

基于集中式架构的无线接入网优化部署研究^①

张宗帅^② * * * * * 田 霖^③ * * * * * 石晶林 * * * * * 徐顺清 * * * * *

(* 移动计算与新型终端北京市重点实验室 北京 100190)

(** 中国科学院计算技术研究所无线通信技术研究 中心 北京 100190)

(*** 中国科学院大学 北京 100049)

(**** 中国三星研究院 北京 100028)

摘 要 基于集中式架构的无线接入网通过资源池共享处理资源,与基于分布式架构的无线接入网相比,明显减少了网络所需的处理资源,该性能可以通过统计复用增益(SMG)来评估。本文建立了基于时-空联合流量分布的处理资源 SMG 模型,并推导出 SMG 的闭合表达式。在此基础上,综合考虑集中式架构网络部署的处理资源池、远端射频单元(RRH)及光纤的成本,建立了无线接入网基站主设备部署成本模型,并进行成本分析。仿真结果表明,SMG 随着服务阈值比 P_{th} 的增大而增大。当采用集中式架构部署的小区占比 η 固定时,总成本 TC 随着成本因子 CF 的增大而减小。当成本因子 CF 固定时,总成本 TC 随着 η 的变化趋势取决于成本因子 CF 的取值大小。本文的研究为基于集中式架构的无线接入网部署提供了理论指导,具有实际应用价值。

关键词 集中式架构;无线接入网;统计复用增益(SMG);优化部署

0 引 言

随着移动互联网的迅速发展和智能设备的普遍使用,全球移动数据流量按月呈指数级增长,到 2020 年,移动网络连接速度将增加 3 倍以上^[1]。为了满足大流量需求,预计基站(base station,BS)的数量将显著增加,这将导致一系列问题,包括更多的资源及能量的消耗,更高的部署及运营成本等。为了解决这些问题,集中式无线接入网架构(centralized radio access networks,CRAN)被提出,例如,中国移动提出的 C-RAN^[2],中国科学院计算所提出的超级基站^[3,4]等。在 CRAN 中,许多 BS 的处理资源被集中到处理资源池中,远端射频单元(remote radio head,RRH)通过高速光纤交换连接到集中式处理资源池(processing resource unit pool,PRU Pool)。

CRAN 最重要的特征之一是可以基于集中处理资源池在不同 BS 之间共享处理资源。在传统的分布式无线接入网络架构(distributed radio access networks, DRAN)中,处理资源被部署到每个 BS,每个 BS 必须设计为具有最大处理资源容量,以支持其小区中可能的最大业务数据流量处理。然而,BS 的流量负载在一天中变化具有“潮汐效应”现象^[2]。当 BS 业务负载较低时,其大部分处理资源处于浪费状态,而 BS 彼此隔离,它们的处理资源不能在不同 BS 之间共享。因此,从 DRAN 中的“独占”处理资源到 CRAN 的“共享”处理资源池,可以实现更高的处理资源利用率,从而有效降低资源配置和网络部署等相关成本^[5]。统计复用增益(statistical multiplexing gain, SMG)被用于评估处理资源配置和利用的性能。已有研究^[6-10]建立了一些 SMG 的简单模型,这

① 国家自然科学基金(61431001)和国家科技重大专项(2018ZX03001017)资助项目。
② 男,1989 年生,博士生;研究方向:通信与计算融合关键技术;E-mail: zhangzongshuai@ict.ac.cn
③ 通信作者,E-mail: tianlindd@ict.ac.cn
(收稿日期:2019-02-01)

些模型中所使用的数据流量模型基于时域进行独立分析,无法反映流量的时-空联合分布特性,不符合当前实际蜂窝网络流量的时间和空间分布特征。当前蜂窝移动网络业务的类型和特征具有显著的多样性,这些业务的流量分布具有明显的异质性、突发性和重尾特征^[11]。

另外,移动运营商网络的资本支出(CAPEX)中 80% 用于无线接入网的建设^[2],可见减少无线接入网的部署成本对减少运营商网络 CAPEX 的重要性。无线接入网的优化部署最重要的目标之一是在满足用户流量处理需求前提下,最小化网络部署的基站主设备相关成本^[10,12]。未来的蜂窝网络将会面临着高密度的小区蜂窝部署,采用 CRAN 来部署规划网络,对发挥集中式无线接入网的优势起着重要的作用^[13-16]。传统蜂窝网络在部署时,为了保障忙时网络服务质量,往往根据最大负荷需求来指导部署设计,这样得到的是一个固定的部署结果,没有考虑网络中业务类型及流量的时-空分布及动态变化特征,导致在流量处理需求不多的时间段,基站的服务能力就不能被充分利用,这造成了严重的处理资源浪费和部署成本增加。由于 CRAN 处理资源 SMG 的存在,运营商不但可以节省无线接入网基站部署成本,而且可以更灵活地控制和优化网络。因此,基于 CRAN 处理资源 SMG 的理论基础,来进行无线接入网基站部署成本的优化分析,将对实际网络实践和部署起到更有效的指导作用。

