT、eMTC、LTE 等。传统的设备远距离直连基站的模式会使得稀缺的注册频谱迅速饱和。超密集组网是解决这一问题的有效手段^[22]，通过密集化地布设基站，终端设备入网的“最后一公里”将被明显缩短，不仅可以降低设备的发射功率，还可以大幅度提升频谱的复用效率，实现设备的大规模连接。因此，受参考文献^[22]和参考文献^[23]中超密集组网和认知网络架构设计的启发，介绍一种超密集认知异构网络架构。

超密集认知异构网络如图 1 所示，该架构是对

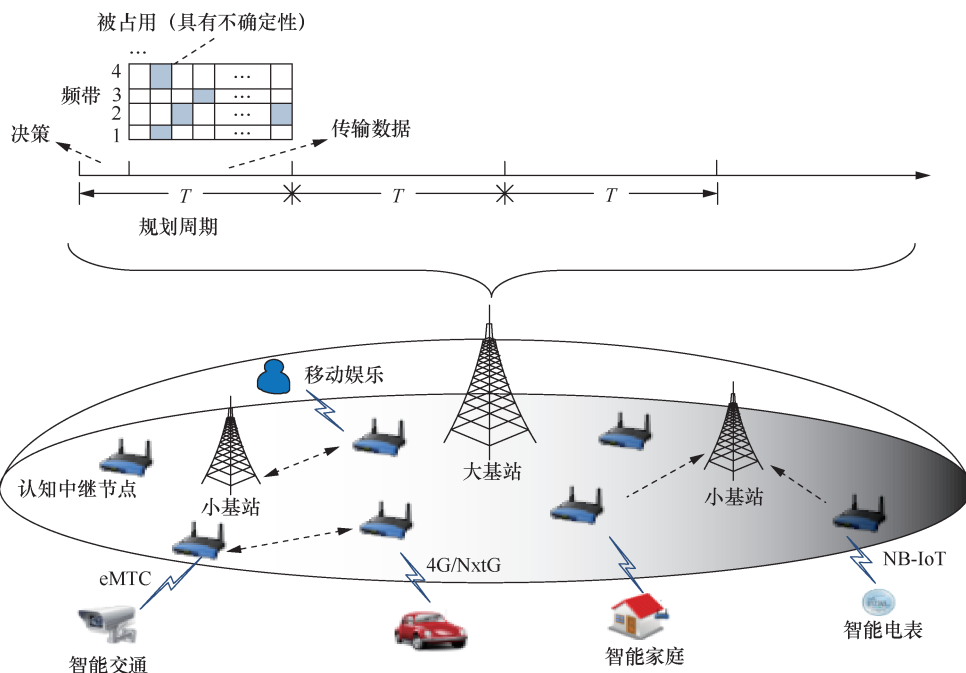


图 1 超密集认知异构网络

现有蜂窝异构网络的一种改进,一方面,其密集化地布设了很多中继节点,为终端设备提供了近距离、多制式的网络接入;另一方面,其为所有网络节点配备了CR功能,在网络端实现对感知频谱的动态接入,避免了对终端设备的过高要求。具体来说,网络中有大基站、小基站、认知中继节点3种基础设施。其中,大基站主要负责整个网络的传输规划和对各节点的控制;小基站相当于网络中的数据汇聚节点,与互联网相连,为各云端服务商提供数据;认知中继节点主要负责进行细粒度的频谱感知和网络中的数据传递。每个认知中继节点都能够基于软件定义的方式工作于多个频段上,一方面,在网络边缘为各物联网设备提供多种接入方式,使得不同类型的物联网设备都可以自由入网,同时,其密集化的布设可以大幅度增加设备的连接数量;另一方面,其在设备与设备、设备与用户、设备与基站之间建立了能够工作于感知频段的传输链路,不仅使得基于感知频谱的数据传输成为可能,还能够建立多种灵活的传输方式,如在智慧交通场景下,当车辆想下载某个路口的监控视频用于路况分析时,车辆与摄像头之间的信息交互可以基于认知中继节点,利用设备到设备的短距离通信链路实现,无须经过基站进行远距离数据传递。

值得注意的是,海量的设备接入和密集的网络节点布设将会增大系统的控制开销。一方面,基站需要对海量终端进行接入控制;另一方面,基站需要协调各节点感知和使用的频带。控制开销与网络的规划周期密切相关,规划周期越短,能够提供的服务越多,但需要的控制开销也越大。若想权衡控制开销和服务提供,需要综合考虑网络拓扑结构和动态服务需求,以设计最佳的规划周期,同时,可以采用中心式与分布式相结合的混合模式以减小基站的控制开销。这些不是本文的重点,将作为未来的研究工作之一。

由于感知频谱具有一定的不确定性,所以它们通常只能为具有一定时延容忍度的服务提供数据传递功能,这种服务在现实生活中十分常见,如智能抄表、智能井盖、视频下载等,它们对于数据传输的要求不是即时的,而是在一段时间内完成即可。本文由于针对各节点的感知策略进行研究,所以仅考虑这种类型的服务请求(对时延敏感的服务仅能通过稳定的注册频谱实现),并假设它们的数据完全通过感知频谱进行传输(设备的接入链路由

注册频谱实现,后续网络节点间的数据传输由感知频谱实现)。

假设网络在每个 T 时间内进行一次规划,即根据流量收取费用和频谱感知开销,决定在该时间段内接受哪些服务请求(接入控制)以及各认知中继节点针对哪些频段进行感知以满足这些服务的数据传输需求(感知决策)。具体来说,在每个规划周期开始时,大基站会通过各网络节点(小基站及认知中继节点)收集网络中的服务请求(各物联网设备与其临近的网络节点相连,并上传其服务请求)。假设网络中共有 L 个服务请求,每个请求 $l \in \mathcal{L}$ 对应的信息包括源节点 s_l 、目的节点 d_l 和数据量 z_l 。由于需要在 T 时间内完成 z_l 的数据传输,所以对传输存在 $r_l = z_l/T$ 的速率要求,如在20 min内完成1 200 Mbit的监控数据传输,即对网络的传输速率要求为1 Mbit/s。假设网络中被授权可以使用的感知频段共有 M 个,根据收集的服务请求信息,大基站会进行最优的网络规划并将结果通过控制信道通知给各网络节点。本文所提方案属于一种准静态方案,即每 T 时间内收集一次服务请求并进行一次网络规划,在该规划周期内到达却未被响应的服务请求将在下一个规划周期内被处理。考虑服务请求到达的动态性,可以将基于数据驱动流量预测算法与本文的方法进行结合,在每个规划周期内针对前瞻的流量需求进行规划,将本文的方法扩展到动态场景中,以更加及时、有效地响应各规划周期内动态到达的服务请求。

