PDV 09 2017/2018

Čas a kauzalita v DS

Michal Jakob
michal.jakob@fel.cvut.cz
Centrum umělé inteligence, katedra počítačů, FEL ČVUT

Příklad: Letecký rezervační systém

1. Server A obdrží klientský požadavek na koupi poslední letenky na let ABC123
2. Server A opatří nákup časovou značkou lokálních hodin: 9h:15h:32.45s, zaznamená do logu a odpoví klientovi.
3. Toto bylo poslední volné místo. Server A pošle serveru B zprávu „Let ABC123 je plný“.
4. Server B si do svého logu uloží „Let ABC123 je plný“ s časovou značkou podle jeho lokálních hodin 9h:10m:10.11s.
5. Server C se dotáže logů serverů A a B. Je zmaten, že klient si na serveru A koupil letenku až poté, co se let stal plný na serveru B. **To může vést k nekorektním akcím na serveru C.**

Jak se podobný situacím vyhnout? Tj. jak korektně uspořádávat události v distribuovaném proces?

Model

Uvažujeme **asynchronní** DS sestávající z **procesů**.

Každý proces má **stav** (hodnoty **proměnných**).

Každý proces vykonává **akce**, aby změnil svůj stav. Akce může být **instrukce** nebo **komunikační** akt (**send**, **receive**).

Událost je výskyt akce.

Každý proces má **lokální hodiny.**

Události v rámci procesu mohou mít přiřazeny **časové značky** (timestamps), a mohou tak být linerárně **seřazeny**.

- ale my potřebujeme řadit globálně v celém DS.

Fyzické hodiny

Mimoběžnost vs. Drift

Mimoběžnost hodin (clock skew)	**Drift** hodin (clock drift)
Rozdíl **v času** hodin dvou procesů. (jako vzdálenost dvou jedoucích automobilů) Mají-li dvoje hodiny nenulovou mimoběžnost, jsou **nesynchronizované**.	Rozdíl **v rychlosti** (frekvenci) hodin dvou procesů. (jako rozdíl v rychlosti jedoucích automobilů)

Mají-li dvoje hodiny nenulový drift, tak se jejich mimoběžnost v čase bude (nakonec) zvyšovat