在本文中,基于蜂窝网络数据流量时-空分布规律,将时域、空域进行联合分析,建立基于时-空联合流量分布的处理资源 SMG 模型。在对处理资源 SMG 理论分析的基础上,综合考虑处理资源 SMG 以及集中式架构基站部署的成本,以优化无线接入网部署总成本为目标,进行最优化网络部署探索研究。本文所进行的分析和研究为基于集中式架构的无线接入网的工程实践和网络部署提供了理论基础和指导参考,具有很好的实际应用价值。

1 处理资源 SMG 分析

1.1 系统模型

假设在蜂窝网络中,目标区域中的小区数量为

N 。在集中式架构无线接入网中,如图 1 所示,所有小区的 RRH 通过光纤前传链路连接到集中式资源处理池。使用 T 来表示网络的数据流量统计周期,使用随机变量 $\mathbf{X}(i,t)$ ($i = 1,2,\cdots,N; t = 1,2,\cdots,T$) 来表示一个流量矩阵,矩阵元素 $x(i,t)$ 为小区 i 在时间 t 时的流量值,代表小区 i 从时间 $(t-1)\Delta t$ 到时间 $t\Delta t$ 的流量负载。 $\mathbf{X}(i,t)$ 定义如下:

$$\mathbf{X}(i,t) = \begin{bmatrix} x(1,1) & x(1,2) & \cdots & x(1,t) & \cdots & x(1,T) \\ x(2,1) & x(2,2) & \cdots & x(2,t) & \cdots & x(2,T) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x(i,1) & x(i,2) & \cdots & x(i,t) & \cdots & x(i,T) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x(N,1) & x(N,2) & \cdots & x(N,t) & \cdots & x(N,T) \end{bmatrix}$$

(1)

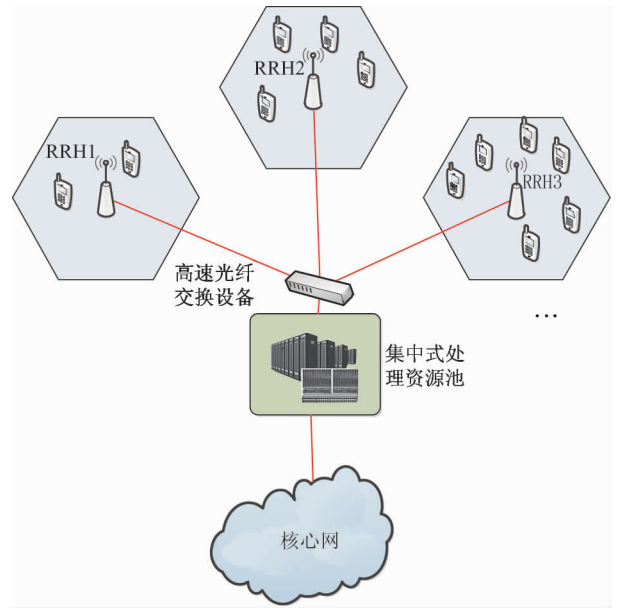


图 1 集中式架构无线接入网示意图

矩阵 $\mathbf{X}(i,t)$ 的每个行向量表示基站 i 的时域流量分布,矩阵 $\mathbf{X}(i,t)$ 的每个列向量表示在时间 t 时,各基站在空间域的流量分布。也就是说,矩阵 $\mathbf{X}(i,t)$ 同时表征了时域和空域的流量分布。假设在蜂窝网络中,为基站配置的处理资源与需要基站处理的业务数据流量之间的关系是系数为 ρ 的线性关系^[17],则在时间 t , 基站 i 所需的处理资源为 $\rho x(i,t)$ 。

在 DRAN 中,需要为每个基站配置足够的资源

来处理相应小区在任意时间 t 可能产生的最大业务流量值。因此,每个基站的处理资源由 $\max_t \rho x(i, t)$ 确定。为了满足整个网络的处理能力,总的处理资源应按下式配置:

$$R_{DRAN} = \sum_{i=1}^N \max_t \rho x(i, t) \quad (2)$$

假设所有小区的流量相同,则总的处理资源如下式所示:

$$R_{DRAN} = N \max_{i,t} \rho x(i, t) \quad (3)$$

在集中式架构的无线接入网中,为了满足整个网络的处理能力,在时间 t , 处理资源应配置为所有小区的流量值之和所对应的处理资源需求。故集中式无线接入网络所需的处理资源应该由所有小区在任何时间可能产生的流量之和的最大值来确定。因此,所需的处理资源为

$$R_{CRAN} = \max_t \sum_{i=1}^N \rho x(i, t) \quad (4)$$

用分布式架构无线接入网络所需的处理资源与集中式无线接入网络所需的处理资源之间的比值 $\frac{R_{DRAN}}{R_{CRAN}}$ 来表征集中式无线接入网络所需处理资源的减少量,将此比值称为集中式无线接入网中处理资源的 SMG,表示如下:

$$SMG = \frac{R_{DRAN}}{R_{CRAN}} = \frac{N \max_{i,t} \rho x(i, t)}{\max_t \sum_{i=1}^N \rho x(i, t)} = \frac{N \max_{i,t} x(i, t)}{\max_t \sum_{i=1}^N x(i, t)} \quad (5)$$

