

协作的内容交付与路由请求

1.网络模型

考虑异构边缘缓存的物联网网络架构，包括基站、用户、与云中心。

其中基站定义为 $b_j \in \mathcal{B}, j \in J = \{1, 2, \dots, B\}$ ，用户定义为 $u_i \in \mathcal{U}, i \in I = \{1, 2, \dots, U\}$ 。

将基站定义为 $\mathcal{G} = \langle \mathcal{B}, \mathcal{E} \rangle$ ，如果基站之间可以通信，则 $e_{jj'} = 1$ ，此处 $j, j' \in J$

a.内容

定义物联网内容对象集合为 $\mathcal{F} = \{1, \dots, f, \dots, F\}$ ，内容大小为 $\{s_1, \dots, s_f, \dots, s_F\}$ 。

假设所有的内容可以在云上的内容库里检索到。

认为基站与是异构的，具有不同的存储能力限制。定义基站 j 的存储能力为 c_j 。

b.请求

将时隙定义为： $t \in T = \{0, 1, \dots, \tau - 1\}$ 。

在每个时隙 t 中，用户随机的发出对内容的请求，用户可以发出对内容的请求，或不发出请求。

定义用户的请求为 $q_i(t) = f$ 或 $q_i(t) = 0$ 。

假设在每个时隙，用户最多发送一个请求。对于用户的请求，我们假设最多有一个缓存节点对用户的请求进行响应。

d.带宽

定义异构MEC网络（何为异构：带宽异构），定义基站间的带宽 \mathcal{W} ， $w_{jj'}$ 表示基站 j 和基站 j' 之间的带宽。

d.缓存与交付与路由决策

对于在时隙 t 发出请求的用户，即 $q_i(t) \neq 0$ 。

缓存决策：如果在时隙 t 基站 b_j 缓存了内容 f ，则 $x_j^f(t) = 1, i \in I, f \in F$ ，否则 $x_j^f(t) = 0$ 。

交付决策：如果在时隙 t 基站 b_j 对用户 u_i 的请求进行了交付，则 $y_j^i(t) = 1, j \in J$ ，否则 $y_j^i(t) = 0$ 。如果由云进行交付，则 $y_{cloud}^i(t) = 1$ 。

路由决策：对于交付决策，可以得出一条内容交付的路径。如果基站 j 与基站 j' 之间的路径进行了路由，则 $z_{jj'} = 1, j, j' \in J$ ，否则 $z_{jj'} = 0$ 。

2.成本模型

（不论是内容检索成本还是基站间传输成本都是对基站而言的成本，对MEC运营商而言的成本）

在内容提前缓存的前提下我们研究了内容交付的问题。对于内容交付问题我们考虑了两部分的成本，包括在边缘节点进行内容检索的成本，以及响应用户请求的回程链路传输能量成本。

a.内容检索成本

对于内容检索成本，定义为 $\psi^s(t)$ ，我们考虑在缓存节点检索内容的成本收到缓存节点存储文件数量与请求内容的大小两方面的影响。定义用户 i 从基站 b_j 检索文件 f 的单位检索成本为 η_f^j

$$\psi_{j,f}^s(t) = \eta_f^j \frac{s_f}{c_j} y_j^i(t) \quad (1)$$

$$\psi_{j,f}^s(t) = \eta_f^j s_f \sum_f x_j^f(t) \quad (1)$$

对于到云上的内容库进行内容检索的成本定义为常数 ψ_{cloud}^s 。

对于每个基站 j 内容检索成本计算为

$$\psi_j^s(t) = \sum_i y_j^i(t) \psi_{j,q_i(t)}^s(t)$$

上云检索成本

$$\psi_{cloud}^s(t) = y_{cloud}^i(t) \psi_{cloud}^s$$

b. 传输速率

定义用户的位置 $p_i(t) = (x_i(t), y_i(t))$ ，基站的位置 $p_j = (x_j, y_j)$

在时隙 t 覆盖用户 u_i 的定义基站为 $O_i(t)$

对于回程链路传输能量成本，定义为 $\psi^e(t)$ 。我们主要考虑基站间带宽与回程数据大小两方面的影响。

基站与用户之间的（无线）传输速率 $r_{ij}, j \in O_i$

$$r_{ij}(t) = w_{ij} \log_2 \left(1 + \frac{g_{ij}(t) p_i(t)}{\sigma_u} \right)$$

