

11. Forgalmi osztályok, előzetes forgalomszabályozás

Kommunikációs hálózatok teljesítményének elemzése

Horváth Illés

2024/11/20

1. Előzetes forgalomszabályozás
2. Forgalomtípusok
3. CBR forgalmak, Kaufman–Roberts algoritmus
4. ON-OFF forgalmak
5. Adaptív forgalmak
6. Elasztikus forgalmak

Előzetes forgalomszabályozás

Előzetes forgalomszabályozás alatt azt értjük, amikor egy szerveren/csatornán az igény megjelenésének pillanatában döntünk arról, az igényt beengedjük-e vagy elutasítjuk (eldobjuk). Az ilyen döntési mechanizmusok összefoglaló neve *call admission control* (CAC).

Ennek főleg olyan esetekben van jelentősége, amikor a már bent lévő igények nagyobb jogokkal rendelkeznek (vagyis kisebb gond, ha eleve be sem engedünk egy igényt, mintha később korlátozzuk).

Ezt is fluid modellel vizsgáljuk: adott egy C kapacitású csatorna (ugyanaz, mint korábban a μ kapacitású szerver), és a már bent lévő igények pillanatnyi állapota alapján szeretnénk dönteni az alapján, beengedünk-e további igényeket.

Forgalomtípusok

A következő forgalomtípusokat fogjuk vizsgálni:

- ▶ Állandó sebességű (constant bit rate, CBR): egy ilyen forgalom az indulásától konstans c sávszélességgel ad addig, amíg végez. Általában feltesszük, hogy Poisson-folyamat szerint érkeznek a forgalmak λ paraméterrel, és egy ilyen forgalom $\text{EXP}(\mu)$ ideig aktív.
- ▶ ON-OFF forgalom: egy ilyen forgalom az indulásától c vagy 0 sávszélességet igényel, melyek között α illetve β rátával váltakozik markovi módon. Figyelem: az OFF állapot nem ugyanaz, mint az, hogy végzett! OFF állapotból még átválthat ON-ba. Itt is feltesszük, hogy Poisson-folyamat szerint érkeznek a forgalmak λ paraméterrel, és egy ilyen forgalom $\text{EXP}(\mu)$ idő után végez.

Forgalomtípusok

- ▶ Adaptív forgalom: egy ilyen forgalom $c_{\max}$ sávszélességet igényel, de szükség esetén megengedi, hogy visszaszabályozzák egy adott $c_{\min}$ értékig. Itt is feltesszük, hogy Poisson-folyamat szerint érkeznek a forgalmak λ paraméterrel, és egy ilyen forgalom $\text{EXP}(\mu)$ ideig aktív, függetlenül attól, hogy közben mekkora sávszélességet kapott.
- ▶ Elasztikus forgalom: egy ilyen forgalom $c_{\max}$ sávszélességet igényel, de szükség esetén megengedi, hogy visszaszabályozzák egy adott $c_{\min}$ értékig. Itt is feltesszük, hogy Poisson-folyamat szerint érkeznek a forgalmak λ paraméterrel.

A fő különbség az adaptív forgalomhoz képest, hogy a forgalom akkor végez, ha egy adott adatmennyiséget átvitt (tehát ha kisebb sávszélességet kap, akkor tovább tart). Az egy forgalom által átvendő adatmennyiségről feltesszük, hogy $\text{EXP}(\delta)$ eloszlású.

Forgalomtípusok

Minden típusból lehet többféle osztály, különböző paraméterekkel.

A főbb teljesítményjellemzők (általában osztályonként külön):

- ▶ Minden típusra: eldobási valószínűség érkezéskor (dropping probability);
- ▶ ON-OFF forgalmakra eldobási valószínűség bekapcsoláskor (OFF→ON átmenetkor);
- ▶ adaptív és elasztikus forgalmakra átlagos sávszélesség;
- ▶ elasztikus forgalmakra letöltési idő.

CBR forgalmak

Először azt az esetet vizsgáljuk, amikor a csatornába csak állandó sebességű (CBR) forgalmak érkeznek.