进一步,SMG 可表示为

$$SMG = \frac{\max_{i,t} x(i, t)}{\max_t \frac{\sum_{i=1}^N x(i, t)}{N}} \quad (6)$$

其中 $\max_{i,t} x(i, t)$ 表示区域内时-空联合数据流量随时间变化的最大值,它对应于流量矩阵 $\mathbf{X}(i, t)$ 中的最大元素。在式(6)中, $\max_t \frac{\sum_{i=1}^N x(i, t)}{N}$ 表示该地区所有小区的平均流量值随时间变化的最大值,用 $m(t)$ 来表示该地区所有小区的平均流量值:

$$m(t) = \frac{\sum_{i=1}^N x(i, t)}{N} \quad (7)$$

因此,将式(7)代入式(6),SMG 表示为

$$SMG = \frac{\max_{i,t} x(i, t)}{\max_t m(t)} \quad (8)$$

在实际的蜂窝网络中,考虑到网络部署成本,BS 的处理资源通常被配置为所需最大资源量的一个较高的百分比,而不是在任何时候都满足 BS 处理最大流量的要求。也就是说,实际系统有一个服务阈值比率 P_{th} 。对于给定的 t , 定义服务阈值比率 P_{th} 对应的服务流量阈值为 $x_{th}(t, P_{th})$ 。在时间 t , $x_{th}(t, P_{th})$ 是当服务阈值为 P_{th} 时能处理的最大流量值,于是有:

$$P_{th} = \Pr(x(i, t) \leq x_{th}(t, P_{th})) \quad (9)$$

其中, P_{th} 可以根据实际网络部署场景和工程经验设置,例如 95%、97%、99% 等。

因此,对于一个给定的 P_{th} , SMG 表示为

$$SMG(P_{th}) = \frac{\max_{i,t} x_{th}(t, P_{th})}{\max_t m(t)} \quad (10)$$

由于整个区域内移动用户总数的相对稳定性以及移动用户在空间位置的不均匀分布,单个小区的流量在时域和空域上都具有很强的不均匀性^[18],因此,蜂窝网络中流量的时-空联合分布对于 SMG 的分析至关重要。已有研究表明,lognormal 分布是蜂窝网络空间流量分布的一种代表性分布^[18-20]。因此,将基于 lognormal 分布给出 SMG 的分析。

1.2 SMG 分析

由式(10)可知,为了分析 SMG,需要知道该区域内流量的时-空分布和所有小区的平均流量值。流量时间分布模型描述了蜂窝网络随时间的流量特性,通常,流量时间分布模型表现出强周期性,其中在一天中的忙碌时间和空闲时间是比较明显的。文献[18]分析了时域中基站的流量值,发现移动用户在一天的时间段内具有重复性行为,提出了一种正弦信号叠加模型,以拟合蜂窝网络在时域中的实际业务流量分布,该模型由下式给出:

$$m(t) = a_0 + \sum_{k=1}^n a_k \cdot \sin(w_k t + \varphi_k) \quad (11)$$

其中, $m(t)$ 是该区域内所有小区的平均流量值, a_0 是常数, w_k 是流量变化的频率成分, n 是频率成分的数量, a_k 和 φ_k 分别是相应流量变化的幅度和相位。

由于真实网络中用户社交行为的随机性, 业务流量分布通常是不均匀的, 蜂窝网络中的业务空间分布与地理位置有关, 不同区域的用户表现出不同的行为特征, 导致空间域中的流量分布不均匀。文献[18-20]表明了蜂窝网络中业务流量的空间不均匀性可用 lognormal 分布来描述。空间流量密度被视为用户的实际流量需求, 可以用 lognormal 分布来近似拟合^[20]。

lognormal 分布的概率密度函数(PDF)为

$$f_X(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (x > 0) \quad (12)$$

其中, μ 和 σ 分别是变量对数的均值和标准差。

lognormal 分布的累积分布函数(CDF)为

$$F_X(x) = \Phi\left\{-\frac{(\ln x) - \mu}{\sigma}\right\} \quad (13)$$

基于空间流量分布的 lognormal 模型, 时间 t 时的 lognormal 分布的参数 μ 可以使用式(14)来进行计算^[18]。

$$\mu(t) = \ln(m(t)) - \frac{1}{2}\sigma^2 \quad (14)$$

根据式(11)给出的流量时间分布模型, 并利用 lognormal 分布的参数 $\mu(t)$ 和 σ , 建立流量时-空联合分布模型如下:

$$\begin{aligned} f_X(x(i, t); \mu, \sigma) &= f_X\left(x(i, t); \ln(m(t)) - \frac{1}{2}\sigma^2, \sigma\right) \\ &= \frac{1}{x(i, t)\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\left(\ln x(i, t) - \ln(m(t)) + \frac{1}{2}\sigma^2\right)^2}{2\sigma^2}\right\} \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $x(i, t)$ 表示该区域内时间 t 时, 小区 i 的流量值。

$x(i, t)$ 的 CDF 为

$$F_X(x(i, t)) = \int_{-\infty}^X f_X(x(i, t)) dX$$

$$= \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln x(i, t) - \ln(m(t)) + \frac{1}{2}\sigma^2}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right) \quad (16)$$

其中, erf 是误差函数, 定义如下:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-x}^x e^{-t^2} dt = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (17)$$

根据式(9)和(16), 可得到服务阈值比率 P_{th} 的表达式为

$$\begin{aligned} P_{th} &= F_X(x_{th}(t, P_{th})) \\ &= \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln x_{th}(t, P_{th}) - \ln(m(t)) + \frac{1}{2}\sigma^2}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right) \end{aligned} \quad (18)$$

对式(18)进行等式变换, 可以得到 $x_{th}(t, P_{th})$ 的表达式为

$$x_{th}(t, P_{th}) = m(t) \exp\left(\sqrt{2}\sigma \operatorname{erf}^{-1}(2P_{th} - 1) - \frac{1}{2}\sigma^2\right) \quad (19)$$

其中, $\operatorname{erf}^{-1}(2P_{th} - 1)$ 返回 $(2P_{th} - 1)$ 的逆误差函数的值。

综上, 考虑到服务阈值比 P_{th} , 基于式(10)和(19), 集中式无线接入网的处理资源的 SMG 表示为

$$\begin{aligned} SMG &= \frac{\max_t x_{th}(t, P_{th})}{\max_t m(t)} \\ &= \frac{\max_t m(t) \exp\left(\sqrt{2}\sigma \operatorname{erf}^{-1}(2P_{th} - 1) - \frac{1}{2}\sigma^2\right)}{\max_t m(t)} \\ &= \exp\left(\sqrt{2}\sigma \operatorname{erf}^{-1}(2P_{th} - 1) - \frac{1}{2}\sigma^2\right) \end{aligned} \quad (20)$$

可以看出, 集中式架构无线接入网的处理资源 SMG 与服务阈值比率 P_{th} 和 lognormal 分布的参数 σ 有关。对于蜂窝网络的实际部署, 相应的 SMG 值可以通过闭合形式的式(20)获得, 用于对无线接入网的工程实践和网络部署提供指导。

2 无线接入网优化部署分析

在集中式架构的无线接入网部署中, 虽然 SMG 的存在可以减少处理资源配置, 但由于需要 RRH 通

过光纤与处理资源池直连,这就增加了光纤及部署光纤的成本,从而增加集中式架构网络部署的成本。因此,采用集中式架构进行无线接入网部署时,有必要对网络部署总成本进行深入分析,从而为实现网络的优化部署提供理论依据。

2.1 部署场景

基于集中式架构的无线接入网部署场景如图2所示,这里假定每一个蜂窝小区均为正六边形,其RRH设备放置于正六边形的几何中心,部署区域的几何中心点位置是由处理资源单元(processing resource unit, PRU)组成的PRU Pool,并且假定集中式架构中,所有聚合小区的方式:以PRU Pool为中心,层层环绕逐渐向外进行扩散,每个小区的RRH通过光纤(fiber)直连到PRU Pool,并通过高速光纤交换设备(fiber-optic switching, FOS)进行汇聚。在传统分布式架构中,由于基站处理资源设备与RRH设备基本放置在临近的位置,因此,这里假定分布式架构中不需要使用光纤。在集中式架构中,所使用的光纤总长度为图2中所有小区正六边形几何中心与部署区域中心的距离之和。