2.2 通信链路模型

考虑节点 i 到节点 j 之间的通信链路,根据参考文献[24],采用式(1)功率传播模型

$$g_{ij} = \tau d_{ij}^{-\alpha} \quad (1)$$

其中, τ 是与天线相关的参数, d_{ij} 是两个节点之间的距离, α 是路径衰减系数。假设节点 i 在频带 $m \in \mathcal{M}$ 上的发射功率为 p_i^m ,频带 m 的带宽为 W_m ,则该链路在频带 m 上的容量为

$$c_{ij}^m = W_m \text{lb} \left(1 + \frac{p_i^m g_{ij}}{\gamma W_m} \right) \quad (2)$$

其中, γ 表示噪声功率密度。式(2)没有考虑来自其他节点的干扰,因为不同链路间的同频干扰已在后文的网络规划中被避免。

尽管频带 m 的带宽为 W_m ,但由于主用户行为

的不确定性,其在规划周期 T 内的可用性并不确定,被称为频谱不确定性。从时间平均角度来看,其等效可用带宽达不到 W_m 。例如,一个带宽为 10 MHz 的频带,假设其在 20 min 内仅有 2 min 可用,则该频带在这段时间内的等效可用带宽仅为 1 MHz。因此,考虑频谱不确定性问题,本文将频带 m 在规划周期 T 内的等效可用带宽 \tilde{W}_m 建模成一个随机变量,相应地,其能够实现的等效容量也将成为随机变量,计算方法与式(2)相同。

3 基于效用最大化的最优网络规划方案

3.1 目标函数

对于运营商来说,当面对 L 个服务请求制定最优的网络规划时,包含两个方面:一是接入控制,即接受哪些服务请求并为其提供数据传输;二是各服务请求对应的数据源节点的感知决策,即针对哪些频段进行感知并利用其完成数据传输。前者可以带来收益,即流量费用;而后者会产生开销,即对其他牌照商的频谱进行使用 and 感知时需要付出的代价。因此,如何综合考虑流量收益和感知开销,最终实现效用的最大化是网络规划的重点。

由于某些服务请求可能具有相同的源节点和目的节点,所以, L 个服务请求将对应 $K \leq L$ 条通信链路(某些链路承载多个服务请求)。对于任意一条链路 $k \in \mathcal{K}$, 用一个“0-1”型整数变量 x_k^m 表示该链路的源节点是否感知并使用频带 m 传输数据, $x_k^m = 1$ 表示感知;否则, $x_k^m = 0$ 。对于任意一个服务请求 l , 用一个“0-1”型整数变量 w_l 表示是否接受该请求, $w_l = 1$ 表示接受;否则, $w_l = 0$ 。假设每传输 1 bit 收取的流量费用为 ϕ , 感知并使用频带 m 的代价为 q^m (如交给对应牌照商的使用租金), 则网络规划的目标函数可表示为

$$\text{Max } U = \phi \sum_{l \in \mathcal{L}} w_l r_l - \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_k^m q^m \quad (3)$$

也就是使网络的总效用最大化。

3.2 约束条件

在进行网络规划时,约束条件主要包含两个方面,一是在制定频谱感知和使用策略时,要避免不同链路之间的同频干扰;二是对于接受的服务请求,要满足它们对应的传输速率要求。

3.2.1 约束条件的第一方面

首先,若链路 k 在频带 m 上进行感知并完成数

据传输,即 $x_k^m = 1$, 则与该链路具有相同源节点的链路不能再使用该频带,即

$$\sum_{\{k|i_k=i\}} x_k^m \leq 1, \quad \forall i \in \mathcal{S} \quad (4)$$

其中, i_k 表示链路 k 的源节点, \mathcal{S} 表示 K 个链路的所有源节点集合。同理,与该链路具有相同目的节点的链路也不能使用该频带,即

$$\sum_{\{k|j_k=j\}} x_k^m \leq 1, \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (5)$$

其中, j_k 表示链路 k 的目的节点, \mathcal{D} 表示 K 个链路的所有目的节点集合。

其次,当 $x_k^m = 1$ 时,所有以该链路的目的节点作为源节点的链路都不能工作于该频带,即

$$x_k^m + x_t^m \leq 1, \quad \forall t: i_t = j_k \quad (6)$$

另外,假设任意节点的干扰容忍度为 p_{th} , 即当且仅当干扰功率小于 p_{th} 时,干扰才能被忽略不计。则根据式(1)可知,当节点 i 以功率 p_i^m 在频带 m 上发射信号时,其存在一个干扰半径

$$R_i^m = (\tau p_i^m / p_{th})^{1/\alpha} \quad (7)$$

所有位于该半径内且工作在频带 m 上的其他链路的接收端都会受节点 i 的干扰,这些节点被称为节点 i 在频带 m 上的干扰邻居,记为

$$\mathcal{I}_i^m = \{j | d_{ij} \leq R_i^m, j \neq i\} \quad (8)$$

因此,当 $x_k^m = 1$ 时,对于任意链路 $t \neq k$, 若其目的节点是 i_k 在频带 m 上的干扰邻居,则为了避免来自 i_k 的干扰,链路 t 不能工作于该频带,即

$$x_k^m + x_t^m \leq 1, \quad \forall t: j_t \in \mathcal{I}_k^m \quad (9)$$

3.2.2 约束条件的第二方面

考虑任意链路 k , 其承载的服务请求集合记为 \mathcal{L}_k , 即所有以 i_k 和 j_k 为源节点和目的节点的服务请求集合,则该链路感知和使用的频带需要满足其承载的服务请求对应的总传输速率要求,即

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} x_k^m c_{i_k j_k}^m \geq \sum_{l \in \mathcal{L}_k} w_l r_l \quad (10)$$

