



研究与开发

多域协同的 TDD 大规模组网方法研究

王晓云¹, 邓伟², 张龙², 孙奇²

(1. 中国移动通信集团有限公司, 北京 100053;

2. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 如何在有着大量、广域、时变协同需求的海量节点间和多维资源约束下实现网络服务能力最大化是时分双工 (time-division duplex, TDD) 移动通信大规模组网面临的核心问题。从架构角度进行研究, 创新性地提出适用于 TDD 大规模组网的全局协同优化架构, 分为无线连接层、信号处理层和服务控制层, 通过层间全局协同优化和层内资源域高效转化实现多维资源成本与网络服务能力的最优化。基于该架构, 聚焦无线连接层的空口资源, 对多资源域协同转化的无线组网方法进行深入研究, 明确了时域、频域、空域、码域等多资源域协同转化机理, 并设计了相应的无线组网机制。4G/5G 现网实践验证结果表明, 所提 TDD 大规模无线组网架构和方法可在有效控制干扰的同时高效利用各域资源, 实现网络服务能力最大化。

关键词: TDD; 全局协同; 多资源域转化; 大规模组网架构; 干扰控制

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023085

Research on multi-domain collaboration based method of TDD large-scale networking

WANG Xiaoyun¹, DENG Wei², ZHANG Long², SUN Qi²

1. China Mobile Communications Co., Ltd., Beijing 100053, China

2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: How to maximize the network service capability under the constraints of massive nodes and multi-domain resources is the core problem faced by TDD large-scale networking. The method of TDD large-scale networking under fully collaborative optimization architecture were innovatively proposed, which could maximize network service capabilities through inter layer and intra layer collaboration among wireless connection layer, signal processing layer and service control layer. Aiming at efficient use of wireless resources, the method of multi-domain conversion in wireless connection layer were put forward, including the principles and mechanism of space-time-frequency-code multi-domain conversion. The results of practical verification in 4G/5G existing network show that the proposed architecture and method of TDD large-scale networking can effectively control the interference while improving utilization of multi-domain resources to maximize network capacity.

Key words: TDD, full coordination, multi-domain conversion, large-scale networking architecture, interference control



0 引言

从 1G 到 5G, 移动通信网络技术持续演进, 规模持续扩大, 在人类经济社会发展过程中发挥的作用越来越重要, 已成为支撑数字经济高质量发展的关键基础设施。

移动通信系统是资源依赖型巨系统, 其中频谱是最核心的资源。根据上下行链路频谱使用方式的不同, 移动通信系统可分为时分双工 (time-division duplex, TDD) 模式和频分双工 (frequency-division duplex, FDD) 模式。TDD 模式上下行链路共用一段频谱, FDD 模式上下行链路使用固定配对的两段频谱。

TDD 模式具有诸多优势, 一是频谱资源占用少, 可充分利用碎片频谱; 二是更匹配非对称的上下行业务需求, 避免资源闲置; 三是可利用上下行信道的互易性, 更好地发挥多天线优势, 提升频谱效率。随着 TDD 规模组网等技术的进步和优质频谱愈发紧缺, TDD 模式得到越来越广泛的应用, 从 3G 实现零的突破, 到 4G 时代与 FDD 并行发展, 再到 5G 时代成为绝对主流, TDD 具有广阔的发展空间。

TDD 移动通信系统 (以下简称“TDD 系统”) 上下行同频, 存在特有的交叉时隙干扰, 尤其是远端基站下行链路对近端基站上行链路的干扰。这种交叉时隙干扰非常复杂, 一是参与节点多, 上万个基站间互相干扰; 二是干扰距离远, 最远可超过 400 km; 三是干扰无序, 受天气、温度、湿度、季节等各种因素影响, 其表现出很强的时变性; 四是干扰强度高, 具有集总特性, 存在大量基站的干扰叠加。该干扰严重影响 TDD 系统的频谱效率, 使得 TDD 系统在大规模组网时面临容量、规模、干扰三角形悖论挑战: 网络容量需求增长要求网络规模扩大, 网络规模扩大导致网络干扰增长, 而干扰增长反过来抑制网络容量; 即使增加 TDD 基站数量也无法增大网络容量, 以致

“TDD 无法大规模组网”的观点一度成为业界主流。在 3G 时代, 我国克服重重困难, 提出 TDD 模式的时分同步码分多址 (time division-synchronous code division multiple access, TD-SCDMA) 技术, 曾被外界评价为“局域网替代技术”; 而美国跟进提出的同为 TDD 模式的全球微波接入互操作性 (world interoperability for microwave access, WiMAX), 则因组网性能差, 仅 8 年即彻底消亡。可以说, 能否有效控制交叉时隙干扰, 决定了 TDD 大规模组网的成败。