定义用户发射功率 $p_i(t)$ 。其中 w_{ij} 表示用户与基站间带宽， $g_{ij}(t) = \frac{\rho_u}{\|d_i(t) - d_j\|^2}$ 表示时隙 t 的信道增益， σ_u 表示背景噪声功率。

c. 传输时延

我们假设用户 u_i 请求的大小为 s_q^i ，为一个服从正态分布的数值或0。

则对于用户 u_i 的传输延迟计算，包括无线传输时延部分和有线传输时延部分

无线时延部分：（默认选择离的最近的覆盖该用户的基站，距离越近，时延越小）

$$d_i^w(t) = \frac{s_{q_i(t)} + s_q^i}{r_{ij}(t)}$$

有线时延部分：

$$d_i^l(t) = \sum_{j,j' \in J} z_{jj'} \frac{s_{q_i(t)} + s_q^i}{w_{jj'}}$$

上云时延部分

$$d_i^{cloud}(t) = y_{cloud}^i(t) \frac{s_{q_i(t)} + s_q^i}{r_C}$$

每个用户 u_i 的请求时延计算为

$$D_i(t) = d_i^w(t) + d_i^l(t) + d_i^{cloud}(t)$$

d. 传输成本

对整体系统

$$\psi^e(t) = \sum_{j,j' \in J} z_{jj'} w_{jj'}$$

上云传输成本

$$\psi_{cloud}^e(t) = y_{cloud}^i(t) \psi_{cloud}^e$$

对于到云上的内容库进行回程传输成本定义为常数(合适吗，还是定义为内容大小乘一个常数) ψ_{cloud}^e 。

则系统的总成本表示为

$$\Psi(t) = \sum_j \rho^s \psi_j^s(t) + \rho^e \psi^e(t)$$

为了控制系统长期内容交付成本，为内容交付系统构建并维护一个成本的虚拟队列 $Q(t)$ 。它表示在时隙 t 结束时超出成本预算的成本值。设置成本预算为 Ψ^{Budget} 。则成本虚拟队列更新为

$$Q(t+1) = \max[Q(t) + \Psi(t) - \Psi^{budget}, 0]$$

其中队列的初始值 $Q(0) = 0$ 。

e. 目标

有请求用户的平均时延为

$$D(t) = \frac{\sum_{u_i \in \mathcal{U}} D_i(t)}{\sum_{i \in I} 1\{q_i(t) \neq 0\}}$$

4. 目标问题

目标：

$$\min_{y,z} D(t)$$

对于交付的约束

a. 只有缓存了该内容的基站才可以进行交付

$$y_j^i(t) \leq x_j^{q_i(t)}(t), \forall j \in J, f \in \mathcal{F}, i \in I$$

b. 最多只有一个缓存节点进行交付

$$\sum_{j \in J \cup \text{cloud}} y_j^i(t) = 1, \forall j \in J, i \in I$$

c. 缓存能力约束

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} s_f x_j^f \leq c_j$$

d.内容交付长期成本约束

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \sum_{t \in T} \mathbb{E}\{\Psi(t)\} \leq \Psi^{budget}$$

e.0-1约束

$$x_j^f(t) \in \{0, 1\}, \forall j \in J, f \in \mathcal{F}$$

$$y_j^i(t) \in \{0, 1\}, \forall j \in J, i \in I$$

5.Lyapunov相关

内容交付成本的队列挤压向量定义为

$$\Theta(t) = ([Q(t)])$$

二次Lyapunov函数定义为

$$L(\Theta(t)) = \frac{1}{2} [Q(t)]^2$$

将单时隙条件李雅普诺夫漂移定义为相邻时隙李雅普诺夫二次函数差值的条件期望，即二次李雅普诺夫函数在时隙中的期望变化，表示为

$$\Delta(\Theta(t)) = \mathbb{E}\{L(\Theta(t+1)) - L(\Theta(t)) | L(\Theta(t))\}$$

内容交付成本队列积压的单时隙条件Lyapunov漂移有一个上界函数:

$$\Delta(\Theta(t)) \leq \beta + Q(t) \mathbb{E}\{[\Psi(t) - \Psi^{budget}] | \Theta(t)\}$$

我们将内容交付决策和传输功率决策的优化目标定义为时隙 t 中的漂移-加-时延函数，表示为

$$\Delta(\Theta(t)) + V \mathbb{E}\{D(t) | \Theta(t)\}$$

其中 V 为内容交付成本、队列稳定性和内容交付时延的控制参数。MEC运营商可以根据当前队列待定状态，灵活调整 V ，实现时延和系统稳定性之间的平衡。

由上式可以得到

$$\begin{aligned} & \Delta(\Theta(t)) + V \mathbb{E}\{D(t) | \Theta(t)\} \\ & \leq \beta + Q(t) \mathbb{E}\{[\Psi(t) - \Psi^{budget}] | \Theta(t)\} \\ & \quad + V \mathbb{E}\{D(t) | \Theta(t)\} \end{aligned}$$

则问题目标变为

$$\begin{aligned} & \min_{y,z} Q(t) \{\Psi(t) - \Psi^{budget}\} + V \{D(t)\} \\ & \min_{y,z} Q(t) \Psi(t) + V \{D(t)\} \end{aligned}$$

6.算法设计

算法流程

1) 成本启发的贪心算法

对于每一个用户，按流行度部署内容缓存（可以吗），并选择使成本最小的交付决策，即为贪心算法。

2) 分支定界算法

求出最优的缓存和交付决策

缓存决策空间 $B * F$

交付决策空间 $B * U$

非线性优化

目标：缓存决策系数：队列值*[每个基站对应的最小带宽成本 (可以得出吧) *交付决策+检索成本 (涉及到缓存决策) *交付决策]+V*每个基站的最小交付时延 (可以得出吧) *交付决策

3) 最短路径算法

依据交付决策得出路由决策