- jsou-li popředu pomalejší hodiny, tak nejdříve dojde k vyrovnání času

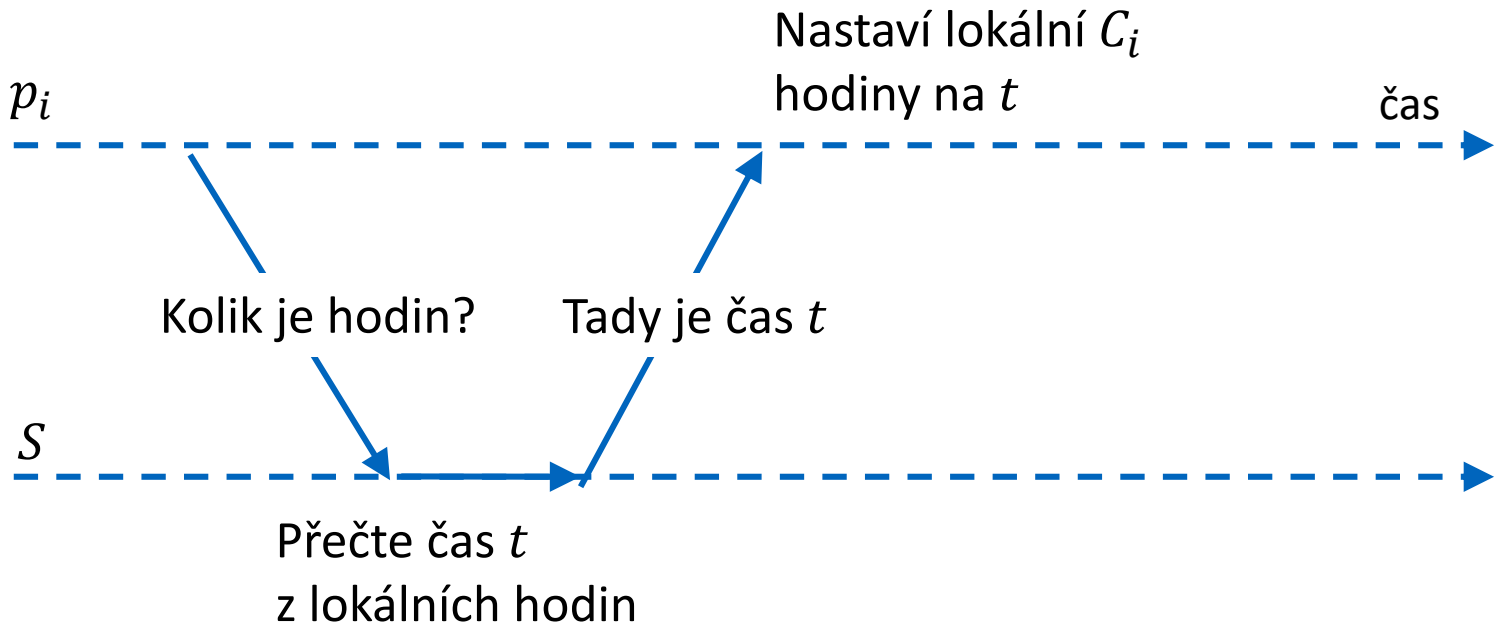
Synchronizace

Uvažujeme skupinu procesů

Externí synchronizace	**Interní** synchronizace
▪ Čas C_i hodin každého procesu p_i je udržován v rozmezí δ od času S externích **referenčních hodin**, tj. v každém okamžiku $\lvert C_i - S \rvert \leq \delta$ ▪ Externí hodiny mohou být napojeny na UTC nebo na atomové hodiny ▪ Algoritmy: např. Cristianův, NTP	▪ Každý pár procesů (p_i, p_j) má hodnoty času svých hodin v rozmezí δ, v každém okamžiku tj. $\lvert C_i - C_j \rvert \leq \delta$ ▪ Algoritmy: např. Berkeley
Externí synchronizace s rozmezím δ **implikuje** interní synchronizaci s rozmezím $2 * \delta$.	Interní synchronizace **neimplikuje** externí synchronizaci.