前期业界已在干扰控制/消除领域做了大量的工作, 收获了大量的成果^[1-3]; 这些成果集中在具体的干扰优化方法, 也提到了需要网络节点间的协同, 但均未从网络架构的角度研究该问题。本文提出一种新型网络架构, 以实现存在大量、广域、时变协同需求的海量节点间的高效全网协同, 在资源有限的前提下实现网络服务能力最大化。

1 全局协同优化的 TDD 大规模组网架构

在满足时延、确定性等系统性能要求的前提下, 在实现相同无线覆盖时, 最大化“服务能力/资源成本”是网络架构的设计原则。这里的服务能力包含用户体验、网络业务容量等, 资源成本包含处理资源成本、工程资源成本、传输资源成本等。

对于移动通信网络而言, 无线覆盖是服务能力的基础, 信号传播特性要求无线网络射频单元靠近用户, 而用户是广域散点分布的, 因此射频单元必然数量众多且采用分布式部署; 而信号处理单元可以通过统计复用获得更高的资源利用率和更低的成本, 因此通常采用分级集中式部署, 所以从 1G 到 5G 的移动通信网络均采用“圣诞树”状的分层架构^[4-5]。“圣诞树”架构按照网元进行分层, 如基站层、无线网络控制器层和核心网层, 各层节点数逐级收敛, 层间存在大量的纵向数据连接, 层内仅相邻节点间存在少量横向连接, “圣诞树”状的移动通信网络传统架构如图 1 所示。

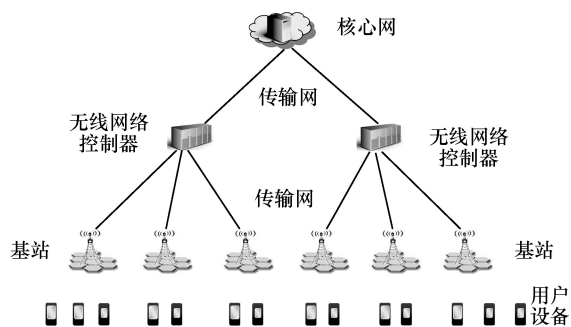


图1 “圣诞树”状的移动通信网络传统架构

TDD 系统大规模组网时，海量节点广域分布、无序关联，三角形悖论制约了网络服务能力，传统架构仅支持相邻节点进行点对点交互，难以满足大量、广域、时变的协同需求，不利于服务能力的提升；同时，为了进一步提升服务能力、降低成本，移动通信系统朝着服务化方向发展，网元可基于通用硬件实现，网元间呈现融合趋势，如无线网和核心网部署融合、硬件融合、功能融合，而传统架构下各网元层处理资源独立优化、网络能力独立编排，难以实现跨网元全网协同优化。

为了最大化“服务能力/资源成本”，笔者针对传统“圣诞树”状架构的不足进行反复优化设计，提出服务于 TDD 大规模移动通信网络组网的全局协同优化架构，其特征是资源分层、跨层全

局协同、层内多资源域转化，全局协同优化的 TDD 大规模组网架构如图 2 所示。

资源分层指全局协同优化架构按照使用的核心资源而非传统的网元功能进行分层，自下而上分为无线连接层、信号处理层和服务控制层 3 层。这打破了原有架构的网元边界，无线网、核心网等不同网元间可统筹优化，支持计算资源在更大范围的灵活复用从而降低成本，支持更丰富能力的统一编排从而更敏捷地提供更精准匹配需求的服务。

跨层全局协同是指层间协同优化，在原有纵向数据链路基础上引入全局协同链路，通过联合计算、功能统筹，有效提升频谱等资源使用效率，从而提升服务能力；同时由于层间节点数快速收敛，如信号处理层/服务控制层节点数比无线连接层少多个数量级，上层统筹可使底层大量、广域、无序节点的协同更加简单高效，从而降低成本。

层内多资源域转化是指海量节点间协同优化，每层层内均包括海量节点，可基于多资源域转化机理形成丰富的横向协同链路，包括点对点和点对多点链路，从而低成本地实现广域节点间的相互感知和有序联动，进而实现相应资源的效用最大化。