Tegyük fel, hogy összesen I forgalmi osztály van, az i -edik osztály paraméterei:

- ▶ λ_i érkezési ráta,
- ▶ μ_i távozási ráta,
- ▶ c_i sáv szélesség-igény.

A csatorna teljes kapacitása C .

Jelölje $n_1, \dots, n_I$ az aktív forgalmak számát egy adott időpillanatban az egyes forgalmi osztályokból. A csatorna kapacitáskorlátja miatt

$$\sum_{i=1}^I c_i n_i \leq C.$$

CBR forgalmak

Mivel az érkezés és távozásról is feltettük, hogy markovi módon történik, ezért az $(n_1, \dots, n_I)$ vektorra teljesül a Markov-tulajdonság $\rightarrow (n_1, \dots, n_I)$ egy folytonos idejű Markov-lánc.

A Markov-lánc állapottere:

$$S = \left\{ (n_1, \dots, n_I) : \sum_{i=1}^I n_i c_i \leq C, n_i \geq 0 \text{ egészek} \right\}.$$

Gyakorlati kihívás: az állapottér a C, I és a c_i értékektől függően lehet nagyon nagy.

A csatorna hosszú távú átlagos viselkedéséhez szükség van ennek a Markov-láncnak a v_{st} stacionárius eloszlására; a főbb teljesítményjellemzőket majd v_{st} -ből számítjuk ki.

Kaufman–Roberts-tétel

Tétel (Kaufman–Roberts)

A stacionárius eloszlás a következő:

$$v_{st}(n_1, \dots, n_l) = \frac{1}{G} \prod_{i=1}^l \frac{(\lambda_i / \mu_i)^{n_i}}{n_i!},$$

ahol

$$G = \sum_{(n_1, \dots, n_l) \in S} \prod_{i=1}^l \frac{(\lambda_i / \mu_i)^{n_i}}{n_i!}.$$

Lokális dinamikus egyensúly egyenletek

Biz. (vázlat) Igazából csak be kell helyettesíteni a stacionárius eloszlást definiáló lineáris egyenletrendszerbe. Ezt nem számoljuk végig részletesen, de azon múlik, hogy a v_{st} stacionárius eloszlásra teljesülnek az ún. lokális dinamikus egyensúly egyenletek is:

$$\lambda_i v_{\text{st}}(n_1, \dots, n_i - 1, \dots, n_I) = n_i \mu_i v_{\text{st}}(n_1, \dots, n_i, \dots, n_I)$$

minden olyan $(n_1, \dots, n_I)$ állapotra, amelyre $n_i \geq 1$.

Megjegyzés. A stacionárius eloszlás szorzat alakú, de az állapottér *nem* szorzat alakú a $\sum_{i=1}^I n_i c_i \leq C$ korlát miatt, így az egyes n_i értékek a stacionárius eloszlásban nem függetlenek.

A $C = \infty$ speciális esetben már az állapottér is szorzat alakú. Ekkor lényegében minden forgalomosztályra független $M/M/\infty$ szerverekként működik a csatorna, és a stacionárius eloszlás is független $\text{POI}(\lambda_i/\mu_i)$ eloszlásokból áll.

Kaufman-Roberts algoritmus

A stacionárius eloszlásra tehát van egyszerű képlet, de a nagy méretű állapottér még mindig kihívást jelent a teljesítményjellemzők kiszámításában.

A Kaufman–Roberts algoritmus alapötlete az, hogy vonjuk össze azokat az állapotokat, amikben a $c = \sum_i c_i n_i$ pillanatnyi összterhelés egyforma.

Ehhez szükséges az a feltevés, hogy van egy közös egység, aminek a $c_1, \dots, c_I$ értékek mindegyike egész többszöröse. Másképp fogalmazva: feltesszük, hogy $c_1, \dots, c_I$ mind egészek (a megfelelő egységben mérve).