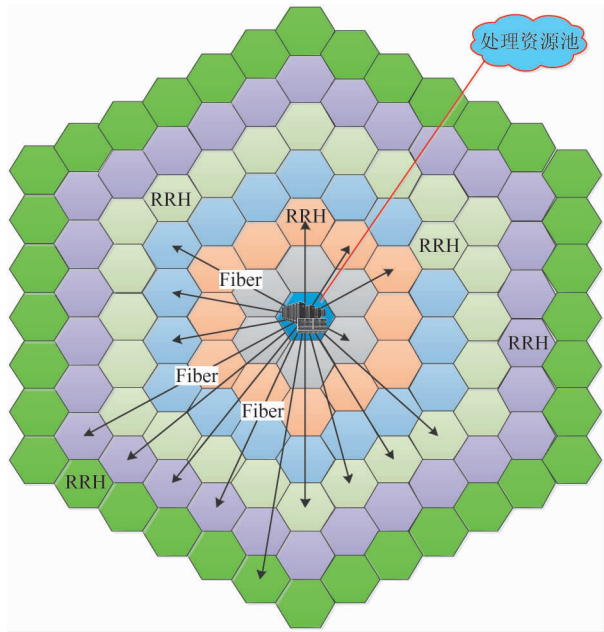


图2 无线接入网部署场景示意图

针对一定覆盖规模大小、不同区域类型的无线接入网部署,综合考虑处理资源SMG以及集中式架构无线接入网部署成本,对无线接入网部署总成本

进行优化分析。

2.2 部署成本分析

根据2.1节所述的部署场景,不考虑具有相对固定成本的机房、空调等基建外围配套设施,这里的无线接入网部署总成本TC(total cost)从蜂窝网络业务流量处理相关的基站设备部署角度考虑,主要涉及以下几部分:RRH设备的成本 RRH_TC , PRU的成本(包括2部分:一部分是集中式架构部署的小区所需要的PRU Pool中的成本 PRU_CRAN_TC ,另一部分是传统分布式架构部署的小区所需的PRU的成本 PRU_DRAN_TC), FOS的成本 FOS_TC , 光纤的成本 $Fiber_TC$, 以及部署光纤的成本 $Fiber_Deploy_TC$ 。因此,无线接入网部署总成本TC表示为

$$TC = RRH_TC + PRU_CRAN_TC + PRU_DRAN_TC + FOS_TC + Fiber_TC + Fiber_Deploy_TC \quad (21)$$

由于一个PRU的成本与1 km光纤的成本未知,定义一个成本因子CF(cost factor),用于表示一个PRU成本与1 km光纤成本的倍数关系。假设所有小区中有比例为 η 的小区进行集中式架构部署,处理资源统计复用增益为SMG。比例为 $1 - \eta$ 的小区进行传统分布式架构部署。另外,假设部署光纤的成本是光纤成本的 a 倍。故无线接入网部署总成本TC进一步表示为

$$\begin{aligned} TC &= RRH_Cost \cdot N_{cells} + \frac{PRU_Cost \cdot \eta N_{cells}}{SMG} \\ &+ PRU_Cost \cdot (1 - \eta) N_{cells} \\ &+ FOS_Cost \cdot N_{foss} + Fiber_Cost \cdot L_{Fiber} \\ &+ a Fiber_Cost \cdot L_{Fiber} \\ &= RRH_Cost \cdot N_{cells} + PRU_Cost \cdot \left(\frac{\eta}{SMG} \right. \\ &\quad \left. + 1 - \eta \right) N_{cells} + FOS_Cost \cdot N_{foss} \\ &\quad + (a + 1) \frac{PRU_Cost}{CF} \cdot L_{Fiber} \end{aligned} \quad (22)$$

其中, N_{cells} 为小区总数, N_{foss} 为FOS的数量, L_{Fiber} 为集中式部署所需的光纤总长度(单位为km)。

由式(22)可以看出,要计算部署总成本TC,需要先计算出小区的总数量 N_{cells} ,得到小区的总数量也就知道了需要的RRH的总数量以及以传统基站

分布式部署时 PRU 的总数量都为 N_{cells} ，通过比例 η 的改变,变化范围为 $0 \sim 1$,可以得到集中式部署的小区的数量,从而根据处理资源 SMG,可以得到集中式部署的小区所需要的处理资源池里 PRU 的数量。在下一节中将进行部署总成本的仿真分析。

3 仿真结果及分析

考虑基于时-空联合流量分布模型,选择 3 种典型的区域类型,即中央商务区(CBD)、公园(park)和校园(campus),小区数量为 N , 小区流量均值 $m(t)$ 及 lognormal 分布参数 σ 从文献[18]中获得。假设待部署区域的面积为 A , 小区半径为 R 。另外,定义一个标准成本单位 SCU(standard cost unit),用于表示各设备成本的基本单位,且根据在 LTE 系统工程实践中的经验,RRH、PRU、FOS 的成本相对比值设置为 5:50:1,此比值可以根据实际网络制式的不同进行调整。具体参数值设置如表 1 所示。

