

Hálózatok II

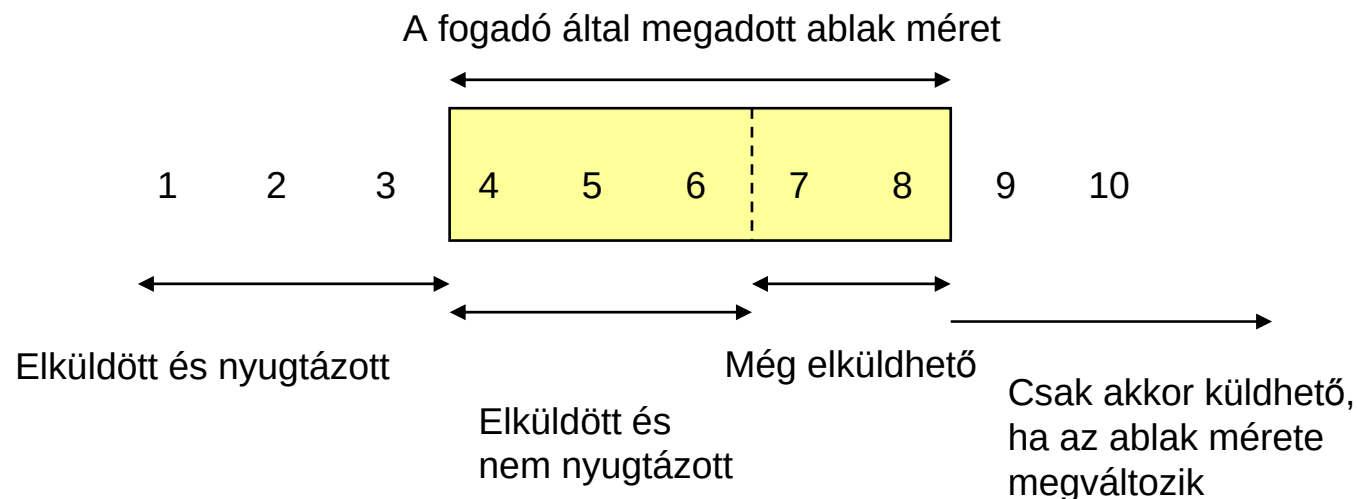
2007

8. Szállítói réteg – TCP

Tahoe, Reno, AIMD, hatékonyság, fairness

Csúszó Ablakok (sliding windows)

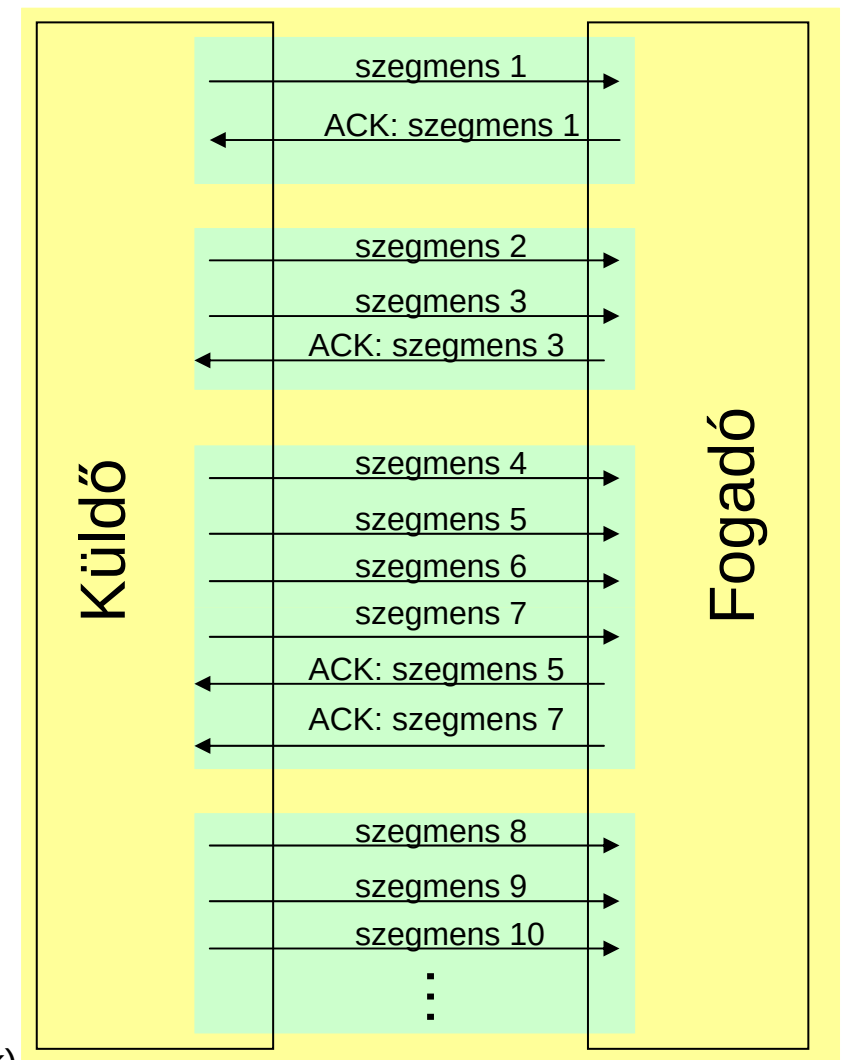
- Adatátráta szabályozása ablak segítségével
 - A fogadó meghatározza az ablak méretet (wnd) az ACK-szegmensek TCP-fejlécében
 - Ha a fogadó fogadási puffere tele van, akkor $wnd=0$ -t küld
 - Máskülönben a fogadó $wnd>0$ -t küld
- A küldőnek be kell tartani:
 - Az elküldött nem nyugtázott szegmensek száma $\leq$ ablak mérete



Lassú Start (slow start)

- A küldőnek nem szabad a fogadó által felajánlott ablakméretet azonnal kihasználni
- Második ablak: Congestion-ablak (cwnd: congestion window)
 - A küldő választja (FSK)
 - Az ablak amiben küld: $\min\{wnd, cwnd\}$
 - Kezdetben:
$$cwnd \leftarrow MSS$$
 - Minden csomagnál a megkapott nyugta után nő
$$cwnd \leftarrow cwnd + MSS$$
(azaz megduplázódik minden RTT után)
 - Addig, amíg egyszer egy nyugta kimarad

Slow start = exponenciális növekedés
(hisztórikus elnevezés: korábban még agresszívebb sémák)



Torlódás elkerülés (congestion avoidance) TCP Tahoe

- Jacobson 88:
 - Paraméter: cwnd és ssthresh (= slow-start-küszöb, slow start threshold)

1. Kapcsolatfelépítés:

$$cwnd \leftarrow MSS \quad ssthresh \leftarrow 65535$$

2. Csomagvesztésnél, azaz nyugta ideje > RTO: **multiplicatively decreasing**

$$cwnd \leftarrow MSS \quad ssthresh \leftarrow \max \left\{ 2 \text{ MSS}, \frac{\min\{cwnd, wnd\}}{2} \right\}$$