各层的具体功能如下。

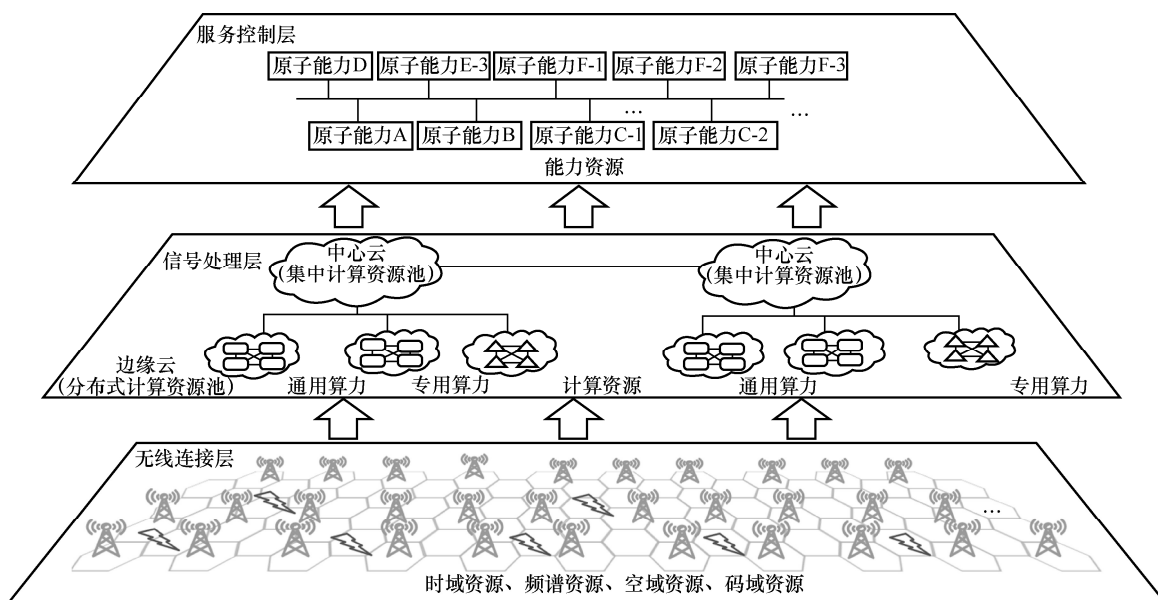


图2 全局协同优化的 TDD 大规模组网架构



(1) 无线连接层

基于频谱等时频空码域资源的无线连接层,负责电磁波信号的发送和接收。无线连接层由广泛分布的海量信号收发节点构成,大规模组网时节点数可达百万量级。各节点按蜂窝结构部署,相邻节点间基于有线传输链路互联,广域节点间可基于开放空口链路互相感知,整体形成一张统一的覆盖陆地、海洋、低空、地下等丰富场景的大网。无线连接层通过时频空码多域资源协同转化,有效控制干扰,提升频谱等无线资源使用效率。

(2) 信号处理层

基于通用或专用的计算资源的信号处理层,负责各类信号、数据的分级集中运算及协同处理,包括无线网、核心网和业务数据的处理。为了兼顾复用度和处理时延需求,信号处理层由边缘云和中心云两级计算节点构成,通常节点数收敛至十万量级。各节点间和节点内基于有线传输网络高效互联。信号处理层通过资源复用聚合计算提升计算资源使用效率,并通过集中协同计算提升无线连接层频谱资源使用效率。

(3) 服务控制层

服务控制层基于能力资源,负责对网络能力、业务能力等各类原子能力进行全局集中编排,并对相应的无线、计算等资源进行集中管控,最终面向客户提供服务。服务控制层节点数进一步收敛到万量级,各节点间基于有线传输网络按需互联,可采用服务注册和发现等机制简化拓扑以提升灵活性。服务控制层通过全局精细管控,可进一步提升各类资源的使用效率,并灵活地满足客户的定制化需求。

2 全局协同优化架构下多资源域转化的TDD大规模组网方法

基于上述全局协同优化架构,本节聚焦无线连接层的频谱等无线资源的高效使用,对多资源域转化的TDD大规模组网方法进行研究,包括组网目标、多资源域转化机理及架构和机制。

2.1 TDD大规模组网目标

2.1.1 有效系统容量指标定义

无线连接层是全局协同架构中最基础的一层,负责满足泛在的连接需求,服务能力可用有效系统容量衡量,则大规模组网的目标是在资源有限、干扰受限条件下实现有效系统容量的最大化。

单个基站的有效容量为上下行容量的加权之和。不同基站对上下行容量的需求不同,如公网基站以视频点播等业务为主,下行流量通常是上行流量的近10倍;而专网基站以数据采集业务为主,上行流量可达下行的数十倍。因此,某个基站的有效容量不是简单地加和上行、下行容量,而需要根据业务需求进行加权,上行需求越高的基站,上行容量权重越高。

有效系统容量为各基站有效容量加权之和。不同基站的重要性不同,如用于工业控制的基站涉及生产控制和生产安全,传输单位数据产生的社会价值显著高于用于娱乐视频业务的基站,因此各基站容量求和时应按照基站的重要性进行加权,重要性越高的基站,权值越高。

简单记基站 i 的有效容量为 C_i ,则 N 个基站构成的大规模网络的有效系统容量 C_{sys} 为:

$$C_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^N C_i = \sum_{i=1}^N W_i (\alpha_i C_i^{\text{ul}} + (1 - \alpha_i) C_i^{\text{dl}}) \quad (1)$$