A következő jelölést fogjuk használni:

$$v_{\text{st}}(c) = \sum_{\substack{(n_1, \dots, n_I) : \\ \sum_{i=1}^I n_i c_i = c}} v_{\text{st}}(n_1, \dots, n_I).$$

Kaufman-Roberts algoritmus

Tétel

A $v_{st}(c)$ értékekre teljesül a következő rekurzio:

$$v_{st}(c) = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i c_i}{\mu_i c} v_{st}(c - c_i) 1\{c_i \leq c\}.$$

Biz. A lokális dinamikus egyensúly egyenleteket rendezzük:

$$\begin{aligned} \lambda_i v_{st}(n_1, \dots, n_i - 1, \dots, n_I) &= n_i \mu_i v_{st}(n_1, \dots, n_i, \dots, n_I), \\ \frac{\lambda_i c_i}{\mu_i} v_{st}(n_1, \dots, n_i - 1, \dots, n_I) &= n_i c_i v_{st}(n_1, \dots, n_i, \dots, n_I). \end{aligned}$$

Összegezzük ezt az olyan állapotokra, amelyekre $\sum_{i=1}^I n_i c_i = c$ és $\sum_i$ -re, végül c -vel osztunk:

$$\sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i c_i}{\mu_i} v_{st}(c - c_i) 1\{c_i \leq c\} = \underbrace{\sum_{i=1}^I n_i c_i}_{=c} v_{st}(c).$$

Kaufman-Roberts algoritmus

A rekurzió alapján a $v_{\text{st}}(c)$, $c = 0, \dots, C$ értékeket a következő módon számítjuk ki:

1. Legyen $\tilde{v}(0) = 1$.
2. $c = 1, 2, \dots, C$ -re legyen

$$\tilde{v}(c) = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i c_i}{\mu_i c} \tilde{v}(c - c_i) 1\{c_i \leq c\}.$$

3. Végül

$$v_{\text{st}}(c) = \frac{\tilde{v}(c)}{\sum_{c=0}^C \tilde{v}(c)}.$$

Megjegyzések. Ha C nem egész, akkor $\lfloor C \rfloor$ -vel számolhatunk helyette.

Az algoritmus futásideje C -vel arányos, tehát akkor gyors, ha C kicsi, vagyis az „egység” viszonylag nagy.

Kaufman-Roberts algoritmus

Példa. Legyen a csatorna kapacitása $C = 4$. Kétféle forgalmi osztály van ($I = 2$), és a két forgalmi osztály jellemzői

$$c_1 = 1, \lambda_1 = 1, \mu_1 = 1, \quad c_2 = 2, \lambda_2 = 1, \mu_2 = 2.$$

Ekkor a rekurzió alapján

$$\tilde{v}(0) = 1,$$

$$\tilde{v}(1) = \frac{\lambda_1 c_1}{\mu_1 \cdot 1} \tilde{v}(0) = 1,$$

$$\tilde{v}(2) = \frac{\lambda_1 c_1}{\mu_1 \cdot 2} \tilde{v}(1) + \frac{\lambda_2 c_2}{\mu_2 \cdot 2} \tilde{v}(0) = 1,$$

$$\tilde{v}(3) = \frac{\lambda_1 c_1}{\mu_1 \cdot 3} \tilde{v}(2) + \frac{\lambda_2 c_2}{\mu_2 \cdot 3} \tilde{v}(1) = 2/3,$$

$$\tilde{v}(4) = \frac{\lambda_1 c_1}{\mu_1 \cdot 4} \tilde{v}(3) + \frac{\lambda_2 c_2}{\mu_2 \cdot 4} \tilde{v}(2) = 1/2,$$

és normalizálás után $v_{st} = (0.24 \ 0.24 \ 0.24 \ 0.16 \ 0.12)$.

Teljesítményjellemzők

Teljesítményjellemzők kiszámítása a Kaufman-Roberts algoritmus segítségével.