Synchronizace fyzických hodin

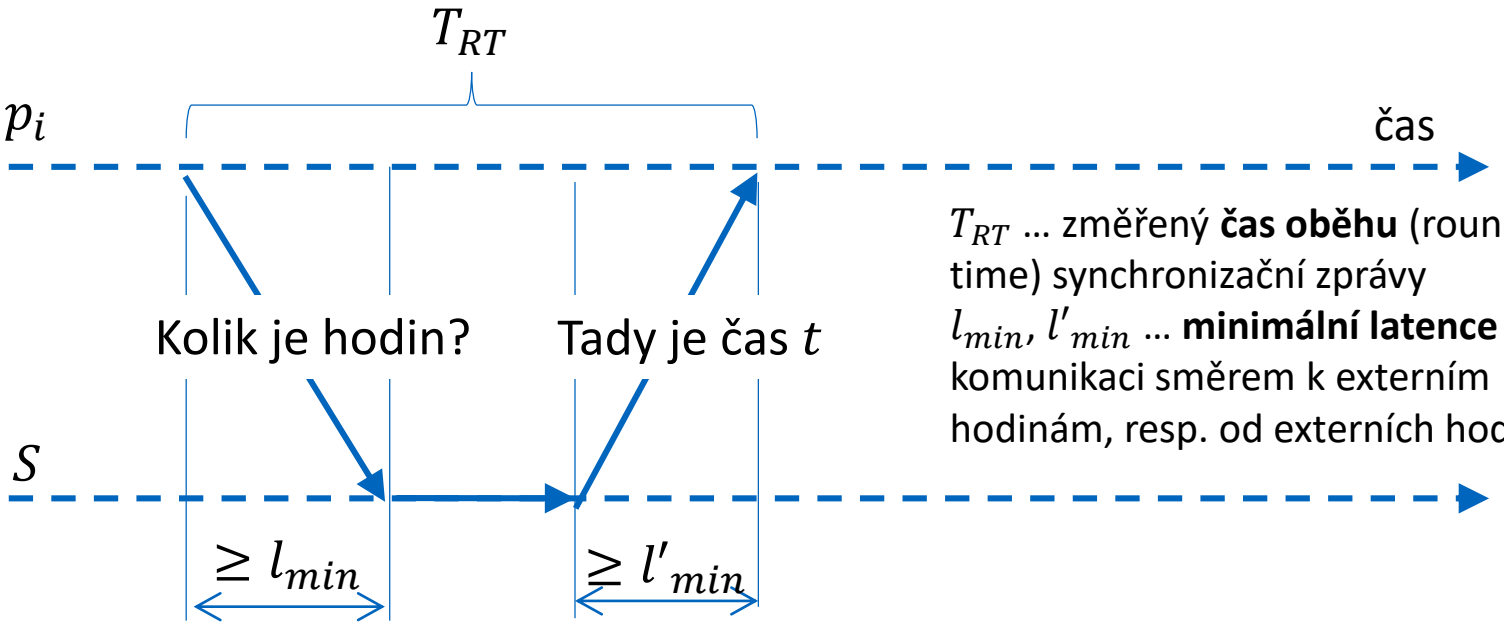
Externí synchronizace: všechny procesy p_i se synchronizují s externím časovým serverem S.



Co je špatně?

- V okamžiku, kdy p_i obdrží odpověď, se už **čas posunul**.
- Míra nepřesnosti C_i závisí na komunikační **latenci**.
- V asynchronním systému je latence **konečná**, ale **neomezená** ⇒ neomezená je i **nepřesnost** hodin.

Cristianův Algoritmus



T_{RT} … změřený **čas oběhu** (round trip time) synchronizační zprávy
l_{min}, l'_{min} … **minimální latence** při komunikaci směrem k externím hodinám, resp. od externích hodin

Skutečný čas v okamžiku, kdy p_i přijme odpověď je
$[t + l'_{min}, t + T_{RT} - l_{min}]$

Cristianův algoritmus:

$$C_i := t + \frac{T_{RT} - l_{min} + l'_{min}}{2}$$

Chyba je **omezena**, tj. maximálně
$(T_{RT} - l_{min} + l'_{min})/2$

(Je-li chyba měření příliš vysoká, je možné poslat více zpráv a výsledek průměrovat.)

Pozor

Lokální čas je možné posunout libovolně **dopředu**…

…ale **nikoliv dozadu**!

- posun dozadu by mohl narušit lokální uspořádání událostí v procesu

Je možné zvýšit nebo snížit **rychlost** hodin

Jak často synchronizovat?

Maximální míra driftu (maximum drift rate MDR) hodin

Absolutní $\boldsymbol{MDR}$ je definováno relativně vůči UTC (universal coordinated time). UTC je **správný (přesný)** čas v každém okamžiku.

Vzájemná maximální míra driftu mezi dvěma procesy se stejnou absolutní MDR je $2 * MDR$.

Je-li maximální **tolerovaná mimoběžnost** mezi jakýkoliv párem hodin je M, pak je třeba hodiny synchronizovat aspoň každých $\boldsymbol{M/(2 * MDR)}$ časových jednotek.