然而,如 2.2 节所述,在规划时间段内,受主用户行为的制约,频带 m 具有不确定性,其等效可用带宽可能达不到 W_m 。本文将其建模成一个随机变量 \tilde{W}_m , 而式(10)则可以相应地建模成如下概率约束

$$\Pr\left(\sum_{m \in \mathcal{M}} x_k^m \tilde{c}_k^m \geq \sum_{l \in \mathcal{L}_k} w_l r_l\right) \geq \beta \quad (11)$$

其中, $0 < \beta < 1$ 是置信水平, 以 $\beta = 0.9$ 为例, 该约束表示以 90% 的可能性保证该链路上的传输速率要求。 \tilde{c}_k^m 是与 \tilde{W}_m 相关的随机变量, 其计算方法相当于将式(2)中的 W_m 替换为 \tilde{W}_m 。

综上所述, 当大基站收集了本规划周期内的服务请求信息后, 最优的规划方案相当于求解一个混合整数随机优化问题, 以式(3)作为目标函数, 即效用最大化, 以式(4)、式(5)、式(6)、式(9)和式(11)作为约束条件, 而决策变量则为各服务请求的接入控制变量 w_l 以及各链路源节点的频谱感知和频谱使用策略 x_k^m 。

4 统计数据驱动的概率顽健性的求解方法

为了求解上节建模的优化问题, 难点在于处理概率约束式(11)。大多数现有工作在处理这类问题时, 通常假设其中随机变量的概率分布函数已知, 并据此假设, 将概率约束变成确定约束, 然后对优化问题进行求解。然而, 这种基于具体的模型假设的求解方法会使最终得到的结果具有局限性。此外, 对于本文涉及的等效可用带宽来说, 其概率分布函数很难获得, 即使可以通过大数据分析进行估计, 但最终得到的分布通常不精确, 甚至可能与真实分布差别很大。采用这种具有误差的概率分布函数进行求解时, 很可能导致最终得到的优化结果无法真正满足该概率约束条件。基于以上考虑, 本文在处理约束式(11)时, 并未假定随机变量 \tilde{c}_k^m 的概率分布函数, 而是采用基于历史数据的统计信息(期望和方差), 将该约束转化为一个具有概率顽健性的约束条件。随后, 利用拉格朗日对偶原理将该概率顽健优化问题转化为半正定规划问题进行求解。

4.1 基于统计特征的概率顽健性约束

将概率约束式(11)重新写成如式(12)矢量形式

$$\Pr(\mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k \leq \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}_k) \leq 1 - \beta \quad (12)$$

如上文所述, 对于链路 k , 各频带能够实现的等效链路容量 ($\tilde{\mathbf{c}}_k$ 中的每个元素) 是一个随机变量, 假设其统计特征满足

$$\mathbb{E}[\tilde{\mathbf{c}}_k] = \boldsymbol{\mu}, \quad \mathbb{E}[(\tilde{\mathbf{c}}_k - \boldsymbol{\mu})(\tilde{\mathbf{c}}_k - \boldsymbol{\mu})^T] = \boldsymbol{\Sigma} \quad (13)$$

其中, $\boldsymbol{\mu}$ 是期望矢量, $\boldsymbol{\Sigma}$ 是协方差矩阵, 这些统计特征可以通过历史数据近似获得。令 \mathbb{Q} 表示 $\tilde{\mathbf{c}}_k$ 的概率分布, 由于其统计特征满足式(13), 则可以认为 \mathbb{Q} 属于如下概率分布函数集合

$$\mathcal{P} = \left\{ \mathbb{Q} \left| \begin{array}{l} \mathbb{E}[\tilde{\mathbf{c}}_k] = \boldsymbol{\mu}, \quad \mathbb{E}[1] = 1 \\ \mathbb{E}[(\tilde{\mathbf{c}}_k - \boldsymbol{\mu})(\tilde{\mathbf{c}}_k - \boldsymbol{\mu})^T] = \boldsymbol{\Sigma} \end{array} \right. \right\} \quad (14)$$

据此, 可以将约束式(12)替换为具有概率顽健性的形式, 即在满足统计特性式(13)的前提下, 在最差的概率分布情况下保证式(12)成立。用公式可以表示为

$$\max_{\mathbb{Q} \in \mathcal{P}} \Pr(\mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k \leq \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}_k) \leq 1 - \beta \quad (15)$$

该约束仅利用了统计特征, 并没有限定特定的概率分布函数, 将使最终的优化结果具有概率顽健性。

4.2 基于半正定规划的求解方法

本节将针对式(15)进行处理, 将其转化成一系列半正定规划约束。首先, 定义如下指示函数

$$I(\tilde{\mathbf{c}}_k) = \begin{cases} 1, & \mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k \leq \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}_k \\ 0, & \mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k \geq \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}_k \end{cases} \quad (16)$$

基于此指示函数, 式(15)可以重新表示为

$$\max_{\mathbb{Q} \in \mathcal{P}} \mathbb{E}[I(\tilde{\mathbf{c}}_k)] \leq 1 - \beta \quad (17)$$

为处理式(17), 给出如下定理。

定理 1 考虑如下优化问题 (P1)

$$\pi = \min_{\mathbb{Q}} \mathbb{E}[-I(\tilde{\mathbf{c}}_k)] \quad (18)$$

s.t.

$$\mathbb{E}[\tilde{\mathbf{c}}_k] = \boldsymbol{\mu}, \quad \mathbb{E}[1] = 1 \quad (19)$$

$$\mathbb{E}[(\tilde{\mathbf{c}}_k - \boldsymbol{\mu})(\tilde{\mathbf{c}}_k - \boldsymbol{\mu})^T] = \boldsymbol{\Sigma} \quad (20)$$

若 $\mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k \neq \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}_k$, 则相当于求解如下半正定规划问题 (P2)

$$\pi = \max_{\mathbf{y}, \mathbf{y}_0, \mathbf{Y}, \eta} -(y_0 + \mathbf{y}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{Y} \otimes (\boldsymbol{\Sigma} + \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{\mu}^T)) \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \frac{1}{2} \mathbf{y} \\ \frac{1}{2} \mathbf{y}^T & y_0 \end{bmatrix} \succeq 0 \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \frac{\mathbf{y} + \eta \mathbf{x}_k}{2} \\ \frac{\mathbf{y}^T + \eta \mathbf{x}_k^T}{2} & y_0 - 1 - \eta \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}_k \end{bmatrix} \succeq 0, \quad \eta \geq 0 \quad (23)$$