3. Nyugta jön a szegmenshez és $cwnd \leq ssthresh$: **slow start**

$$cwnd \leftarrow cwnd + MSS$$

4. Nyugta jön a szegmenshez és $cwnd > ssthresh$: **additively increasing**

$$cwnd \leftarrow cwnd + MSS \frac{MSS}{cwnd}$$

TCP Tahoe

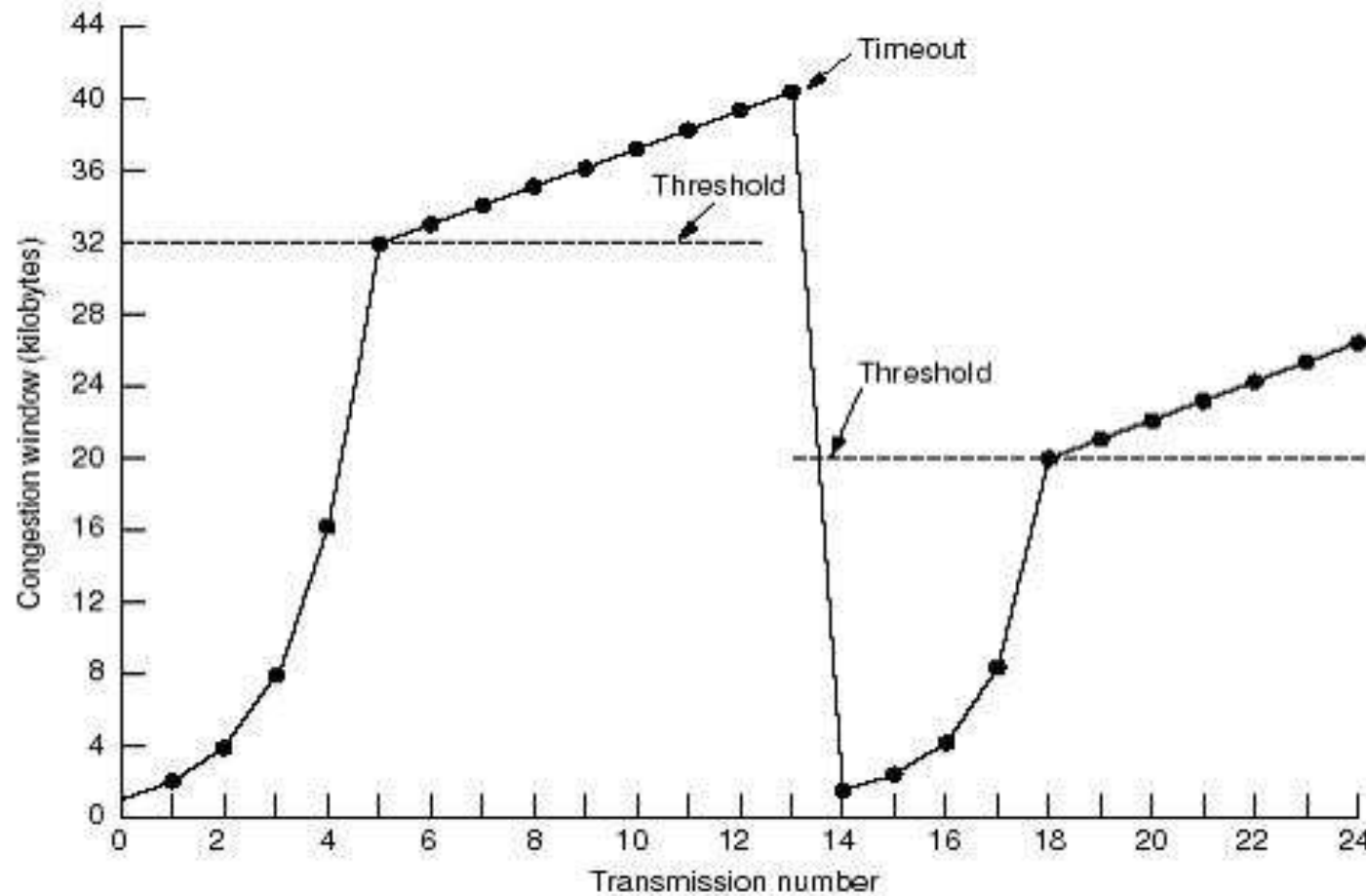


Fig3

pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 3rd edition*

Fast Retransmit és Fast Recovery

- TCP Tahoe [Jacobson 1988]:
 - Ha csak egy csomag veszik el, akkor
 - a csomagot + a fennmaradó ablakot újraküldi
 - és egyidejűleg slow start
 - Fast retransmit
 - ha ugyanazon csomaghoz 3 nyugta-duplikátum (azaz 4 azonos nyugta) érkezik (triple duplicate ACK),
 - újraküldi az elvesztet csomagot, egyidejűleg slow start
- TCP Reno [Stevens 1994]
 - Fast retransmit után:
 - $ssthresh \leftarrow \max(\min(wnd, cwnd)/2, 2 \text{ MSS})$
 - $cwnd \leftarrow ssthresh + 3 \text{ MSS}$
 - Fast recovery a fast retransmit után
 - Minden további nyugta-duplikátum után növeli a
 - $cwnd \leftarrow cwnd + \text{MSS}$
 - Congestion avoidance: amikor új adat nyugtája megérkezik (ujraküldés ACK-ja) :
 - $cwnd \leftarrow ssthresh$

Torlódás elkerülési elv: AIMD

- A TCP a „fast recovery” mechanizmussal lényegében a következőképp viselkedik:

x : csomagok száma per RTT

- Kapcsolatfelépítés:

$$x \leftarrow 1$$

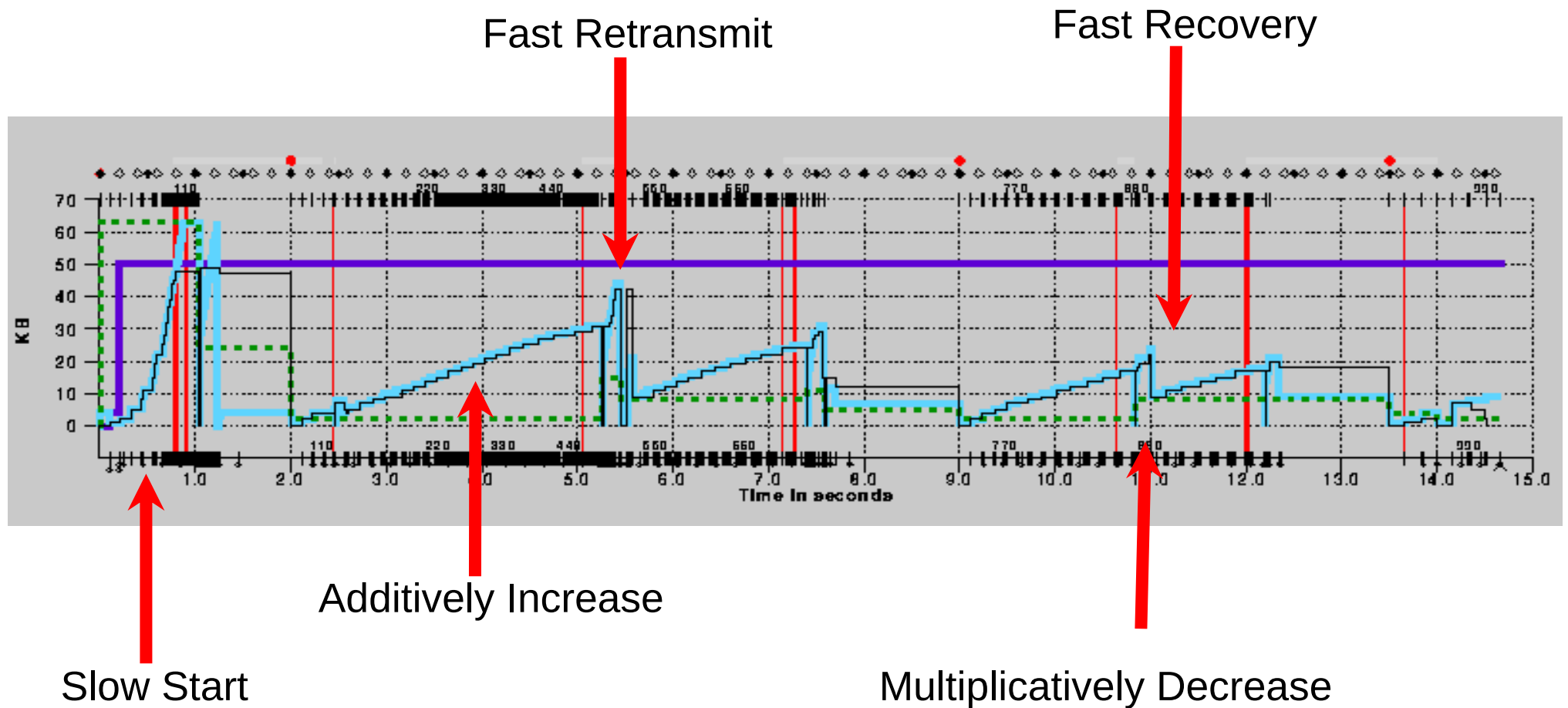
- Csomagvesztésnél, MD: multiplicative decreasing

$$x \leftarrow x/2$$

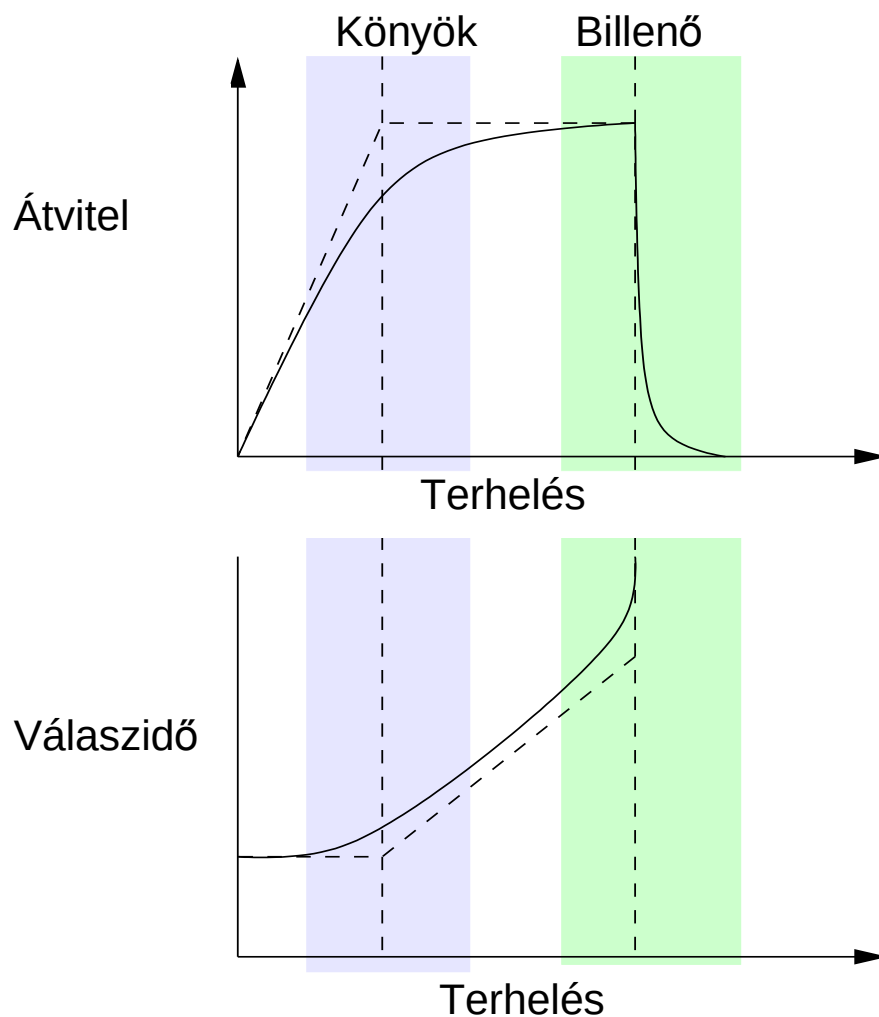
- Nyugtázott szegmenseknél, AD: additive increasing

$$x \leftarrow x + 1$$

Példa: TCP Reno „in akción”



Additive Increase Multiplicative Decrease (AIMD): Fairness és Hatékonyság



A hálózati terhelés az átvitelrel és a válaszióval kölcsönösen hat egymásra.

- Az átvitel maximális, ha a terhelés a hálózat kapacitását majdnem eléri.
- Ha a terhelés tovább nő, túlszordulnak a pufferek, csomagok vesznek el, újra kell küldeni, drasztikusan nő a válaszió. Ezt a toródást **congestion**-nak nevezzük.
- Ezért a maximális terhelés helyett, ajánlatos a hálózat terhelését a könyök közelében beállítani. Itt a válaszió csak lassan emelkedik, míg az adatátvitel már a maximum közelében van.
- Egy jó torlódáselkerülési (*congestion avoidance*) stratégia a hálózat terhelését a könyök közelében tartja: **hatékonyság**. Emellett fontos, hogy minden résztvevőt egyforma rátával szolgáljunk ki: **fairness**.