Az i -edik forgalmi osztály eldobási valószínűsége érkezéskor

$$b_i = \sum_{c > C - c_i} v_{\text{st}}(c).$$

A csatorna átlagos kihasználtsága

$$\rho = \frac{1}{C} \sum_{c=0}^C c \cdot v_{\text{st}}(c).$$

Módosított Kaufman-Roberts algoritmus

A Kaufman-Roberts algoritmus eredeti formájában a

$$v_{\text{st}}(c) = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i c_i}{\mu_i c} v_{\text{st}}(c - c_i) 1\{c_i \leq c\}$$

rekurzióban az $1\{c_i \leq c\}$ szorzó annak a CAC-nek felel meg, hogy amíg van hely, addig bármelyik igényt beengedjük.

Ha szeretnénk beengedési prioritizálást a forgalmi osztályok között, akkor megtehetjük, hogy az i osztályú forgalmakat a csatorna aktuális c kihasználtságától függően csak $f(i, c)$ valószínűséggel engedjük be; ilyenkor

$$v_{\text{st}}(c) = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i c_i}{\mu_i c} v_{\text{st}}(c - c_i) f(i, c),$$

és a stacionárius eloszlás ugyanúgy rekurzívan kiszámítható.

ON-OFF forgalmak

Ha a csatornán nem CBR, hanem ON-OFF forgalmak futnak, akkor az állapottér mérete még nagyobb (azt is könyvelni kell, hogy egy adott osztályból éppen mennyi forgalom van ON állapotban).

Sajnos erre az esetre nem ismert a Kaufman–Roberts algoritmushoz hasonló hatékonyságú eljárás a stacionárius eloszlás kiszámítására.

Ha a forgalmi osztályok száma és a csatorna kapacitása is kicsi, akkor a Markov-lánc teljes állapottere feltérképezhető és elemezhető. Ilyen esetekben a teljesítményjellemzők is könnyen kiszámíthatóak.

ON-OFF forgalmak

ON-OFF forgalmak esetén a legkonzervatívabb CAC az, ha csak annyi forgalmat engedünk be, amennyi még mind ON állapotban sem haladja meg a csatorna kapacitását.

Ennek hátránya, hogy könnyen eredményezhet alacsony kihasználtságot (főleg, ha az ON periódusok hossza rövidebb az OFF-hoz képest).

Kevésbé konzervatív CAC esetén több forgalmat is beengedhetünk a csatornára, viszont ilyenkor előfordulhat az is, hogy egy forgalmat OFF→ON átmenet esetén kell eldobni.

Általában a követelmények olyanok, hogy az OFF→ON átmenetkor történő dobás jóval kisebb valószínűségű kell legyen, mint az érkezéskor történő dobás.

Adaptív forgalmak

Adaptív forgalmak esetén egy i -edik osztálybeli forgalom sávszélessége $c_{\min}^{(i)}$ és $c_{\max}^{(i)}$ között kell legyen.

A forgalmak érkezési és távozási rátái függetlenek attól, hogy a megadott sávon belül mennyi sávszélességet kapnak.

Amíg $\sum_{i=1}^I n_i c_{\max}^{(i)} \leq C$, nincs ütközés, és minden forgalom a maximális sávszélességet kapja.

Ha $\sum_{i=1}^I n_i c_{\max}^{(i)} > C$, akkor, ha valamely i -re van olyan i -edik osztályú forgalom, amelyik $c < c_{\max}^{(i)}$ sávszélességet kap, akkor minden más forgalom is legfeljebb c sávszélességet kap.

Ilyenkor a megvalósuló c érték a

$$\sum_{i=1}^I n_i \min(c_{\max}^{(i)}, c) = C$$

egyenlet megoldása.

Adaptív forgalmak

Ha egy forgalom érkezése eredményeképpen a c érték valamelyik bentlévő forgalom minimum igénye alá csökkenne, akkor a bejövő forgalmat eldobjuk érkezéskor.

A bentlévő forgalmak sávszélessége dinamikusan változhat, ahogy forgalmak érkeznek és távoznak.