3.1 处理资源 SMG

SMG 的值如图 3 所示,可以看出,对于所有典型的区域类型 CBD、park 和 campus,SMG 随着 P_{th} 的增加而增加,这是因为 P_{th} 越大,需要配置的处理资源就越多,以支持 DRAN 架构中的峰值流量负载。在 CRAN 架构中,处理资源集中在处理资源池中,可以在不同的 BS 之间共享。所以当 BS 业务流量负载较低时,可以将冗余的处理资源动态地重新调度分配给其他具有较高业务流量负载的 BS,当 BS 处于峰值流量负载时,也能够通过共享其他 BS 的处理资源,从而为其分配足够多的处理资源。因此, P_{th} 不会显著影响 CRAN 中所需配置的处理资源。

3.2 部署所需 PRU 数量

根据 3.1 节中关于处理资源 SMG 分析的结果,不失一般性,考虑服务阈值比率 P_{th} 为 0.97 时,区域为 park、campus 和 CBD 类型的 SMG 分别为 5.1、1.4、4.0。从而得到 3 种区域类型 (park、campus 和 CBD)情况下,整个无线接入网中所需要的 PRU 的总数量随 η 的变化关系如图 4 所示。可见,随着集中式架构部署的小区数占比的增大,所需要的 PRU 的总数量呈现逐渐减少的趋势。并且,随着 SMG 的增

表 1 参数设置

参数	值
N	1 000
T	24 h
Δt	1 h
P_{th}	(0.94 ~ 0.995)
σ (CBD)	2.8
σ (park)	1.3
σ (campus)	3.6

$m(t)$ (CBD)	$75.72 + 47.52 \times \sin(\frac{\pi}{12}t - 2.56)$ $+ 16.71 \times \sin(\frac{\pi}{6}t + 1.45)$
$m(t)$ (park)	$351.06 + 222.7 \times \sin(\frac{\pi}{12}t + 3.11)$ $+ 96.24 \times \sin(\frac{\pi}{6}t + 2.36)$
$m(t)$ (campus)	$323.04 + 148.3 \times \sin(\frac{\pi}{12}t + 2.98)$ $+ 109.4 \times \sin(\frac{\pi}{6}t + 2.15)$ $+ 38.43 \times \sin(\frac{\pi}{4}t + 1)$

A	100 km ²
R	1 km
N_{foss}	1
a	3
RRH_Cost	5 SCU
PRU_Cost	50 SCU
FOS_Cost	1 SCU

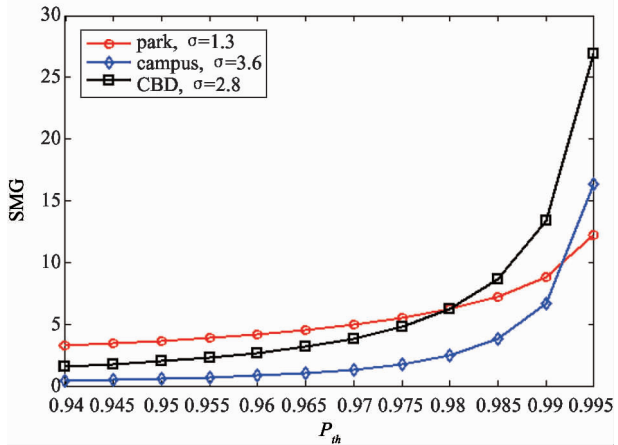


图 3 SMG 值与 P_{th} 的关系图

大,所需 PRU 的总数量也呈现逐渐减少的趋势。这是因为,随着集中式架构部署的小区数占比的增大,

传统分布式架构部署的小区的减少,处理资源 SMG 将更明显,故整个无线接入网所需的 PRU 的总数量就会减少。

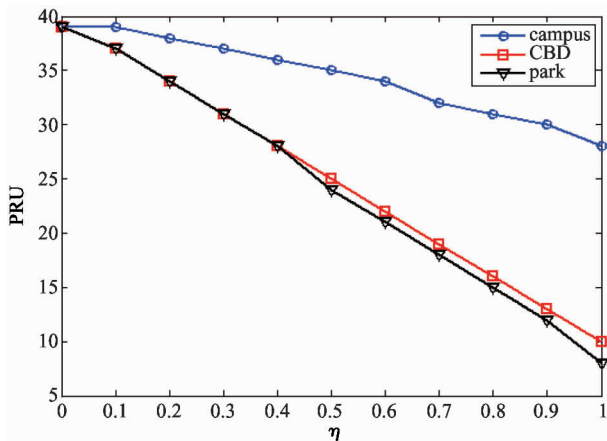


图4 所需的 PRU 的总数量随 η 的变化关系图

3.3 部署所需光纤总长度

根据部署场景假设,采用集中式架构部署的小区才需要额外的光纤,故光纤所需的总长度取决于所有小区中有多少比例的小区采用集中式部署,并且与部署的区域类型无关。根据部署场景面积及小区半径进行计算得到集中式架构部署的小区所需要的光纤的总长度随 η 的变化关系如图5所示,可见,随着集中式架构部署的小区数占比的增大,所需要的光纤的总长度也随之逐渐增大。这与图4中所需的 PRU 的总数量随 η 的变化趋势相反,从而可能导致部署成本随 η 变化的趋势具有非一致性,这将在3.4节中进行分析。