AIMD Fairness és Hatékonyság – A Modell

- n résztvevő, forduló-modell
- résztvevő i adatrátája a t -edik fordulóban $x_i(t)$
- Kezdeti adatráták: $x_1(0), \dots, x_n(0)$
- A visszacsatolás (feedback) forduló t után: $y(t) = 0$, ha $\sum_{i=1}^n x_i(t) \leq K$
 $y(t) = 1$, ha $\sum_{i=1}^n x_i(t) > K$
- Minden résztvevő aktualizálja az adatrátáját a $t+1$ -edik fordulóban:
$$x_i(t+1) = f(x_i(t), y(t))$$
 - Increase-stratégia $f_0(x) = f(x, 0)$
 - Decrease-stratégia $f_1(x) = f(x, 1)$
- Tekintsük a következő lineáris függvényeket :

$$f_0(x) = a_I + b_I x, \quad f_1(x) = a_D + b_D x$$

AIMD Fairness és Hatékonyság– A Modell

- A következő lineáris függvényeket vizsgáljuk:

$$f_0(x) = a_I + b_I x, \quad f_1(x) = a_D + b_D x$$

- Érdekes speciális esetek:

- MIMD: Multiplicative Increase/Multiplicative Decrease

$$f_0(x) = b_I x, \quad f_1(x) = b_D x, \quad \text{ahol} \quad b_I > 1, \quad b_D < 1.$$

- AIAD: Additive Increase/Additive Decrease

$$f_0(x) = a_I + x, \quad f_1(x) = a_D + x, \quad \text{ahol} \quad a_I > 0, \quad a_D < 0.$$

- AIMD: Additive Increase/Multiplicative Decrease

$$f_0(x) = a_I + x, \quad f_1(x) = b_D x, \quad \text{ahol} \quad a_I > 0, \quad b_D < 1.$$

AIMD Fairness és Hatékonyság

- Hatékonyság

- Terhelés: $X(t) := \sum_{i=1}^n x_i(t)$

- Mérték: $|X(t) - K|$

- Fairness: $x=(x_1, \dots, x_n)$ esetén:

$$F(x) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2} .$$

- $1/n \leq F(x) \leq 1$

- $F(x) = 1 \leftrightarrow$ absolut Fairness

- skálázástól független

- Folytonos, differenciálható

- Ha n közül k fair, a többi 0, akkor $F(x) = k/n$

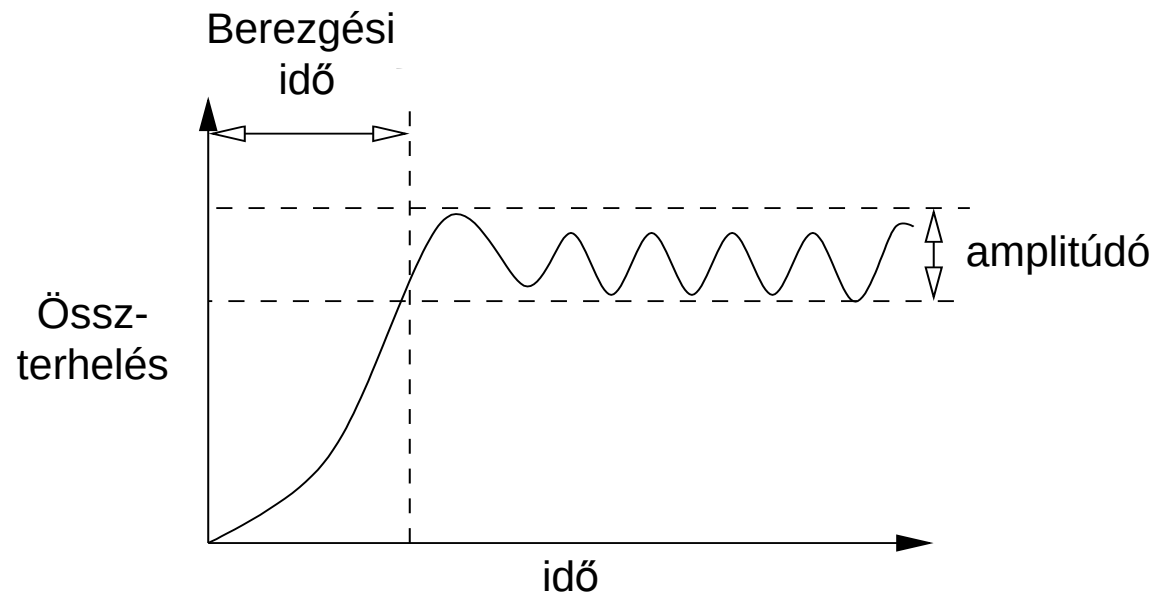
Konvergencia

- Konvergencia nem lehetséges
- Legjobb esetben oszcilláció az optimális érték körül
 - Az oszcilláció amplitúdója A