其中, \mathbf{y} 、 y_0 和 \mathbf{Y} 是与式(19)和式(20)中的 3 个约束相关的拉格朗日乘子, \otimes 表示 Frobenius 内积。

在证明该定理前, 首先给出如下引理, 被称为 Farkas 引理^[25]。

Farkas 引理 考虑如下凸函数: g_0, \dots, g_m , 若存在一个可行点 $\hat{\mathbf{x}}$ 使得 $g_i(\hat{\mathbf{x}}) < 0$, $i=1, \dots, m$, 则下面两个命题互为充分必要条件。

- 1) 若 \mathbf{x} 满足 $g_i(\mathbf{x}) \leq 0$, $i=1, \dots, m$, $g_0(\mathbf{x}) \geq 0$ 。
- 2) 对于任意 \mathbf{x} , 存在 $\xi_i \geq 0$ 使得式(24)成立。

$$g_0(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m \xi_i g_i(\mathbf{x}) \geq 0 \quad (24)$$

证明 该引理的证明可参考文献[25]。

下面, 基于 Farkas 引理和拉格朗日对偶原理给出定理 1 的证明。

证明 对于式(19)和式(20)中的 3 个约束分别引入拉格朗日乘子 $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^M$, $y_0 \in \mathbb{R}$ 和 $\mathbf{Y} \in \mathbb{S}^M$, 由此可构建如式(25)所示的拉格朗日函数, 进而可获得 P1 的拉格朗日对偶问题如式(26)

$$\begin{aligned} \Gamma(\mathbb{Q}, \mathbf{y}, y_0, \mathbf{Y}) = & \\ & \mathbb{E}[-I(\tilde{\mathbf{c}}_k) + \mathbf{y}^T \tilde{\mathbf{c}}_k + \mathbf{Y} \otimes \tilde{\mathbf{c}}_k \tilde{\mathbf{c}}_k^T + y_0] - \\ & \mathbf{y}^T \boldsymbol{\mu} - \mathbf{Y} \otimes (\boldsymbol{\Sigma} + \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{\mu}^T) - y_0 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\max_{\mathbf{y}, y_0, \mathbf{Y}} \left(\min_{\mathbb{Q}} \Gamma(\mathbb{Q}, \mathbf{y}, y_0, \mathbf{Y}) \right) \quad (26)$$

考虑概率分布函数 \mathbb{Q} , 由于仅已知其属于函数集合 \mathcal{P} , 统计特征满足式(13), 并没有在形状上对其进行限制, 因此, 若使 $\min_{\mathbb{Q}} \Gamma(\mathbb{Q}, \mathbf{y}, y_0, \mathbf{Y})$ 有解,

则需要满足

$$\mathbf{y}^T \tilde{\mathbf{c}}_k + \mathbf{Y} \otimes \tilde{\mathbf{c}}_k \tilde{\mathbf{c}}_k^T + y_0 \geq I(\tilde{\mathbf{c}}_k) \quad (27)$$

进而, P1 的对偶问题将变成如下形式

$$\max_{\mathbf{y}, y_0, \mathbf{Y}} - \left(y_0 + \mathbf{y}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{Y} \otimes (\boldsymbol{\Sigma} + \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{\mu}^T) \right) \quad (28)$$

s.t.

$$\mathbf{y}^T \tilde{\mathbf{c}}_k + \mathbf{Y} \otimes \tilde{\mathbf{c}}_k \tilde{\mathbf{c}}_k^T + y_0 \geq 0, \quad \forall \tilde{\mathbf{c}}_k \quad (29)$$

$$\mathbf{y}^T \tilde{\mathbf{c}}_k + \mathbf{Y} \otimes \tilde{\mathbf{c}}_k \tilde{\mathbf{c}}_k^T + y_0 \geq 1, \quad \forall \tilde{\mathbf{c}}_k : \mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k \leq \mathbf{w}_k^T \mathbf{r} \quad (30)$$

首先, 对于式(29)来说, 可以写成如下形式

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{c}}_k^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \frac{1}{2} \mathbf{y} \\ \frac{1}{2} \mathbf{y}^T & y_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{c}}_k \\ 1 \end{bmatrix} \geq 0 \quad (31)$$

显然, 式(31)与式(22)是等效的, 因此, 式(29)可以等效于式(22)。下面, 证明在 $\mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k \neq \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}$ 的情况下, 可以将式(30)等效为式(32)约束

$$\mathbf{y}^T \tilde{\mathbf{c}}_k + \mathbf{Y} \otimes \tilde{\mathbf{c}}_k \tilde{\mathbf{c}}_k^T + y_0 - 1 + \eta (\mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k - \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}) \geq 0 \quad (32)$$

其中, $\eta \geq 0$ 。首先, 若 $\inf (\mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k - \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}) < 0$, 则根据 Farkas 引理, 可以得出式(30)与式(32)等效, 成立。其次, 若 $\inf (\mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k - \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}) > 0$, 此时约束式(30)相当于不存在, 令 $\eta = 1 / (\mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k - \mathbf{w}_k^T \mathbf{r})$, 可以发现, 式(32)相当于一个冗余约束, 成立。综上所述, 若 $\mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k \neq \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}$, 式(30)可等效转化为式(32)。

与式(31)的处理方式类似, 式(32)可以写成式(33)形式

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{c}}_k^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \frac{\mathbf{y} + \eta \mathbf{x}_k}{2} \\ \frac{\mathbf{y}^T + \eta \mathbf{x}_k^T}{2} & y_0 - 1 - \eta \mathbf{w}_k^T \mathbf{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{c}}_k \\ 1 \end{bmatrix} \geq 0 \quad (33)$$

式(30)与式(23)中的半正定约束等效, 因此, 约束式(30)可以等效转化为式(23)。综上所述, 可以得出定理 1 的结论。

$\max_{\mathbb{Q} \in \mathcal{P}} \mathbb{E}[I(\tilde{\mathbf{c}}_k)] = -\pi$, 因此, 由定理 1 可以得出, 若 $\mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k \neq \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}$, 约束式(17)相当于一个存在性验证 (P3), 即

$$\exists (\mathbf{y}, y_0, \mathbf{Y}, \eta) \quad (34)$$

s.t.