Network Time Protocol

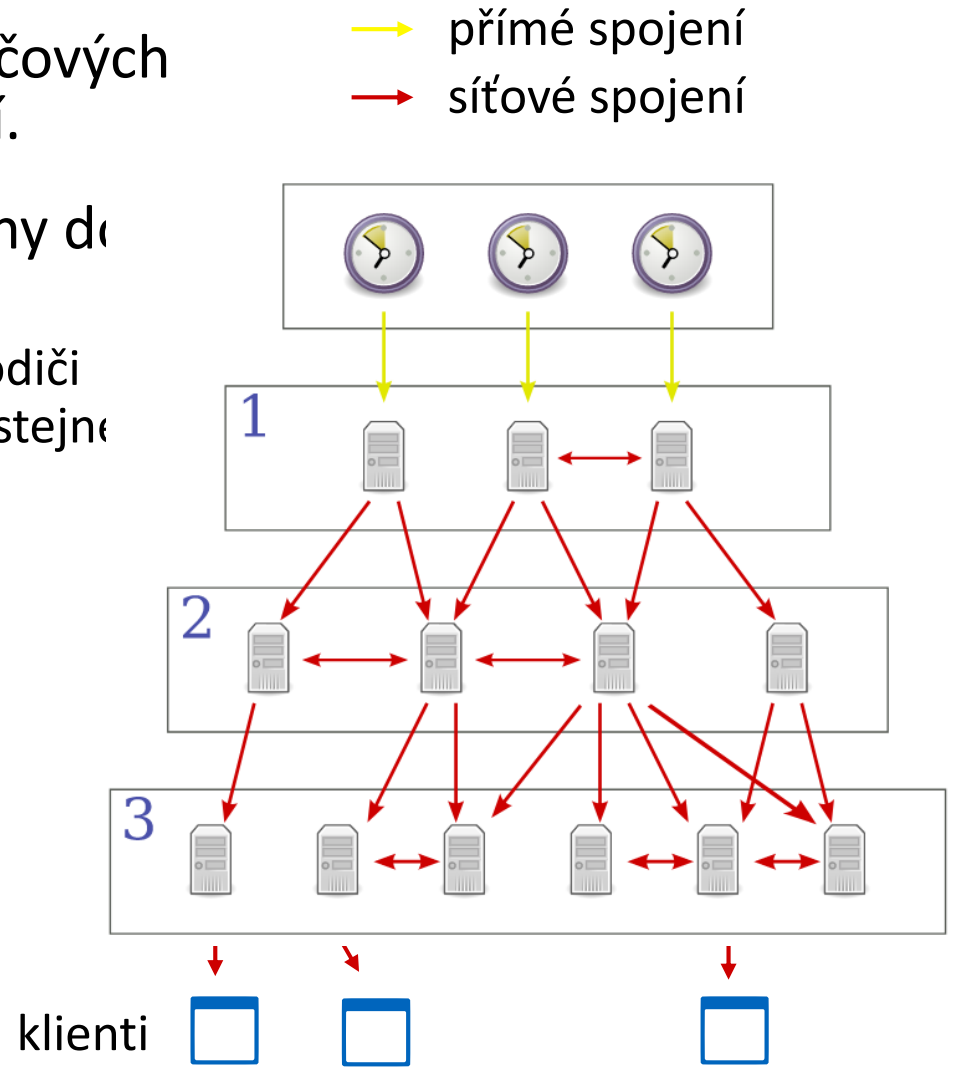
Využíván od roku 1985 pro synchronizaci času v počítačových sítích s proměnlivou latencí.