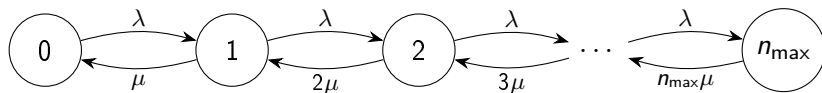
Az adaptív forgalmak előnye, hogy jellemzően a maximálisnál jóval kevesebb forgalommal is teljesen kihasználható a csatorna kapacitás.

Az aktív forgalmak osztályonkénti darabszámait tartalmazó vektor ilyenkor is egy Markov-lánc. Egy konkrét állapotban megvalósuló pillanatnyi sávszélesség-kiosztás kiszámítható a c -re vonatkozó egyenlet megoldásával.

Adaptív forgalmak

Speciális eset. Ha csak egyetlen adaptív osztály van a csatornán, akkor az aktív forgalmak maximális darabszáma $n_{\max} = \lfloor C/c_{\min} \rfloor$.

Az aktív forgalmak n darabszáma születési-halálozási folyamat λ születési és μ halálozási rátával:



Ilyenkor

$$v_{\text{st}}(n) = \frac{\prod_{k=1}^n \lambda / (k\mu)}{\sum_{n=0}^{n_{\max}} \prod_{k=1}^n \lambda / (k\mu)} \quad n = 0, \dots, n_{\max}.$$

Adaptív forgalmak

v_{st} -ből bizonyos teljesítményjellemzők is kiszámíthatóak.

Az eldobási valószínűség érkezéskor $v_{\text{st}}(n_{\text{max}})$.

A csatornában az átlagos teljes sávszélesség

$$\sum_{n=0}^{n_{\text{max}}} v_{\text{st}}(n) \min(C, nc_{\text{max}}).$$

Egy forgalom átlagos sávszélessége

$$\bar{c} = \frac{\sum_{n=0}^{n_{\text{max}}} v_{\text{st}}(n) \min(C, nc_{\text{max}})}{\sum_{n=0}^{n_{\text{max}}} n v_{\text{st}}(n)}.$$

Elasztikus forgalmak

Elasztikus forgalmak esetén egy i -edik osztálybeli forgalom sávszélessége $c_{\min}^{(i)}$ és $c_{\max}^{(i)}$ között kell legyen.

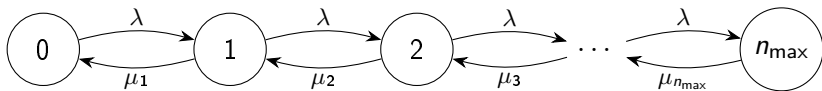
A forgalmak érkezési rátája fix, de a távozási rátája nem; ha egy $\text{EXP}(1/\delta)$ (azaz átlagosan δ) méretű forgalom c pillanatnyi sávszélességet kap, akkor a távozási rátája c/δ .

A pillanatnyi sávszélesség-kiosztás és a beengedési protokoll egyébként megegyezik az adaptív forgalmakra vizsgálttal.

Elasztikus forgalmak

Speciális eset. Ha csak egyetlen elasztikus forgalmi osztály van a csatornán, akkor az aktív forgalmak maximális darabszáma $n_{\max} = \lfloor C/c_{\min} \rfloor$.

Az aktív forgalmak n darabszáma születési-halálozási folyamat λ születési és állapotfüggő halálozási rátával:



$$\mu_n = \min(C, n c_{\max})/\delta.$$

A rendszerben lévő igények számának stacionárius eloszlása

$$v_{\text{st}}(n) = \frac{\prod_{k=1}^n (\lambda/\mu_k)}{\sum_{n=0}^{n_{\max}} \prod_{k=1}^n (\lambda/\mu_k)}.$$

Elasztikus forgalmak

v_{st} -ből bizonyos teljesítményjellemzők is kiszámíthatóak.

Az eldobási valószínűség érkezéskor $v_{\text{st}}(n_{\text{max}})$.

A csatornában az átlagos teljes sávszélesség

$$\sum_{n=0}^{n_{\text{max}}} v_{\text{st}}(n) \min(C, n c_{\text{max}}).$$

Egy forgalom átlagos sávszélessége viszont eltér az adaptív esettől, és nincs rá egyszerű explicit formula.