$$y_0 + \mathbf{y}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{Y} \otimes (\boldsymbol{\Sigma} + \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{\mu}^T) \leq 1 - \beta \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \frac{1}{2} \mathbf{y} \\ \frac{1}{2} \mathbf{y}^T & y_0 \end{bmatrix} \succeq 0 \quad (36)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \frac{1}{2} \mathbf{y} \\ \frac{1}{2} \mathbf{y}^T & y_0 \end{bmatrix} \succeq \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\frac{\eta \mathbf{x}_k}{2} \\ -\frac{\eta \mathbf{x}_k^T}{2} & 1 + \eta \mathbf{w}_k^T \mathbf{r} \end{bmatrix}, \quad \eta \geq 0 \quad (37)$$

实际上, 约束式(32)中的 $\eta (\mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k - \mathbf{w}_k^T \mathbf{r})$ 一定不为零。

证明 若该项为零, 令 $\tilde{\mathbf{c}}_k = \boldsymbol{\mu}$, 并将其代入式(32), 可以得出

$$\mathbf{y}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{Y} \otimes \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{\mu}^T + y_0 \geq 1 \quad (38)$$

根据式(36)可知, \mathbf{Y} 和 $\boldsymbol{\Sigma}$ 均是半正定 Hermite

矩阵, 由 Neumann 不等式^[26]可以得出

$$\mathbf{Y} \otimes \boldsymbol{\Sigma} = \text{tr}(\mathbf{Y}\boldsymbol{\Sigma}) \geq 0 \quad (39)$$

因此,

$$y_0 + \mathbf{y}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{Y} \otimes (\boldsymbol{\Sigma} + \boldsymbol{\mu}\boldsymbol{\mu}^T) \geq 1 \quad (40)$$

与式(35)矛盾, 因此, $\eta(\mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k - \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}) \neq 0$ 。由此可知, 约束式(17)与求解问题 P3 是等价的。

综上所述, 通过将概率约束式(11)替换为概率顽健形式, 并根据该节中设计的半正定规划处理方法, 第3节中制定的最优网络规划方案相当于求解如下优化问题 (P4)

$$\max \phi \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}_k - \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbf{x}_k^T \mathbf{q} \quad (41)$$

s.t.

$$\sum_{\{k|i_k=i\}} \mathbf{x}_k \leq \mathbf{1}, \quad \forall i \in \mathcal{S} \quad (42)$$

$$\sum_{\{k|j_k=j\}} \mathbf{x}_k \leq \mathbf{1}, \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (43)$$

$$\mathbf{x}_k + \mathbf{x}_t \leq \mathbf{1}, \quad \forall t: i_t = j_k, \quad k \in \mathcal{K} \quad (44)$$

$$\mathbf{x}_k + \mathbf{x}_t \leq \mathbf{1}, \quad \forall t: j_t \in \mathcal{I}_k^m, \quad k \in \mathcal{K} \quad (45)$$

$$y_0 + \mathbf{y}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{Y} \otimes (\boldsymbol{\Sigma} + \boldsymbol{\mu}\boldsymbol{\mu}^T) \leq 1 - \beta \quad (46)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \frac{1}{2} \mathbf{y} \\ \frac{1}{2} \mathbf{y}^T & y_0 \end{bmatrix} \succeq 0 \quad (47)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \frac{1}{2} \mathbf{y} \\ \frac{1}{2} \mathbf{y}^T & y_0 \end{bmatrix} \succeq \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\frac{\eta \mathbf{x}_k}{2} \\ -\frac{\eta \mathbf{x}_k^T}{2} & 1 + \eta \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}_k \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$\eta \geq 0 \quad (49)$$

该优化问题是一个混合整数非线性半正定规划问题, 其求解过程主要存在两个难点。首先是非线性。由于 $\eta(\mathbf{x}_k^T \tilde{\mathbf{c}}_k - \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}) \neq 0$, 所以 $\eta \neq 0$, 令 $\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y}/\eta$, $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{y}/\eta$, $\tilde{y}_0 = y_0/\eta$, $\tilde{\eta} = 1/\eta$, 并将它们代入式(46)、式(47)和式(48)中, 可以将这3个约束重新写为式(50)、式(51)和式(52)线性形式。

$$\tilde{y}_0 + \tilde{\mathbf{y}}^T \boldsymbol{\mu} + \tilde{\mathbf{Y}} \otimes (\boldsymbol{\Sigma} + \boldsymbol{\mu}\boldsymbol{\mu}^T) \leq (1 - \beta) \tilde{\eta} \quad (50)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Y}} & \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{y}} \\ \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{y}}^T & \tilde{y}_0 \end{bmatrix} \succeq 0 \quad (51)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Y}} & \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{y}} \\ \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{y}}^T & \tilde{y}_0 \end{bmatrix} \succeq \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\frac{\mathbf{x}_k}{2} \\ -\frac{\mathbf{x}_k^T}{2} & \tilde{\eta} + \mathbf{w}_k^T \mathbf{r}_k \end{bmatrix} \quad (52)$$

其次是处理“0-1”型整数变量, 许多文献中设计的启发式探索解法都可以用于求解该问题, 如分支界定法、“松弛—固定”法等^[27]。

5 仿真结果与分析

5.1 基于概率顽健性约束的性能评估

本节将通过仿真验证第4节中提出的基于统计特征的概率顽健性求解方法, 并分析随机变量的统计参数和采用的置信水平对最终优化结果的影响。为简化实验过程并更直观地体现实验结论, 本节针对如下简化问题进行仿真: 考虑某条链路, 假设有两个频带可以使用, 且它们能够实现的等效链路容量为两个独立的具有相同期望、相同方差的随机变量, 基于某置信水平评估该链路能够实现的传输速率。根据式(12), 该问题相当于求解

$$\max \{r_1 : \Pr(\mathbf{x}^T \tilde{\mathbf{c}} \leq r_1) \leq 1 - \beta\} \quad (53)$$

其中, $\mathbf{x} = [1 \ 1]^T$, $\tilde{\mathbf{c}} = [c_1 \ c_2]^T$ 表示这两个频带能够实现的等效容量。根据式(15), 该问题对应的概率顽健形式为

$$\max \left\{ r_2 : \max_{\mathbf{Q} \in \mathcal{P}} \Pr(\mathbf{x}^T \tilde{\mathbf{c}} \leq r_2) \leq 1 - \beta \right\} \quad (54)$$