NTP servery jsou uspořádány d stromu

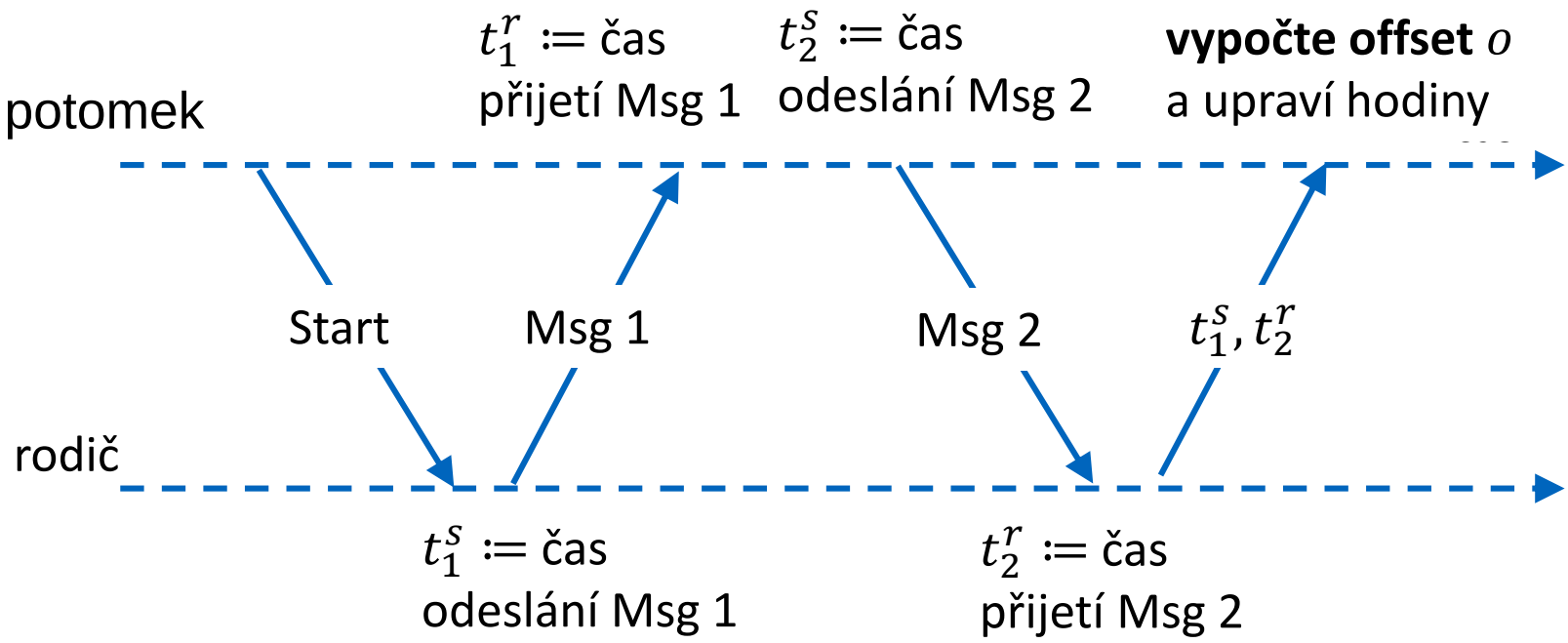
- uzly synchronizují se svými rodiči a někdy i dalšími servery na stejn úrovni
- klienti tvoří listy stromu

Dosažitelná přesnost:

- internet: desítky ms
- LAN: 1 ms



Základ protokolu



Potomek spočítá **offset** mezi svým časem a časem rodiče:

$$o = \frac{(t_1^r - t_2^r + t_2^s - t_1^s)}{2}$$

Odvození

Proč $o = \frac{(t_1^r - t_2^r + t_2^s - t_1^s)}{2}$?

Předpokládejme skutečný offset je o_{real}, tj. čas potomka je popředu o o_{real} a čas rodiče je pozadu o o_{real}.

Předpokládejme, že latence pro zprávu 1 je l_1 a pro zprávu 2 je l_2.

- hodnoty l_1 a l_2 nejsou známé

Pak platí

- $t_1^r = t_1^s + l_1 + o_{real}$
- $t_2^r = t_2^s + l_2 - o_{real}$

$$o_{real} = \frac{(t_1^r - t_2^r + t_2^s - t_1^s)}{2} + \frac{l_2 - l_1}{2}$$

$$o_{real} = o + \frac{(l_2 - l_1)}{2}$$

l_1 a l_2 jsou nezáporné

$$|o - o_{real}| \leq \frac{l_2 + l_1}{2}$$

tj. chyba je omezená **časem oběhu zprávy**

Nicméně

Stále **nenulová** chyba synchronizace.