$$A = \inf_{t_0 \geq 0} \sup_{t \geq t_0} |X(t) - K| .$$

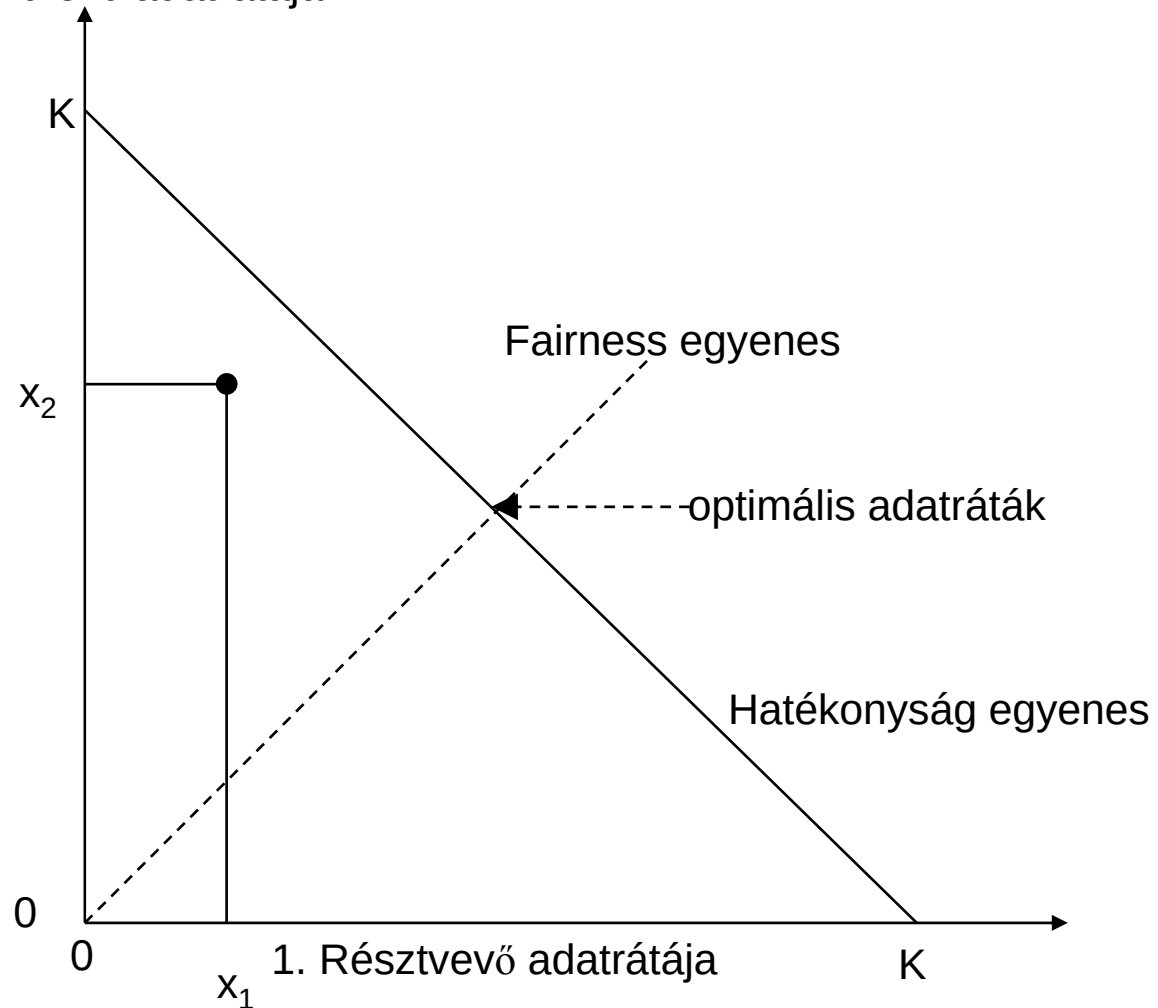
- Berezgési idő T

$$T = \min\{t_0 \mid \forall t \geq t_0 : |X(t) - K| \leq A\} .$$

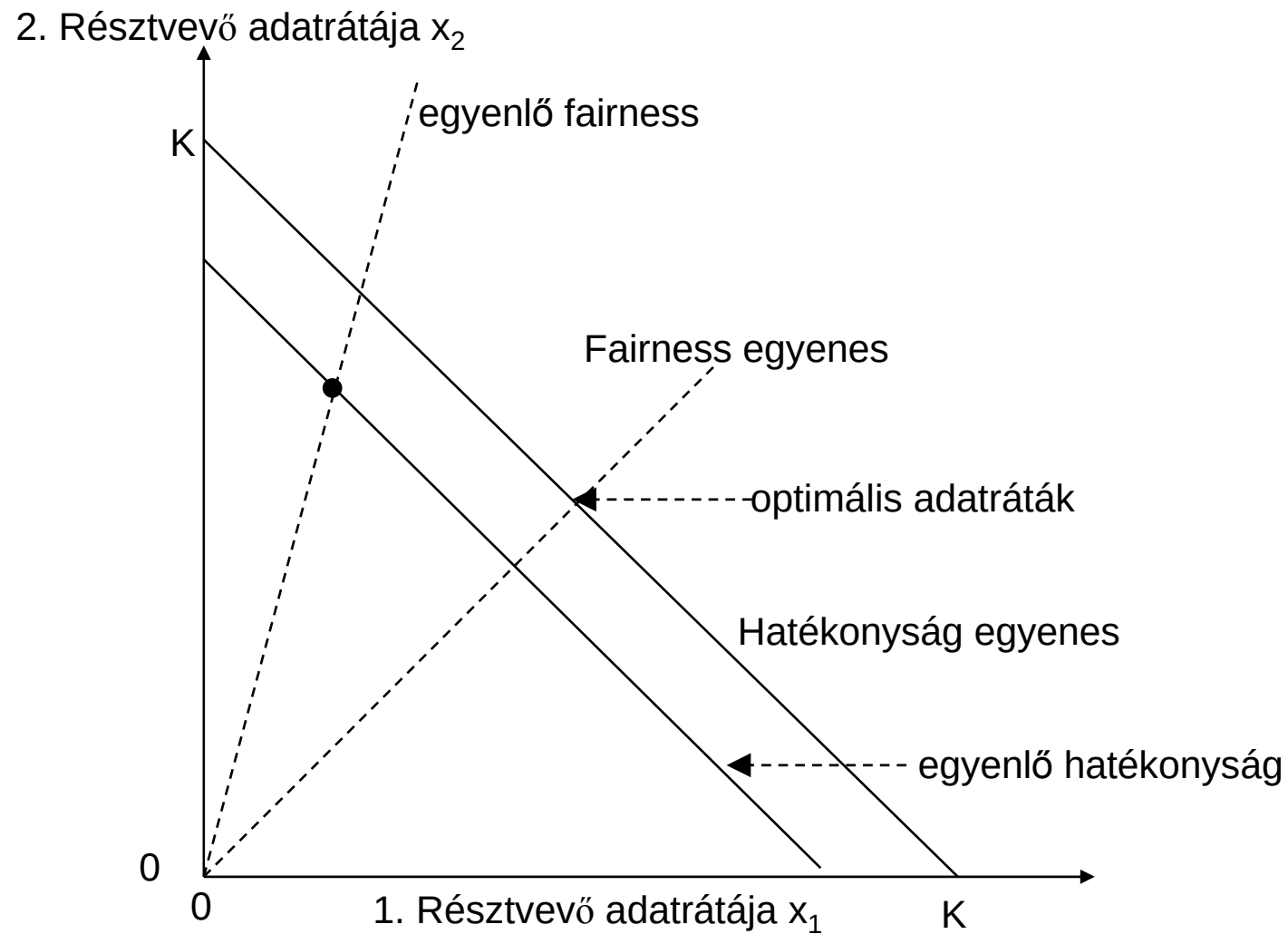


Vektor Ábrázolás (I)