基于具体概率约束和概率顽健性约束的链路传输速率评估如图2所示, 图2展示了通过式(53)和式(54)计算得到的该链路能够实现的传输速率, 其中, 图2(a)是期望为10、方差为0.2的链路传输速率; 图2(b)是期望为10、方差为2的链路传输速率。两次实验均考虑了3种概率分布情况: 1) 两个变量均服从正态分布; 2) 两个变量均服从均匀分布; 3) 两个变量分别服从正态分布和均匀分布, 并考虑了3种置信水平: 0.7、0.8和0.9。对于式(53), 采用蒙特卡洛实验方法进行求解; 对于式(54), 采用4.2节中设计的半正定规划方法, 其求解通过MATLAB和CVX 8.0实现。

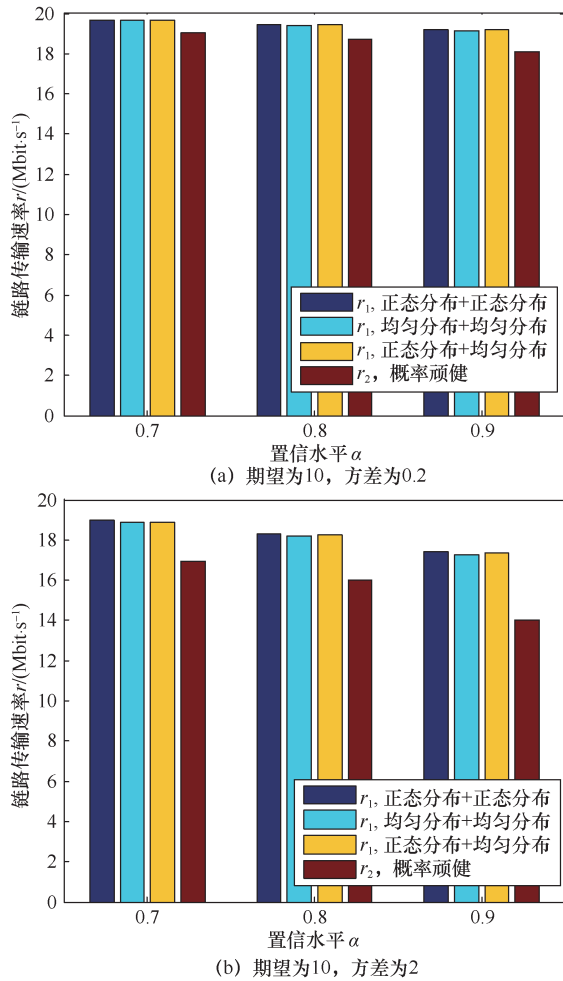


图2 基于具体概率约束和概率顽健性约束的链路传输速率评估

由图2可知, 首先, 基于概率顽健性约束得到的结果小于基于具体概率约束得到的结果, 因为前者是从所有符合同样统计特征的概率分布函数中, 挑选最差的情况, 并使其满足概率约束; 后者则是针对某一具体概率密度分布进行的计算, 即式(54)相当于式(53)的下界。这种对性能的保守性评估可以在统计特征已知、具体概率分布函数未知的情况下, 有效地保证数据传输的性能。其次, 比较图2(a)和图2(b)可以看出, 当变量的方差增大时, 基于概率顽健性约束得到的结果明显降低, 这是因为方差增大意味着历史数据具有更明显的波动性, 若想在此情况下达到同样的置信水平, 对性能的评估需要更加保守, 因而导致结果下降。此外, 比较图2(a)和图2(b)不同的置信水平可以看出, 置信水平越高, 对应的性能评估越保守, 其相应的结果越低。

5.2 最优网络规划方案实例分析

本节首先通过一个具体实例阐述和分析第3节中设计的最优网络规划方案。考虑一个覆盖范围为

1 000 m×1 000 m 的网络, 共有 11 个网络节点, 其中一个基站位于网络中心, 10 个认知中继节点随机分布在网络中, 网络拓扑图如图3所示。

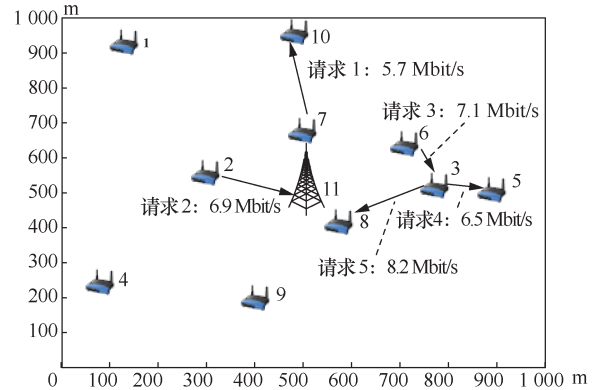


图3 网络拓扑图

假设该网络中共有 5 个服务请求, 每个请求的源节点和目的节点都是从 11 个网络节点中随机选取的, 传输速率要求分别为 5.7、6.9、7.1、6.5 和 8.2 (本小节中所有涉及传输速率的单位均为 Mbit/s), 图3中标注了这 5 个请求的具体信息。假设网络中共有 3 个频带允许进行感知和使用, 其等效带宽服从独立均匀分布, 均值分别为 1.5、2.5 和 3.5 (本小节中所有涉及带宽的单位均为 MHz), 方差均为 0.2。网络中的传输参数设置为: 与天线相关的参数 $\tau=2$; 路径衰减系数 $\alpha=2$; 每个节点在任意频带上的传输功率均为 2 W; 每个节点的干扰半径为 400 m; 每个接收端的噪声功率密度 $\gamma=10^{-16}$ W/Hz。