其中, C_i^{ul} 、 C_i^{dl} 为基站 i 的上行容量和下行容量, W_i 为基站 i 的重要性权值, α_i 为基站 i 的上行容量权值。

2.1.2 有效系统容量指标影响因素

由香农定理 $C = B \lg \left(1 + \frac{S}{N + I} \right)$ 可知,信道容量

上限 C 与信号强度 S 、带宽 B 、噪声 N 、干扰 I 相关。假设基站内有 M 个用户且各用户均匀分配资源,则基站 i 的容量可记为:

$$C_i \propto \sum_{j=1}^M B_j \lg \left(1 + \frac{S_j}{N_j + I_j} \right) = \frac{B}{M} \sum_{j=1}^M \lg \left(1 + \frac{S_j}{N_j + I_j} \right) \quad (2)$$

由式(2)可知,基站容量与带宽呈正相关,与干扰呈负相关。采用复杂的调度算法可优化用户间的资源分配,从而提升容量,但不影响相应正反比关系,本文不再展开讨论。

在带宽方面,TDD系统上下行使用相同频谱, B 由系统带宽按照上下行比例进行折算。记帧周期为 T ,其中上行时隙长度为 T^{ul} ,保护间隔(GP)时隙长度为 T^{sp} ,则下行时隙长度为 $T - T^{\text{ul}} - T^{\text{sp}}$,上行等效带宽为 BT^{ul}/T ,下行等效带宽为 $B(1 - (T^{\text{ul}} + T^{\text{sp}})/T)$ 。

在干扰方面,TDD系统上行干扰和下行干扰示意图如图3所示。

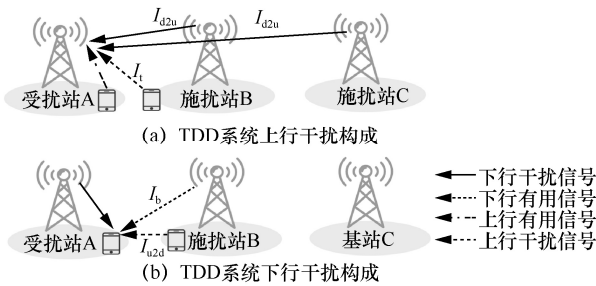


图3 TDD系统上行干扰和下行干扰示意图

如图3所示,施扰站下行对受扰站终端下行产生的干扰 I_b 、施扰站终端上行对受扰站上行产生的干扰 I_t 与邻基站的业务负荷相关,干扰关系较为稳定,不随网络规模增大而增大,可通过多点协作、功率控制等技术进行控制。施扰站终端上行对受扰站终端下行产生的交叉时隙干扰 I_{u2d} 发生概率较小且强度较弱,规模组网时可忽略。大规模组网时施扰站下行对受扰站上行产生的交叉时隙干扰 I_{d2u} 较为严重,是影响网络容量的关键,需要重点关注。

综上,TDD大规模组网时有效系统容量可表征为:

$$C_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^N W_i (\alpha_i C_i^{\text{ul}} + (1 - \alpha_i) C_i^{\text{dl}})$$

$$C_i^{\text{dl}} \propto \frac{B(T - T^{\text{ul}} - T^{\text{sp}})}{MT} \sum_{j=1}^M \text{lb} \left(1 + \frac{S_{i,j}^{\text{dl}}}{N^{\text{dl}} + I_{b,i,j}} \right)$$

$$C_i^{\text{ul}} \propto \frac{BT^{\text{ul}}}{MT} \sum_{j=1}^M \text{lb} \left(1 + \frac{S_{i,j}^{\text{ul}}}{N^{\text{ul}} + I_{t,i,j} + I_{d2u,i}} \right) \quad (3)$$

本文侧重通过网络架构创新性地解决干扰问题,因此,假设业务模型(与 α_i 相关)、系统带宽 B 、上行/下行有用信号强度 $S_{i,j}^{\text{ul}}/S_{i,j}^{\text{dl}}$ 、用户分布和网络平均负荷(与 $I_{b,i,j}$ 、 $I_{t,i,j}$ 、 N^{ul} 、 N^{dl} 相关)、帧周期 T 、上行时隙长度 T^{ul} 等与架构无关的参数保持稳定,则有效系统容量主要受各基站的GP时隙长度 T_i^{sp} 和交叉时隙干扰 $I_{d2u,i}$ 影响。

2.2 TDD大规模组网多资源域转化机理

有效系统容量为空间上广域分布的海量基站的有效容量加权,从式(3)可看出,与时域GP长度、频域干扰强度等相关,实现大规模组网目标需要探索时域、频域、空域等多资源转化机理,找到最核心的影响因素,并基于此高性价比实现海量节点的相互感知和有序联动。

2.2.1 干扰建模机理:频域和空域、码域转化

交叉时隙干扰是影响有效系统容量的关键因素之一,其具有集总性,为空间上广域分布的大量施扰站的干扰信号叠加,根据施扰站距离的远近,可进一步分为局域干扰和广域干扰,广域干扰也称大气波导干扰^[6]。干扰信号强度随空间传播距离增大而减小,当低于接收门限时可忽略,因此频域干扰可通过空间信道传播模型进行建模和表征,其核心影响因素是空间传播距离。