Dokud bude **latence nenulová a neznámá**, chyby se nezbavíme!

Lze problém uspořádání událostí vyřešit **bez potřeby synchronizovat** fyzické hodiny?

Logické hodiny

Uspořádání událostí v DS

Synchronizace hodin je jeden z přístupů k uspořádání událostí v DS. Vzhledem k omezené přesnosti synchronizace lze ale použít jen uspořádání událostí, mezi kterými uplyne **dostatečné množství času**.

Alternativní přístup: Co kdybychom místo absolutního/fyzického času přiřazovali událostem **logické časové značky**?

- Pokud by přiřazení logických značek respektovalo **kauzální vztah** mezi událostmi, tak by fungovalo.

Kauzální závislost

Definice (Relace → *stalo se před*)

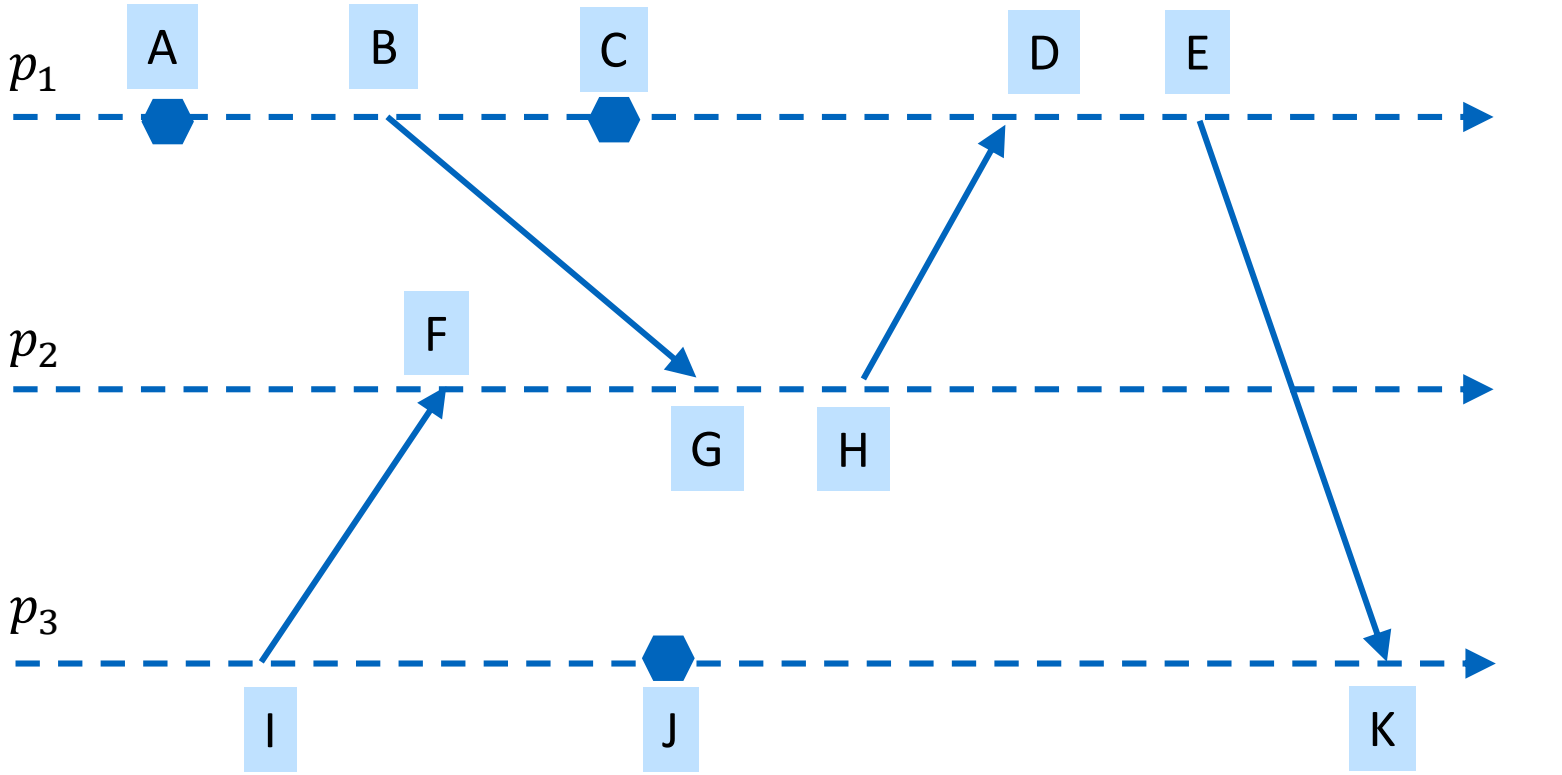
- Jsou-li e_1 a e_2 události ve stejném procesu p a pokud e_1 předchází e_2, pak $e_1 \rightarrow e_2$.
- Je-li e_1 odeslání zprávy a e_2 je příjetí této zprávy, pak $e_1 \rightarrow e_2$.
- Pokud $e_1 \rightarrow e_2$ a $e_2 \rightarrow e_3$, pak $e_1 \rightarrow e_3$