各频带在任意链路上的等效容量的期望和方差通过 1 000 次数据采样得到 (相当于基于 1 000 个历史数据获得)。假设流量收益 $\phi=1$, 3 个频带的感知开销均为 1, 对速率要求保证的置信水平 $\beta=0.7$ 。通过求解第 4 节最后整理的优化问题 P4, 可以得到各频带的感知开销均为 1 时的最优网络规划方案如图 4 所示。在本次实验中, 相比流量收益, 频谱的感知开销较小, 因此, 该规划方案相当于尽可能地满足网络中的服务请求, 同时避免不必要的频谱浪费, 即用最少的频谱提供最多的流量。如图 4 所示, 请求 1、请求 2、请求 3 和请求 4 均被接受, 分别通过感知频带 3、感知频带 2、感知频带 1 和感知频带 3 实现, 最终获得的总效用为 22.2。其中, 由于节点 7 与节点 5、节点 3 与节点 10 的距离均超过了干扰距离, 所以请求 1 和请求 4 对应的

两个链路都通过感知频带 3 实现，彼此之间没有同频干扰。

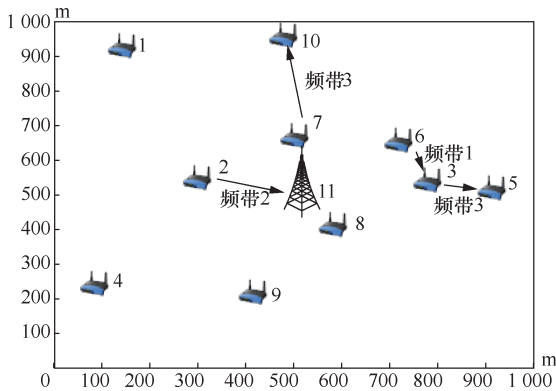


图4 各频带的感知开销均为 1 时的最优网络规划方案

针对该规划方案，进一步验证了对各服务请求的速率保证概率，即通过概率顽健性约束式(15)进行优化求解后，被接受的各请求对应的传输速率要求以多大概率被满足。本次实验共进行了 10 000 次，在每次实验中，各频带按照其服从的分布随机产生，被接受的 4 个服务请求的速率保证概率如表 1 所示。

表 1 被接受的 4 个服务请求的速率保证概率

请求 1	请求 2	请求 3	请求 4
94.81%	93.36%	93.84%	100%

由表 1 可以看出，通过概率顽健性约束，4 个服务请求的速率要求都能以大概率被满足。值得一提的是，虽然概率约束的置信水平仅设置为 70%，但最终通过实验得到的速率保证概率均高于 70%，这是因为该规划结果是通过概率顽健性约束实现的，即考虑在最差情况下保证约束成立，相当于对链路容量进行了更加保守的评估，此外，被接受的服务请求的速率要求低于链路容量，因此，规划结果能为各服务提供比置信水平更高的速率保证概率，体现了本文提出的基于统计特征的具有概率顽健性求解方法的有效性。

将各感知频带的开销调整为 1、4、7，其他参数与图 4 相同，此时，网络的最优规划方案如图 5 所示，其中，被接受的请求为请求 2、请求 3 和请求 5，分别通过感知频带 2、感知频带 1 和感知频带 3 实现，最终获得的总效用为 10.2。这种改变是因为感知频带 3 的开销在本次实验中增大，使得原来通过感知频带 3 实现的服务请求 1 和请求 4 被拒绝。

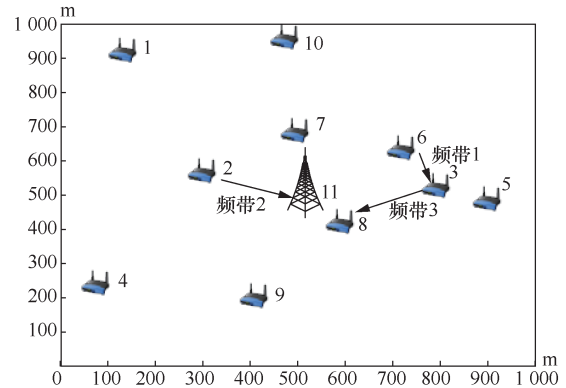


图5 各频带的感知开销为 1、4、7 时的最优网络规划方案

与表 1 类似，通过 10 000 次实验，被接受的 3 个服务请求的速率保证概率如表 2 所示，可以看出，这 3 个服务请求的传输速率均能以较大概率得到保证。

表 2 被接受的 3 个服务请求的速率保证概率

请求 2	请求 3	请求 5
93.89%	93.87%	95.76%

下面将通过重复实验的方法，进一步分析网络中可用频带数量 M 及服务请求数量 L 对网络总效用的影响。

网络在不同 M 和 L 下实现的平均效用如图 6 所示。在本次仿真中，每个结果都是通过 100 次实验平均得到的。在每次实验中，同样考虑一个 $1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$ 的网络，基站位于网络中心，其他 10 个节点的拓扑随机生成。假设各频带服从独立均匀分布，期望从 3~4 随机选取，方差为 0.2。每个服务请求对应的传输速率要求是 0~10 的一个随机数，流量收益和各频带的感知开销均设为 1。

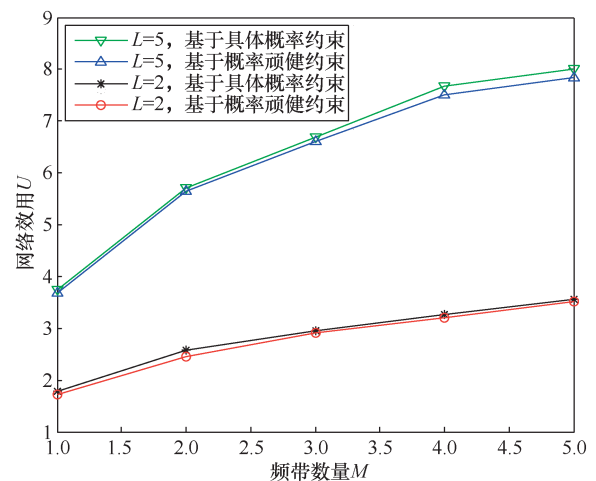


图6 网络在不同 M 和 L 下实现的平均效用

由图6可知,首先,随着感知频带数量的增多,网络效用呈上升趋势,因为在本次仿真中,感知开销较小,因而最优规划尽可能多地利用感知频谱完成数据传输,这使得网络效用随着可用资源的增多而增多,这种上升趋势在请求数量多时尤为明显。其次,当服务请求数量多时,网络效用大,因为网络承载了更多的流量传输。另外,图6展示了两种情况下的网络效用,一种是假设已知精确的概率分布信息进行的求解,即基于约束式(12);另一种是利用概率顽健性约束进行的求解,即基于约束式(15)。由图6可以看出,两种情况下实现的网络效用差别很小,即本文提出的基于统计特征的具有概率顽健性的规划方法能够实现的效用几乎等效于基于实际概率分布规划的结果实现的效用,这体现了本文所提方法的有效性,尤其适用于无法获取精确的概率分布信息的情况,而这一情况在实际问题中很常见。