记基站 i 受到的局域干扰 $I_{\text{local}}(i) = \sum_{p \in O_{d_{l,i}}} S_p / L_{p,i}$,其中, S_p 为施扰站 p 的下行信号强度, $L_{p,i}$ 为基站 p 到基站 i 的信号传播路损, $O_{d_{l,i}}$ 为基站 i 对应的局域干扰基站集合。 $d_{l,i}$ 为局域干扰信号衰减到低于基站 i 接收门限对应的最远空间传播距离,可基于信道模型估算,通常小于数十千米,集合内基站到受扰站 i 的距离均应小于 $d_{l,i}$ 。 $L_{p,i}$ 与地理环境有关,不随时间变化,具有确定性,针对城市、郊区、高铁等典型场景,业界研究形成了不同的模型,如自由空间信道传播模型等。



记基站 i 受到的广域干扰 $I_{\text{rim}}(i) = \sum_{q \in O_{d_{2,i}}} S_q / L_{q,i}$, 其中, S_q 为干扰基站 q 的下行信号强度, $L_{q,i}$ 为基站 q 到基站 i 的信号传播路损, $O_{d_{2,i}}$ 为广域干扰基站集合, $d_{2,i}$ 为广域干扰信号衰减到低于基站 i 接收门限对应的最远空间传播距离, 可达 400 km 以上, $O_{d_{2,i}}$ 内的基站到受扰站 i 的距离均应小于 $d_{2,i}$ 。 $L_{q,i}$ 与气象、地理等条件有关, 具有较强的时变性, 文献[7]对其进行了深入分析, 给出了沿海和内陆两类大气波导干扰的空间信道传播模型, 但仅作为个例示意, 无法通用。

针对广域干扰随机化、 $d_{2,i}$ 难以量化预测的问题, 可通过码域干扰感知解决。施扰站将自己的全球唯一标识等信息进行码域编码, 生成“码域身份证”并基于空口链路发送。受扰站对其进行检测, 可精确感知干扰来源, 从而获得实时、准确的 $d_{2,i}$ 以及相应的路损。

2.2.2 干扰规避机理: 空域和时域转化

干扰信号传输距离决定了传播时延, 进而决定了受扰的上行符号位置。4G 典型帧结构配置下的 TDD 交叉时隙干扰示意图如图 4 所示^[2]。

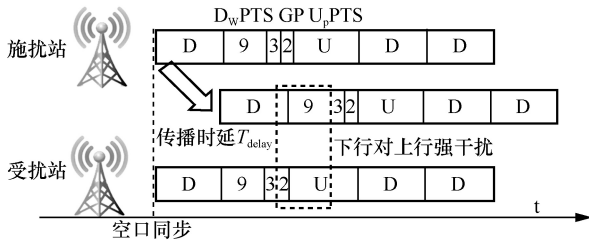


图 4 4G 典型帧结构配置下的 TDD 交叉时隙干扰示意图^[2]

从图 4 可以看出, 时域 GP 对干扰起到规避作用, 只要信号传播距离对应的传播时延小于 GP, 就不再造成干扰, 即可通过设置 GP 对空间上广域分布的施扰站进行过滤。

基站 i 受到的交叉时隙干扰更新为:

$$I_{\text{d2u},i} = I_{\text{rim},i} + I_{\text{local},i} = \sum_{p \in O_{d_{1,i},T_p^{\text{gp}}}} S_p / L_{p,i} + \sum_{q \in O_{d_{2,i},T_q^{\text{gp}}}} S_q / L_{q,i} \quad (4)$$

其中, $O_{d_{1,i},T_p^{\text{gp}}}$ 、 $O_{d_{2,i},T_q^{\text{gp}}}$ 分别为过滤后的局域干扰

基站集合和广域干扰基站集合, 集合内基站到受扰站 i 的距离分别应大于 cT_p^{gp} 和 cT_q^{gp} , c 为光速。

如施扰站均设置 T^{gp} 大于 $d_{1,i}$ 、 $d_{2,i}$ 对应的传输时延, 则基站 i 可完全规避上行交叉时隙干扰。

综上, 经空域和时域转化, 频域干扰的核心影响因素转变为时域 GP 长度。

2.2.3 容量最大化机理: 集中时域优化

经时频空码域协同转化, 有效系统容量更新为:

$$C_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^N W_i (\alpha_i C_i^{\text{ul}} + (1 - \alpha_i) C_i^{\text{dl}}) \quad (5)$$

$$C_i^{\text{dl}} \propto \frac{B(T - T^{\text{ul}} - T_i^{\text{gp}})}{MT} \sum_{j=1}^M \text{lb} \left(1 + \frac{S_{i,j}^{\text{dl}}}{N^{\text{dl}} + I_{b,i,j}} \right)$$

$$C_i^{\text{ul}} \propto \frac{BT^{\text{ul}}}{MT} \sum_{j=1}^M \text{lb} \left(1 + \frac{S_{i,j}^{\text{ul}}}{N^{\text{ul}} + I_{t,i,j} + \sum_{p \in O_{d_{1,i},T_p^{\text{gp}}}} S_p / L_{p,i} + \sum_{q \in O_{d_{2,i},T_q^{\text{gp}}}} S_q / L_{q,i}} \right)$$