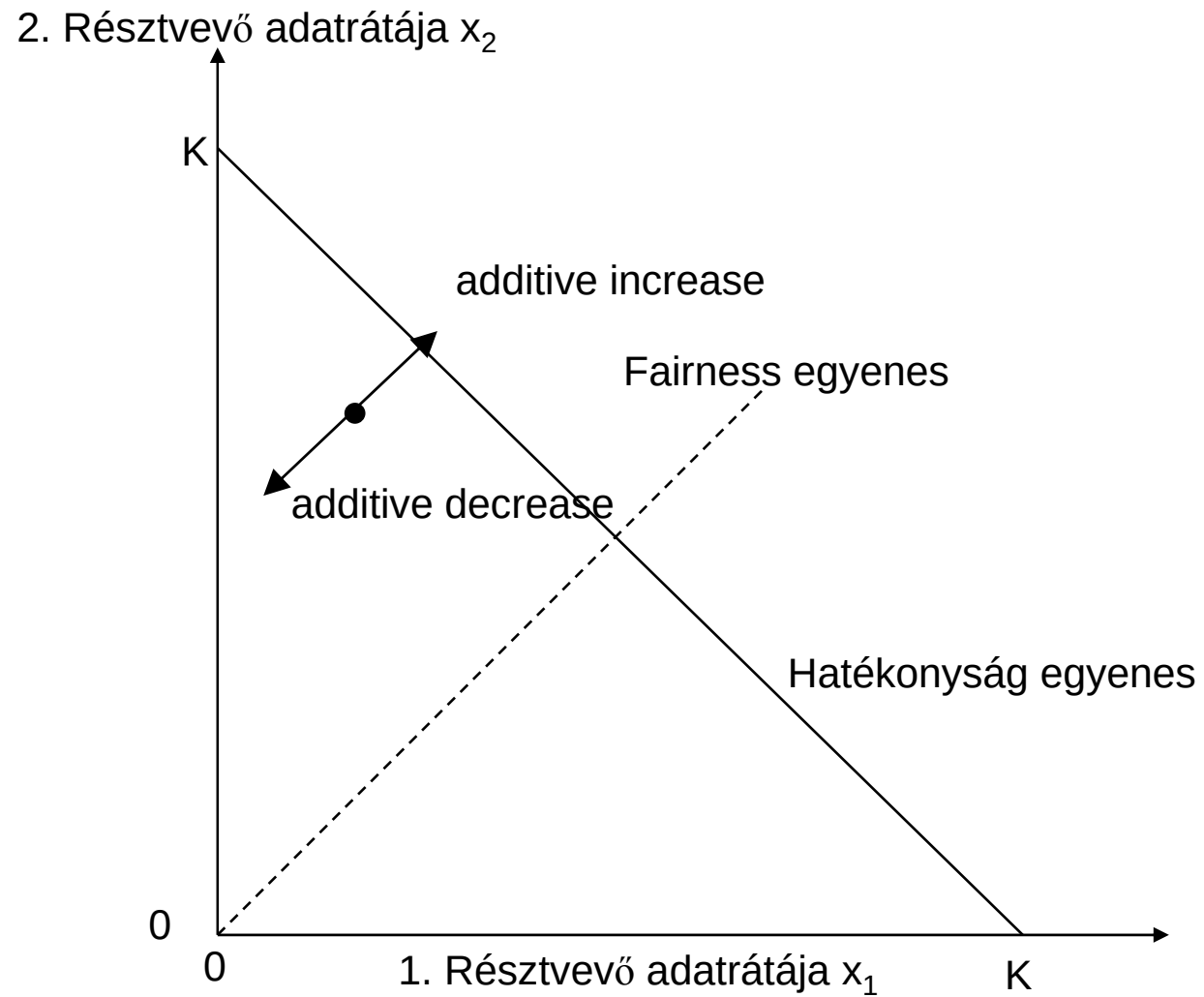
2. Résztevő adatrátája



Vektor Ábrázolás (I)

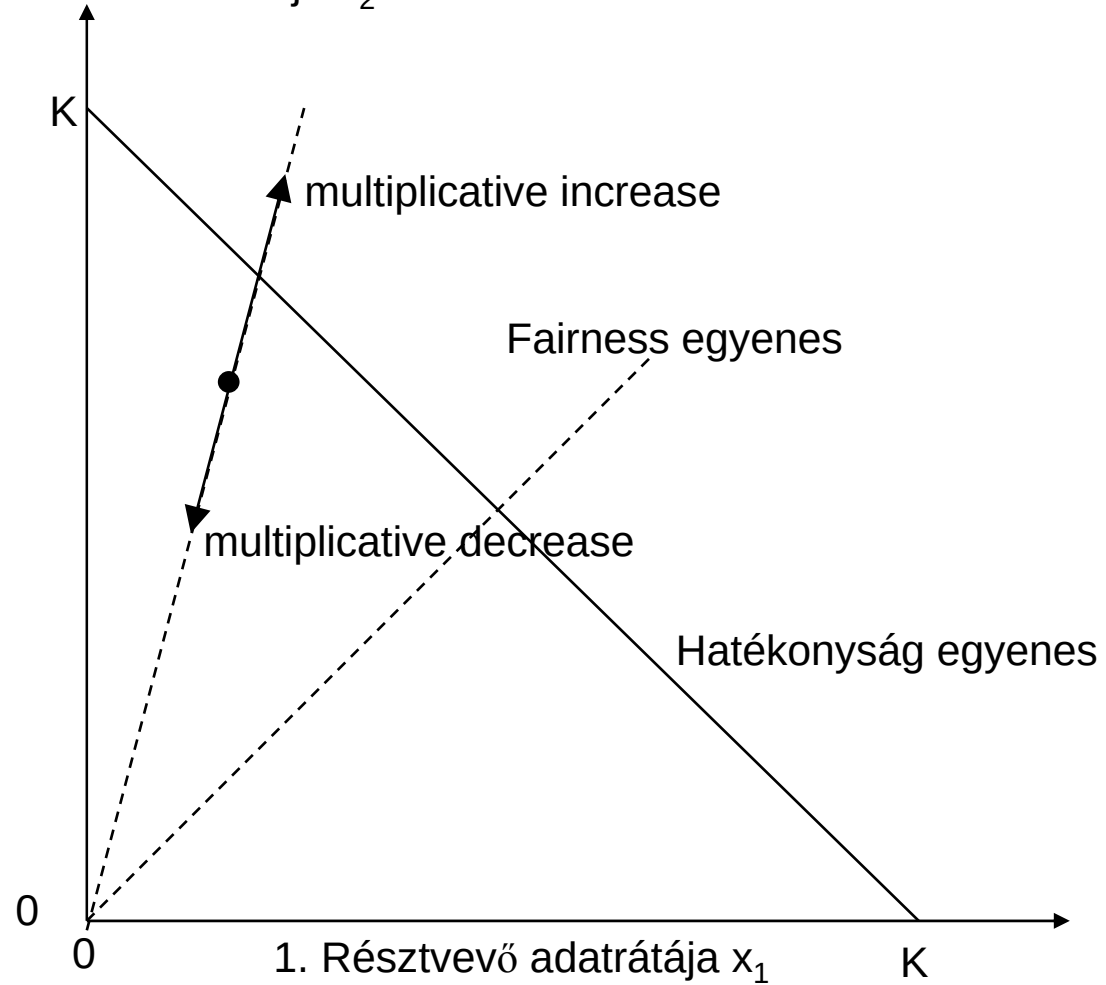


Vektor Ábrázolás (I)