Kauzální závislost/nezávisost

Relace *stalo se před* zavádí **částečné uspořádání událostí** → potenciální **kauzální závislost**

- $e_1 \rightarrow e_2$: potenciálně **kauzálně závislé události**
  (*může* být kauzální vztah)
- $e_1 \parallel e_2$: **současné** události
  (kauzální vztah *určitě* není)

Příklad: Stalo se před →



A → B
B → F
A → F

I → G
F → K
A → K
C → K

C ‖ G
A ‖ J
C ‖ H

Lamportovy logické hodiny

Jak přiřadit události e časovou značku $C(e)$ tak, aby respektovaly kauzalitu, tj. jestliže $e_1 \rightarrow e_2$, pak $C(e_1) < C(e_2)$?

→ **Lamportovy logické hodiny:** Každý proces má své logické hodiny, které se **synchronizují podle přijímaní zpráv**.

- navržené Leslie Lamportem v 70. letech
- používané prakticky ve všech distribuovaných systémech (a všech cloudových platformách)

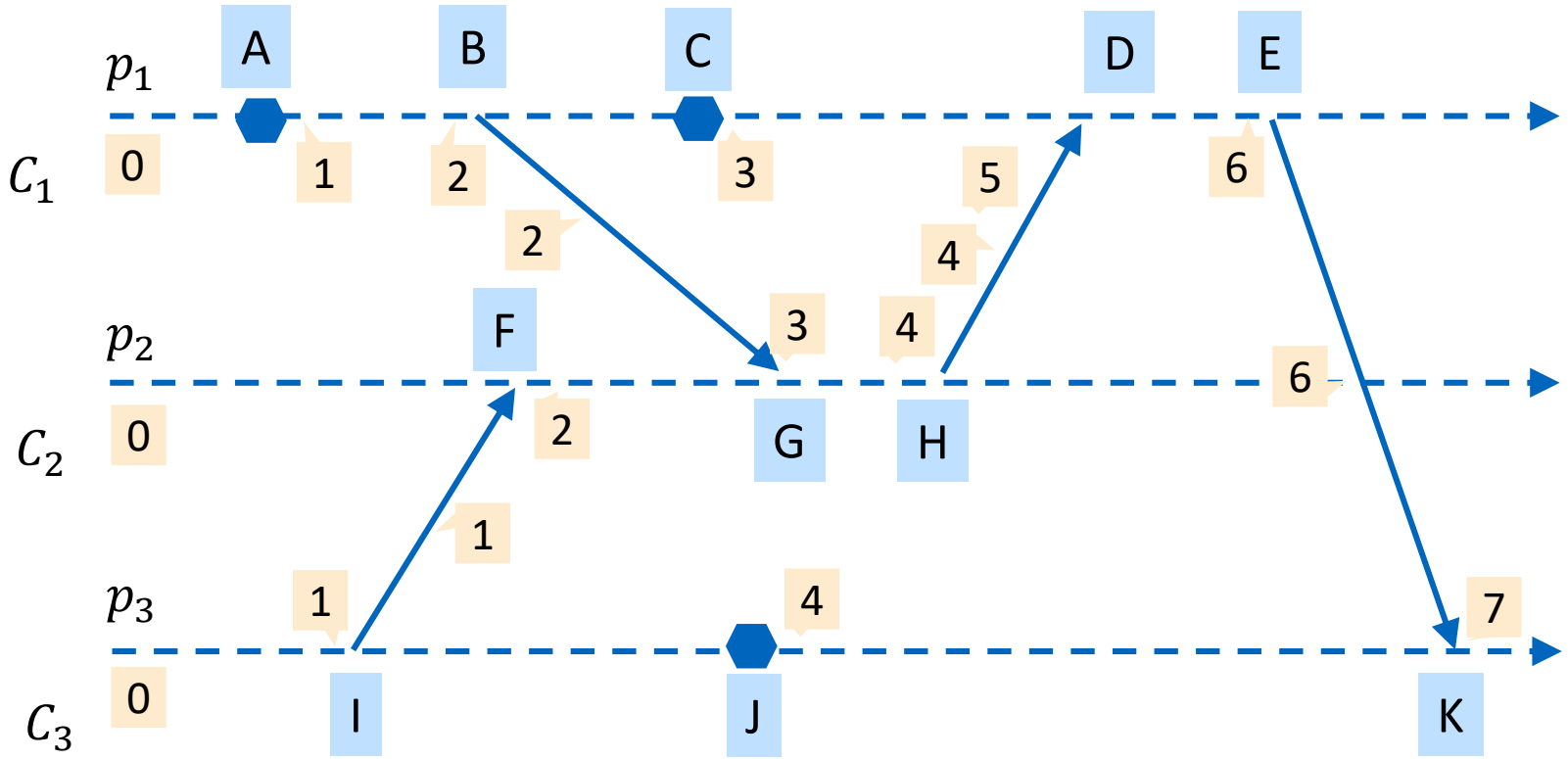
Synchronizace logických hodin

Synchronizace logických hodin

Každý proces p_i si udržuje lokální logické hodiny C_i a nastavuje

1. Po každé události, která se odehraje v p_i, se C_i **inkrementuje** o 1.