6 结束语

本文针对海量数据造成的频谱短缺问题展开研究,基于CR技术和频谱共享理念,通过引入感知频谱缓解频谱危机。首先,考虑物联网设备的局限性,为实现基于感知频谱的数据传输,本文设计了超密集认知异构网络架构。随后,基于流量需求和感知开销,设计了最优的接入控制和感知决策方法,以实现网络效用的最大化。考虑频谱不确定性,本文将最优规划方案建模成混合整数随机优化问题,以一定的概率满足各服务请求的传输速率要求。考虑在实际场景中,具体的概率分布函数通常难以获得,本文基于数据驱动策略,利用统计特征设计了具有概率顽健性的求解方法。最后,本文通过仿真实验对规划方案和求解算法进行了分析和验证,尽管概率分布未知,但规划结果能够有效保证各服务请求的传输性能,同时实现网络效用的最大化。

参考文献:

- [1] AL-FUQAHA A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, et al. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols and applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 2347-2376.
- [2] WANG T, LI G, HUANG B, et al. *Spectrum analysis and regulations for 5G*[M]. Berlin: Springer Publishing Company, 2017.
- [3] BHATTARAI S, PARK J M J, GAO B, et al. An overview of dynamic spectrum sharing: ongoing initiatives, challenges, and a roadmap for future research[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2016, 2(2): 110-128.
- [4] HOYHTYA M, MAMMELA A, ESKOLA M, et al. Spectrum occupancy measurements: a survey and use of interference maps[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 2386-2414.
- [5] TEHRANI R H, VAHID S, TRIANTAFYLLOPOULOU D, et al. Licensed spectrum sharing schemes for mobile operators: a survey and outlook[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 2591-2623.
- [6] LI X, DING H, FANG Y, et al. Collaborative spectrum trading and sharing for cognitive radio networks[M]. Berlin: Springer, 2017.
- [7] HOSSAIN E, NIYATO D, KIM D I. Evolution and future trends of research in cognitive radio: a contemporary survey[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2015(11): 1530-1564.
- [8] LI X, DING H, PAN M, et al. Users first: service-oriented spectrum auction with a two-tier framework support[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(11): 2999-3013.
- [9] LI X, ZHAO N, SUN Y, et al. Interference alignment based on antenna selection with imperfect channel state information in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(7): 5497-5511.
- [10] KHAN A A, REHMANI M H, RACHEDI A. Cognitive-radio-based Internet of things: applications, architectures, spectrum related functionalities, and future research directions[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(3): 17-25.
- [11] RAWAT P, SINGH K D, BONNIN J M. Cognitive radio for M2M and Internet of things: a survey[J]. *Computer Communications*, 2016, 94: 1-29.
- [12] WU Q, DING G, XU Y, et al. Cognitive Internet of things: a new paradigm beyond connection[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, 1(2): 129-143.
- [13] ALI A, HAMOUDA W. Advances on spectrum sensing for cognitive radio networks: theory and applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(2): 1277-1304.
- [14] AXELL E, LEUS G, LARSSON E G, et al. Spectrum sensing for cognitive radio: state-of-the-art and recent advances[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2012, 29(3): 101-116.
- [15] SOBRON I, DINIZ P S R, MARTINS W A, et al. Energy detection technique for adaptive spectrum sensing[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(3): 617-627.
- [16] ZHANG X, CHAI R, GAO F. Matched filter based spectrum sensing and power level detection for cognitive radio network[C]//*IEEE Global Conference on Signal and Information Processing*. IEEE, 2014: 1267-1270.
- [17] HUANG G, TUGNAIT J K. On cyclostationarity based spectrum sensing under uncertain Gaussian noise[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(8): 2042-2054.
- [18] ZHANG N, ZHANG S, ZHENG J, et al. QoE driven decentralized spectrum sharing in 5G networks: potential game approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(9): 7797-7808.
- [19] LI S, ZHENG Z, EKICI E, et al. Maximizing social welfare in operator-based cognitive radio networks under spectrum uncertainty and sensing inaccuracy[C]//*IEEE INFOCOM*. IEEE, 2013: 953-961.
- [20] CHENG N, ZHANG N, LU N, et al. Opportunistic spectrum access for CR-VANETs: a game-theoretic approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(1): 237-251.
- [21] DING G, JIAO Y, WANG J, et al. Spectrum inference in cognitive radio networks: algorithms and applications[J]. *IEEE Communications*

- Surveys & Tutorials, 2018, 20(1): 150-182.
- [22] CHEN S, MA R, CHEN H H, et al. Machine-to-machine communications in ultra-dense networks—a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1478-1503.
- [23] DING H, FANG Y, HUANG X, et al. Cognitive capacity harvesting networks: architectural evolution toward future cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1902-1923.
- [24] GOLDSMITH A. Wireless communications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [25] POLIK I, TERLAKY T. A survey of the S-lemma[J]. Siam Review, 2007, 49(3): 371-418.
- [26] MARCUS M. An eigenvalue inequality for the product of normal matrices[J]. American Mathematical Monthly, 1956, 63: 173-174.
- [27] SHI Y, HOU Y T, ZHOU H. Per-node based optimal power control for multi-hop cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(10): 5290-5299.

[作者简介]



李轩衡（1989-），男，辽宁沈阳人，博士，大连理工大学信息与通信工程学院讲师，主要研究方向为认知无线网络、动态频谱接入、网络资源协同优化、数据驱动的智能通信等。



孙怡（1964-），女，辽宁沈阳人，博士，大连理工大学信息与通信工程学院教授，主要研究方向为图像处理。



王洁（1981-），男，河南安阳人，博士，大连海事大学教授、博士生导师，主要研究方向为智能无线感知、无线定位跟踪、人工智能和无线网络。



张海霞（1979-），女，山东菏泽人，山东大学教授，主要研究方向为大数据、人工智能辅助的无线通信系统关键技术。