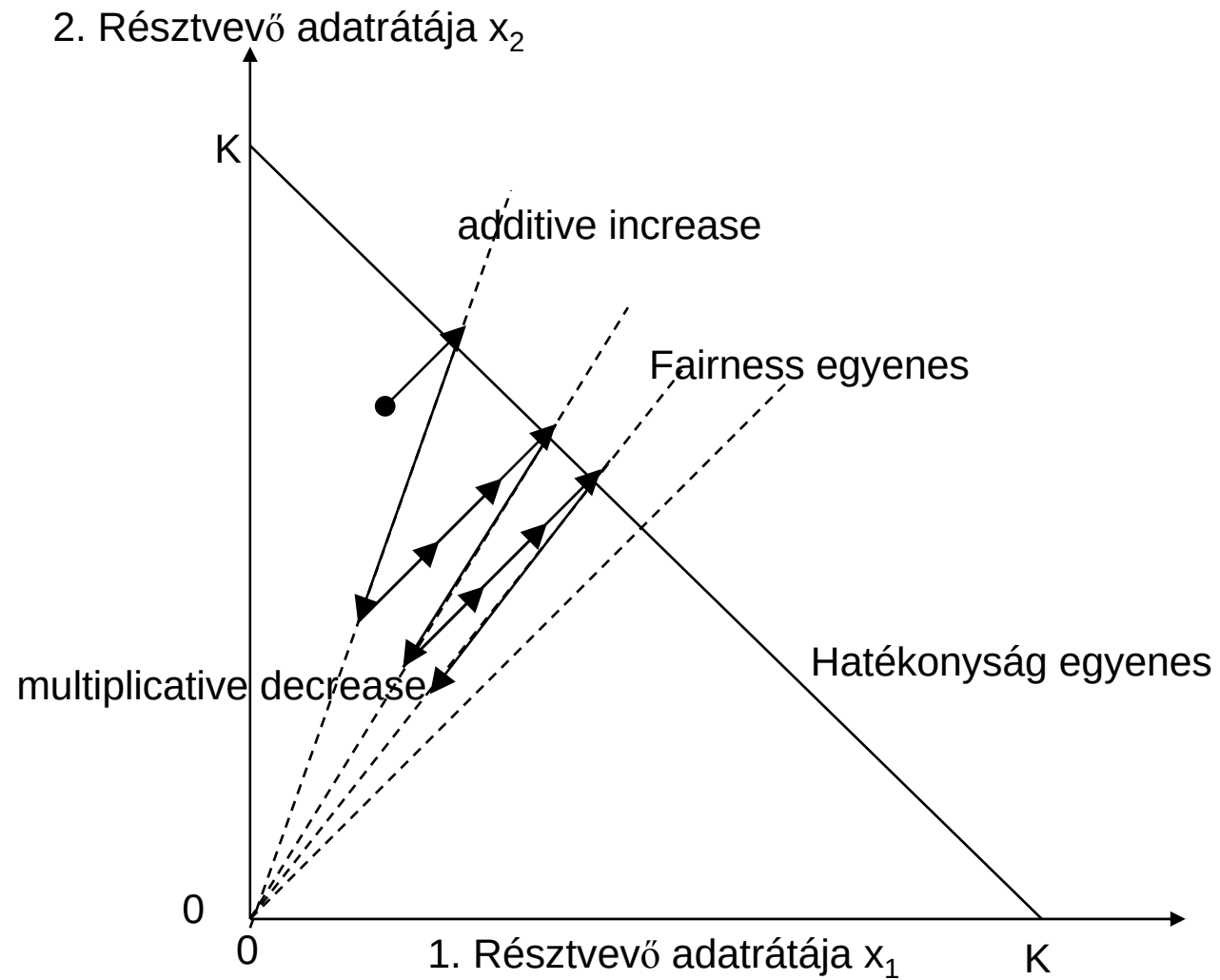


Vektor Ábrázolás (I)

2. Résztevő adatrátája x_2



Vektor Ábrázolás (I)



Hatékony Lineáris Függvények

● $X(t) > K$

$$X(t+1) < X(t) \iff \sum_{i=1}^n x_i(t+1) < \sum_{i=1}^n x_i(t)$$

$$\iff \sum_{i=1}^n a_D + b_D x_i(t) < \sum_{i=1}^n x_i(t)$$

$$\iff na_D + (b_D - 1)X(t) < 0$$

$$\iff b_D < 1 - \frac{na_D}{X(t)}.$$

● $a_D \leq 0 \rightarrow b_D \leq 1$

● $a_D > 0 \rightarrow b_D < 0$

● $X(t) < K$

$$X(t+1) > X(t) \iff \sum_{i=1}^n x_i(t+1) > \sum_{i=1}^n x_i(t)$$

$$\iff \sum_{i=1}^n a_I + b_I x_i(t) > \sum_{i=1}^n x_i(t)$$

$$\iff na_I + (b_I - 1)X(t) > 0$$

$$\iff b_I > 1 - \frac{na_I}{X(t)}.$$

● $a_I \geq 0 \rightarrow b_I \geq 1$

● $a_I < 0 \rightarrow \text{nem lehet}$

Fairness (I)

- Az $x(t) = (x_1(0), \dots, x_n(0))$ fairnesse konvergál 1-hez, azaz

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(x(t)) = 1 .$$

ahol

$$F(x) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2} .$$

- Teljesül $c=a/b$ esetén:

$$F(x(t+1)) = F(x(t)) + (1 - F(x(t))) \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i(t))^2}{\sum_{i=1}^n (c + x_i(t))^2} \right)$$

- Bizonyítás?

Bizonyítás! (1)

- Teljesül:

$$\begin{aligned} F(x(t+1)) &= \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i(t+1)\right)^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i(t+1))^2} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a + bx_i(t)\right)^2}{n \sum_{i=1}^n (a + bx_i(t))^2} \\ &= \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{a}{b} + x_i(t)\right)^2}{n \sum_{i=1}^n \left(\frac{a}{b} + x_i(t)\right)^2} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n c + x_i(t)\right)^2}{n \sum_{i=1}^n (c + x_i(t))^2} \end{aligned}$$

- Behelyettesítve

$$\begin{aligned} X &= \sum_{i=1}^n x_i(t), & Q &= \sum_{i=1}^n (x_i(t))^2, \\ L &= \sum_{i=1}^n (x_i(t) + c), & R &= \sum_{i=1}^n (x_i(t) + c)^2. \end{aligned}$$

- Ekkor:

$$F(x(t)) = \frac{X^2}{nQ} \quad \text{és} \quad F(x(t+1)) = \frac{L^2}{nR}$$

Bizonyítás! (2)

- Meg kell mutatni: $F(x(t+1)) = F(x(t)) + (1 - F(x(t))) \left(1 - \frac{Q}{R}\right)$

$$\iff \frac{L^2}{nR} = \frac{X^2}{nQ} + \left(1 - \frac{X^2}{nQ}\right) \left(1 - \frac{Q}{R}\right)$$

$$\iff QL^2 = RX^2 + (nQ - X^2)(R - Q)$$

$$\iff QL^2 = RX^2 + nQR - nQ^2 - RX^2 + QX^2$$

$$\iff L^2 = nR - nQ + X^2$$

$$\iff L^2 - X^2 = n(R - Q) .$$

- Miért érvényes ez az egyenlőség?