分析可知, 在业务模型等架构无关参数相对固定的情况下, 影响有效系统容量的核心参数进一步收敛为时域 GP 长度。即经过时频空码多域转化, 复杂的大规模组网有效系统容量最大化问题转化为较为简单的时域 GP 长度最优化问题。

GP 长度最优化面临两方面的挑战: 一是上下行相互制约, GP 越长, 交叉时隙干扰控制越好, 上行容量越大, 但下行资源越少, 下行容量越小; 二是施扰站和受扰站相互制约, 施扰站 GP 增大对远端的受扰站上行有增益, 但对自身的上行无增益, 单个/局部区域的最优与全局的最优冲突。因此需要集中化协同, 综合考虑全网各基站的上下行等需求, 全局寻优各基站的最优 GP 长度。

上述有效系统容量最大化问题是一个关于时域 GP 长度的非凸问题。目前基站 i 的可选 GP 长度是一个离散集合, 可通过串行迭代优化算法找到使有效系统容量 C_{sys} 较优的各个基站的 GP 取值, 其中远端

干扰基站集合通过基站间的横向干扰感知链路获得。考虑每个基站的信道传播模型、业务模型等不同,应逐基站精确计算,从而实现基站间差异化的 GP 长度配置;同时干扰关系等具有时变性,寻优过程可实时进行,从而实现全动态的 GP 长度配置。

时空频码多资源域转化机理示意图如图 5 所示。

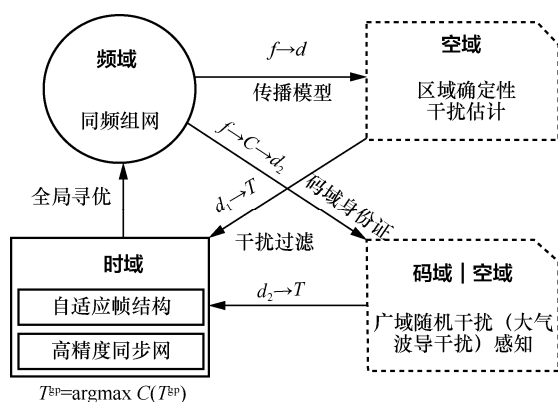


图 5 时空频码多资源域转化机理示意图

2.3 TDD 大规模组网多资源域转化架构和机制

为实现 TDD 大规模组网目标,即最大化有效系统容量,在全局协同优化架构下基于时频空码多域转化机理对组网架构进行设计,引入新功能、新接口和新流程,形成 TDD 大规模组网多资源域转化机制。

(1) 集中同步协同机制

基站间时钟同步是 TDD 系统大规模组网的前提,因此在服务控制层引入集中同步协同单元,通过同步协同链路对各基站进行授时。同时各基站也可基于卫星网络自主授时,集中同步协同单元对各基站的时钟同步情况进行监控和校验,并按需触发调整,分布式授时与集中授时相互协同、备份。

(2) 分布式干扰感知机制

为了实现时空频码协同转化,针对广域随机干扰,设计基于“码域身份证”的干扰感知机制,在无线连接层引入干扰感知单元。施扰站的干扰感知单元引入干扰定位专用参考信号,将其全球唯一基站标识等信息进行编码,并据此选择合适的专用参考信号序列在特定时间发送,通过时域和码域组合拼接,在保证检测时效性的同时尽可

能降低处理复杂度。受扰站的干扰感知单元在全部上行时隙均对干扰定位专用参考信号进行检测,并基于检测时间和序列码恢复出施扰站的基站标识,实现干扰源精确定位^[8-10]。利用空口传播的开放性,实现点对多点的横向干扰感知链路,进而实现海量、广域、无序基站间的相互感知,为全局协同奠定基础。

(3) 集中干扰协同机制

如第 2.2 节所述,合理的 GP 长度值是最大化有效系统容量的关键,为便于高效统筹全网各基站,在服务控制层引入集中干扰协同单元,具备数据采集、智能分析、控制反馈三大功能。数据采集方面,该单元实时采集各基站的干扰感知数据,以及与有效容量计算相关的业务模型、业务需求等数据;智能分析方面,集中干扰协同单元以全局有效系统容量最大化为目标,采用智能化算法,对广域干扰感知数据、局域干扰预测数据、各基站的业务数据等进行分析,全局寻优各基站的最佳 GP 值;控制反馈方面,该单元具备基站 GP 长度调整能力。集中干扰协同单元与各基站间通过干扰协同链路互联,干扰协同链路可基于已有的网管链路进行扩展。