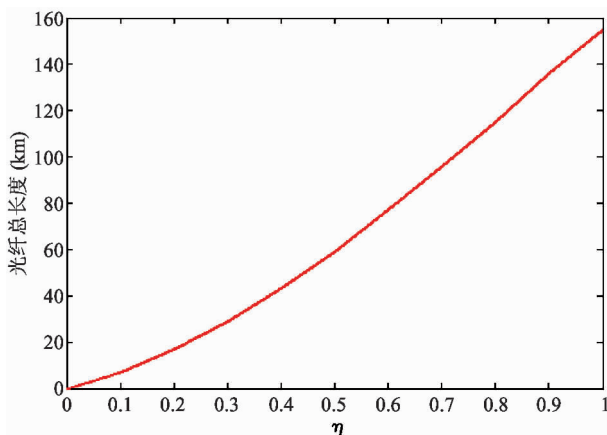


图5 无线接入网所需的光纤的总长度随 η 的变化关系图

3.4 部署总成本

根据3.2节和3.3节中的分析,对部署总成本式(24)进行数值仿真,探索部署总成本与比例及成本因子 CF 之间的关系。图6显示了不同的比例 η 以及不同的成本因子 CF 下的 park 区域的无线接入网部署总成本。

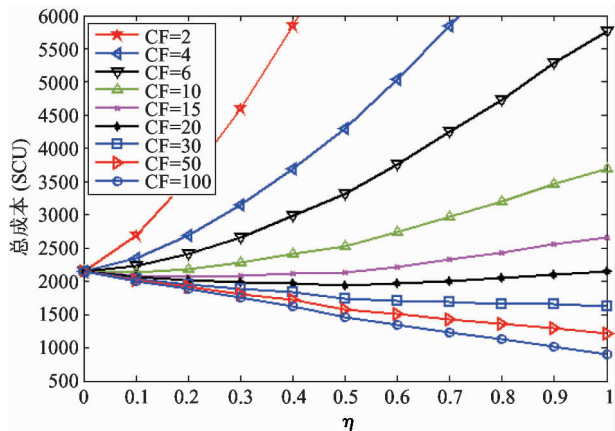


图6 无线接入网总成本随 η 以及 CF 的变化关系图

可以发现,成本因子 CF 以及比例 η 对部署总成本的变化趋势有着重要的影响。当比例 η 一定时,部署总成本随着 CF 的增大而减小,这是因为集中式架构部署时处理资源 SMG 效应的存在。另外,当 CF 值一定时,部署成本随着 η 的变化趋势不固定。例如,当 $CF=4$ 时,部署成本随着比例 η 的增加而增加,也就是说,当一个 PRU 的成本是 1 km 光纤成本的 4 倍时,部署集中式架构的网络成本将比部署传统分布式基站的大。而当 $CF=40$ 时,部署成本随着比例 η 的增加而减少,意味着此时更多的小区采用集中式架构部署将节省更多的成本。当 $CF=20$ 时,50% 的小区采用集中式架构部署,50% 的小区采用传统分布式架构部署,将使得接入网部署总成本最低。

4 结论

本文针对集中式架构无线接入网处理资源 SMG 模型及理论分析缺乏等问题,根据现网蜂窝网络流量的时-空分布规律,考虑实际蜂窝网络中基站处理资源配置的服务阈值比例 P_{th} ,建立了时-空联

合流量分布的处理资源 SMG 模型,并推导了集中式架构基站处理资源 SMG 的闭合表达式。分析了服务阈值比例 P_{th} 对处理资源 SMG 的影响。在此基础上,综合考虑集中式架构基站部署的成本,建立了无线接入网部署总成本模型,并对其进行了详细分析。仿真结果表明,处理资源 SMG 随着服务阈值比例 P_{th} 的增加而增加,在 SMG 效应下,当集中式架构部署的小区比例 η 一定时,部署总成本 TC 随着成本因子 CF 的增大而减小,当 CF 值一定时,部署总成本 TC 随着 η 的变化趋势并不总是相同的,取决于 CF 值的大小。本文所进行的分析和研究为基于集中式架构的无线接入网的工程实践和网络部署提供了理论基础和指导参考,具有很好的实际应用价值。