Bizonyítás! (3)

- Miért érvényes ez az egyenlőség?

$$L^2 - X^2 = n(R - Q)$$

ahol

$$X = \sum_{i=1}^n x_i(t), \quad Q = \sum_{i=1}^n (x_i(t))^2,$$
$$L = \sum_{i=1}^n (x_i(t) + c), \quad R = \sum_{i=1}^n (x_i(t) + c)^2.$$

$$n(R - Q) = n \sum_{i=1}^n (x_i(t) + c)^2 - x_i(t)^2 = n \sum_{i=1}^n (2cx_i(t) + c^2) = 2cnX + c^2n^2$$

$$L^2 - X^2 = \sum_{i,j \in [1..n]} (x_i(t) + c)(x_j(t) + c) - x_i(t)x_j(t)$$
$$= \sum_{i,j \in [1..n]} cx_i(t) + cx_j(t) + c^2 = 2cnX + c^2n^2$$

Fairness (II)

- Teljesül, hogy:
$$F(x(t+1)) = F(x(t)) + (1 - F(x(t))) \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i(t))^2}{\sum_{i=1}^n (c + x_i(t))^2} \right)$$
- Azaz a fairness növekszik, ha $c=a/b$ növekszik.
 - $c=0$, akkor $F(x(t+1))= F(x(t))$
 - $c>0$, akkor $F(x(t+1))> F(x(t))$, ha $F(x(t)) \neq 1$
 - $c<0$ ist $F(x(t+1))< F(x(t))$
- Így $a_I/b_I \geq 0$ és $a_D/b_D \geq 0$
 - tehát, $a_I, b_I, a_D, b_D \geq 0$
- A hatékonyságból:
 - $a_D \leq 0 \rightarrow b_D \leq 1$, azt jelenti tehát, hogy $a_D = 0 \rightarrow b_D \leq 1$,
 - $a_D > 0 \rightarrow b_D < 0$ kiesik.
 - $a_I \geq 0 \rightarrow b_I \geq 1$,
 - Teljesülni kell, hogy $a_I > 0$, máskülönben nem növekszik a fairness (lásd MIMD)
- Ez AIMD-hez vezet.

Fairness (III)

- Tétel 1: Ha f_0 és f_1 lineáris függvények, akkor a fairnesshez és a hatékonysághoz $x \geq 0$ esetén teljesülni kell, hogy:

$$\begin{aligned} f_0(x) &\geq x + a_I, & \text{ahol } a_I > 0 \text{ és} \\ f_1(x) &= b_D x, & \text{ahol } 0 < b_D < 1. \end{aligned}$$

TCP Adatráta

- AIMD próbáló stratégia ℓ csomagvesztés-rátát okoz
- ℓ = elvesztett szegmensek / küldött szegmensek
- Közepes adatráta B = byte/sec. és a hibaráta ℓ kölcsönösen kihatnak egymásra:
 - Az adatráta növelése növeli a vesztesráát
 - Magasabb vesztesráta csökkenti az adatrátát
- Kísérletek mutatják, hogyha a szegmenshossz MSS és a „round trip time“ RTT :

$$B = 1,3 \frac{MSS}{RTT\sqrt{\ell}}$$

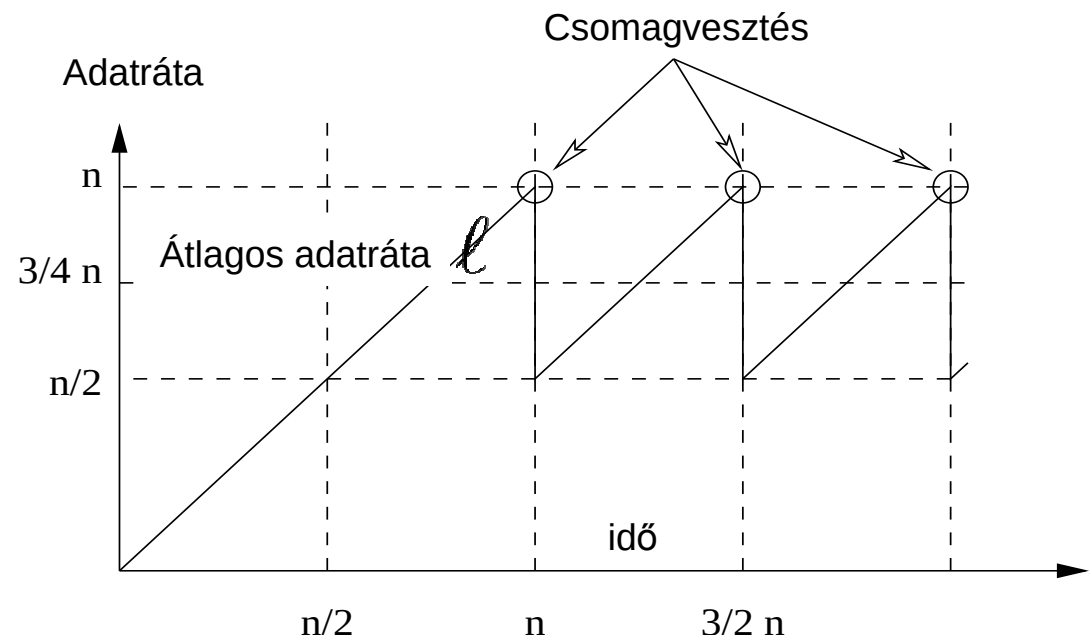
TCP-Adatráta – A Statikus Eset

- n : rendelkezésre álló sávszélesség
- Átlagos adatráta:
 $B = 3/4 n$
- $n/2$ forduló után a vesztes: 1
- Így

$$\ell = \frac{1}{\frac{3}{4}n \cdot \frac{1}{2}n} = \frac{8}{3} \frac{1}{n^2}$$

- tehát $n = \sqrt{\frac{8}{3\ell}}$

$$B(\ell) = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{8}{3\ell}} \frac{\text{MSS}}{\text{RTT}} = 1,22 \dots \cdot \frac{\text{MSS}}{\text{RTT} \sqrt{\ell}}$$



TCP-Adatráta – Egy Sztochasztikus Modell

- Egy csomag p valószínűséggel veszik el
- A hiba nélkül átvitt csomagok száma X exponenciális eloszlású:

$$P[X = i] = p(1 - p)^i$$

- A hiba nélkül küldött csomagok mennyiségének várható értéke : $O(1/p)$
 - A fordulók száma az adatráta felezéséig: $O(1/p^{1/2})$
 - Várható adatráta: $O(1/p^{1/2})$
 - De: Mi a konstans faktor?
- Kisérletileg: (rokon modellre bizonyított):

$$B(p) = 1, 3 \dots \cdot \frac{MSS}{RTT \sqrt{p}}$$

Irodalom

- Van Jacobson: Congestion Avoidance and Control. In: *ACM SIGCOMM*, 314-329, 1988.
- Dah-Ming Chiu, Raj Jain: Analysis of the Increase and Decrease Algorithms for Congestion Avoidance in Computer Networks. *Computer Networks and ISDN Systems*, Vol.: 17, 1-14, 1989.