全局协同优化架构下多资源域转化的 TDD 大规模组网架构如图 6 所示。

3 全局协同优化架构下多资源域转化的 TDD 大规模组网方法实践

基于 4G、5G 大规模商用网络,笔者团队对全局协同优化架构下的多资源域转化组网方法进行了实践验证。考虑有效系统容量为时变的估算值,不便于直观体现多资源域转化组网机制的效果,因此重点关注与有效系统容量强相关的上行干扰强度和下行可用资源数两个测量量。结果表明,该架构和方法可在有效控制交叉时隙干扰的同时提升下行可用资源数,有效提升网络容量。

笔者团队对码域感知功能进行了工程化设计和

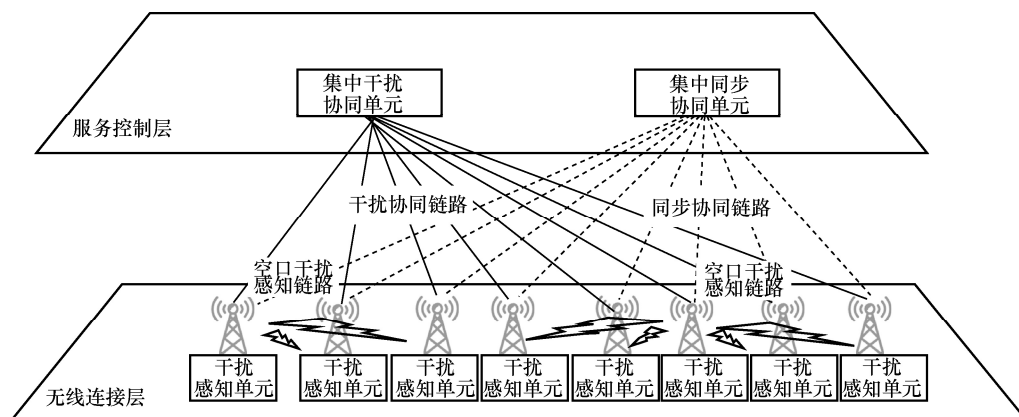


图6 全局协同架构下多资源域转化的TDD大规模组网架构

实现,定义了大气波导干扰定位专用参考信号的详细生成方法和检测方法,写入3GPP 5G国际标准,并推动了4G/5G基站支持现网大规模部署。为实现集中干扰协同功能,笔者团队研发了干扰集中分析平台,复用网管链路对各基站的干扰感知等数据进行采集,统筹全局形成并下发GP长度配置建议。

基于多资源域转化机制,笔者组织天津、河北、河南、山东、安徽、江苏等六省市超百万小区进行特殊子帧配置调整,GP长度由3个符号增加至9个符号,交叉时隙干扰控制效果显著,按地市统计的峰值干扰强度平均下降3 dB,高干扰小区占比下降约25%,高干扰时长减少67%,有效提升网络上行性能,河北某市优化前后两周高干扰小区占比结果如图7所示。

基于多资源域转化机制,高干扰基站可自动调整特殊子帧配置,在大气波导干扰较强时段增大GP长度,在干扰降低后自动减少GP长度,有效保障下

行性能。河北某典型施扰站24 h的GP长度和干扰强度检测结果如图8所示,与固定配置9个符号的GP长度相比,优化后全天下行可用资源数提升12.5%。

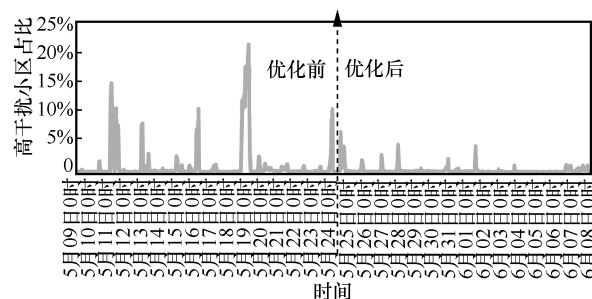


图7 河北某市优化前后两周高干扰小区占比结果

4 结束语

移动通信系统是资源依赖型巨系统,本文从TDD移动通信大规模组网面临的挑战出发,提出了TDD大规模组网面临的核心科学问题,即在有大量、广域、时变协同需求的海量节点间多维资源约束下的