参考文献

- [1] Cisco. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, C11-738429-01 [R]. San Jose: Cisco, 2016
- [2] 中国移动通信研究院. 迈向 5G C-RAN:需求、架构与挑战[R]. 北京:中国移动通信研究院,2016
- [3] Zhai G W, Tian L, Zhou Y Q, et al. Load diversity based optimal processing resource allocation for super base stations in centralized radio access networks [J]. *Science China Information Sciences*, 2014, 57(4): 1-12
- [4] Qian M L, Wang Y Y, Zhou Y Q, et al. A super base station based centralized network architecture for 5G mobile communication systems [J]. *Digital Communications and Networks*, 2015, 1(2): 152-159
- [5] Zhou Y Q, Tian L, Liu L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2019, 57(5):20-27
- [6] Liu J C, Zhou S, Gong J, Z, et al. On the statistical multiplexing gain of virtual base station pools [C] // Proceedings of the 2014 IEEE Global Communications Conference, Austin, USA, 2014: 1-6
- [7] Liu J C, Zhou S, Gong J, Z, et al. Statistical multiplexing gain analysis of heterogeneous virtual base station pools in cloud radio access networks [J]. *IEEE Transactions Wireless Communications*, 2016, 15(8): 5681-5694
- [8] Wang L M, Zhou S. On the fronthaul statistical multiplexing gain [J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21

(5): 1099-1102

- [9] Madhavan M, Gupta P, Chetlur M. Quantifying multiple-
xing gains in a wireless network cloud [C] // Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Communications, Ottawa, Canada, 2012: 3212-3216
- [10] Checko A, Holm H, Christiansen H. Optimizing small cell deployment by the use of C-RANs [C] // Proceedings of the 20th European Wireless Conference, Barcelona, Spain, 2014: 1-6
- [11] Paul U, Subramanian A P, Buddhikot M M, Das S R, Understanding traffic dynamics in cellular data networks [C] // Proceedings of the 2011 IEEE INFOCOM, Shanghai, China, 2011: 882-890
- [12] Marotta A. Optimisation of Radio Access Network Cloud Architectures Deployment in LTE-Advanced [D]. L'Aquila: Università degli Studi dell'Aquila Press, 2015: 2-5
- [13] Al-obaidi R. C-RAN Deployment Scenarios [D]. Denmark: Technical University of Denmark Press, 2014: 3-9
- [14] Monteiro T, Correia L, Dinis R. Analysis of different cloud-RAN implementation strategies [C] // Proceedings of the 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference, Toronto, Canada, 2017: 1-6
- [15] Liu L, Zhou Y Q, Zhuang W H, et al. Tractable coverage analysis for hexagonal macrocell-based heterogeneous UDNs with adaptive interference aware CoMP [J]. *IEEE Transactions Wireless Communications*, 2019, 18 (1): 503-517
- [16] Liu L, Zhou Y Q, Garcia V, et al. Load aware joint CoMP clustering and Inter-cell resource scheduling in heterogeneous ultra dense cellular networks [J]. *IEEE Transactions Vehicular Technology*, 2018, 67 (3):2741-2755
- [17] Zhang Z S, Tian L, Zhou Y Q, et al. Energy efficient dynamic computing resource allocation in centralized radio access networks [C] // Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Communications, Kansas, USA, 2018: 1-6
- [18] Wang S, Zhang X, Zhang J X, et al. An approach for spatial-temporal traffic modeling in mobile cellular networks [J]. *arXiv:1703.10804v1*, 2017
- [19] Lee D, Zhou S, Niu Z S. Spatial modeling of scalable spatially correlated log-normal distributed traffic inhomogeneity and energy efficient network planning [C] // Pro-

ceedings of the 2013 IEEE Wireless Communications and
Networking Conference, Shanghai, China, 2013: 1285-
1290

[20] Lee D, Zhou S, Zhang J X, et al. Spatial modeling of the
traffic density in cellular networks [J]. *IEEE Wireless
Communications*, 2014, 21(1): 80-88

Research on optimized deployment of radio access network based on centralized architecture

Zhang Zongshuai * * * * *, Tian Lin * * * * *, Shi Jinglin * * * * *, Xu Shunqing * * * * *

(* Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190)

(** Wireless Communication Technology Research Center,

Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(*** University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(**** Samsung Research Institute China-Beijing(SRC-B), Beijing 100028)

Abstract

The centralized architecture radio access network shares processing resources through resource pools, and significantly reduces the processing resources required by the network compared to traditional distributed architecture radio access network. This performance can be evaluated by statistical multiplexing gain (SMG). In this paper, a SMG model based on spatial-temporal joint traffic distribution resource is established, and the closed expression of SMG is derived. On this basis, considering the cost of the processing resource pool, remote radio head (RRH) and fiber of the centralized architecture network deployment, the cost model of the base station primary equipment deployment of the radio access is established and cost analysis is carried out. The simulation results show that the SMG increases with the increase of the service threshold. When the proportion of cells deployed in the centralized architecture is fixed, the total deployment cost decreases as the cost factor increases. When the cost factor is fixed, the trend of total cost varies depending on the value of the cost factor. The analysis and research carried out in this work provides theoretical guidance for the wireless access network engineering practice and network deployment based on centralized architecture, and has good practical application value.

Key words: centralized architecture, radio access network, statistical multiplexing gain (SMG), optimized deployment