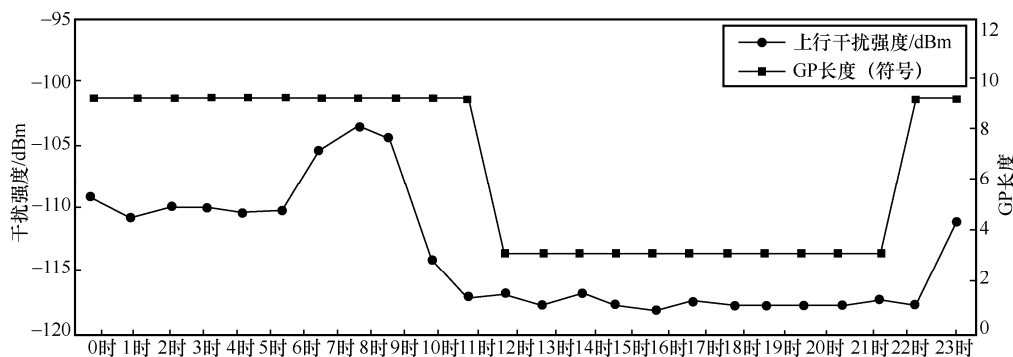


图8 河北某典型施扰站24 h的GP长度和干扰强度检测结果

网络服务能力最大化问题。之后针对性地提出全局协同优化的 TDD 大规模组网架构, 将系统划分为无线连接层、信号处理层和服务控制层 3 层, 并通过跨层全局协同、层内多资源域转化实现多维资源成本与网络服务能力的最优化。然后聚焦无线连接层, 提出全局协同优化架构下多资源域转化的 TDD 大规模组网方法, 明确组网目标为有效系统容量最大化, 重点研究可有效控制干扰的时域、频域、空域、码域多资源域转化机理, 将复杂无序的海量节点相互干扰问题简化为时域 GP 长度设置问题, 并进一步设计了多资源域协同转化的组网架构和机制, 从而实现有效系统容量的最大化。最后基于 4G/5G 现网进行实践, 证明了该架构和方法的有效性。

全局协同优化架构下多资源域转化的 TDD 大规模组网理论方法对于移动通信网络的发展具有重要意义, 将为 6G 等下一代网络的设计提供有效指引。

参考文献:

- [1] 王大鹏, 李新. TD-LTE 无线网络与既有网络的干扰分析[J]. 移动通信, 2011, 35(19): 33-38.
WANG D P, LI X. Interference analysis between TD-LTE wireless network and existing network[J]. Mobile Communications, 2011, 35(19): 33-38.
- [2] 张龙, 邓伟, 江天明, 等. TD-LTE 大气波导干扰传播规律及优化方案研究[J]. 移动通信, 2017, 41(20): 16-21.
ZHANG L, DENG W, JIANG T M, et al. Research on propagation law and optimization solutions of atmospheric duct interference for TD-LTE[J]. Mobile Communications, 2017, 41(20): 16-21.
- [3] 赵飞龙. 5G 大气波导干扰形成条件及其规避方法研究[J]. 电波科学学报, 2021, 36(1): 109-115, 126.
ZHAO F L. Forming interference of atmospheric duct in 5G and avoid method[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(1): 109-115, 126.
- [4] 王映民, 孙韶辉. TD-LTE 技术原理与系统设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
WANG Y M, SUN S H. TD-LTE technical principle and system design[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010.
- [5] 3GPP. System architecture for the 5G system: TS 23.501 V16.2.0[S]. 2019.
- [6] 王晓云, 丁海煜, 邓伟, 等. TDD 大规模组网干扰控制与实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2023.
WANG X Y, DING H Y, DENG W, et al. TDD large-scale networking interference control and practice[M]. Beijing: Posts

and Telecom Press, 2023.

- [7] 王晓云, 邓伟, 张龙, 等. 基于特征建模的 TDD 系统大气波导干扰控制体系研究[J]. 电信科学, 2022, 38(11): 11-23.
WANG X Y, DENG W, ZHANG L, et al. Research on characteristic model-based atmospheric duct interference control in TDD wireless communication system[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(11): 11-23.
- [8] 柯颀, 吴丹, 张静文, 等. 5G 移动通信系统远端基站干扰解决方案研究[J]. 信息通信技术, 2019, 13(4): 44-50.
KE T, WU D, ZHANG J W, et al. Study on remote-interference-management for 5G NR[J]. Information and Communications Technologies, 2019, 13(4): 44-50.
- [9] 3GPP. NR and NG-RAN overall description: TS 38.300 V15.5.0[S]. 2019.
- [10] 3GPP. NR; Physical channels and modulation: TS 38.211 V15.7.0[S]. 2019.

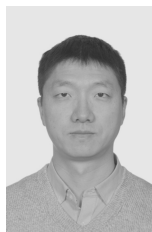
[作者简介]



王晓云(1968—), 女, 中国移动通信集团有限公司教授级高级工程师、技术部总经理, 新一代宽带无线移动通信网副总师, 新一代移动信息通信技术国家工程研究中心负责人, 主要研究方向为超大规模移动通信系统总体领域的技术战略、系统架构、组网技术等。



邓伟(1978—), 男, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师、无线与终端技术研究所所长, 主要研究方向为 4G/NB-IoT/5G 无线技术、空天地一体化网络、工业互联网等。



张龙(1985—), 男, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师、无线与终端技术研究所技术经理, 主要研究方向为 4G、NB-IoT、5G 无线技术和 5G 垂直行业网络解决方案。



孙奇(1987—), 女, 中国移动通信集团有限公司研究院高级工程师、无线与终端技术研究所技术经理, 主要研究方向为 5G 无线智能化、云化、通算一体等。