2. Je-li v procesu p_i **odeslaná zpráva** m, dostane časovou značku $ts(m) = C_i$.
3. Kdykoliv proces p_j přijme zprávu m, tak
   I. upraví své lokální hodiny C_j na $\max\{C_j, ts(m)\}$; a poté
   II. provede krok 1 předtím, než předá m aplikaci

Příklad: Lamportovy hodiny



A → B	1 < 2	H → G	1 < 4	C ∥ G?	3 = 3
B → G	2 < 3	F → K	2 < 7	A ∥ J?	1 < 3
A → G	1 < 2	H → K	4 < 7	C ∥ H	3 < 4
		C → K	3 < 7		

Lamportovy hodiny **neimplikují kauzalitu**!

Logické hodiny a kauzalita

Pár **současných** událostí **nemá kauzální cestu** od jedné události ke druhé (ani jedním směrem).

Lamportovy časové značky pro současné události mohou, ale **nemusí** mít stejnou hodnotu!

- **Platí**: jestliže $e_1 \rightarrow e_2$, pak $C(e_1) < C(e_2)$
- **Neplatí**: jestliže $C(e_1) < C(e_2)$, pak $e_1 \rightarrow e_2$

Jak zajistit, že z uspořádání časových značek jednoznačně poznáme potenciální kauzalitu?

Vektorové hodiny

Vektorové hodiny

Předpokládejme skupinu procesů $\{p_1, \dots p_N\}$

Každý proces si udržuje **vektor** celočíselných hodin $V_i[1 \dots N]$

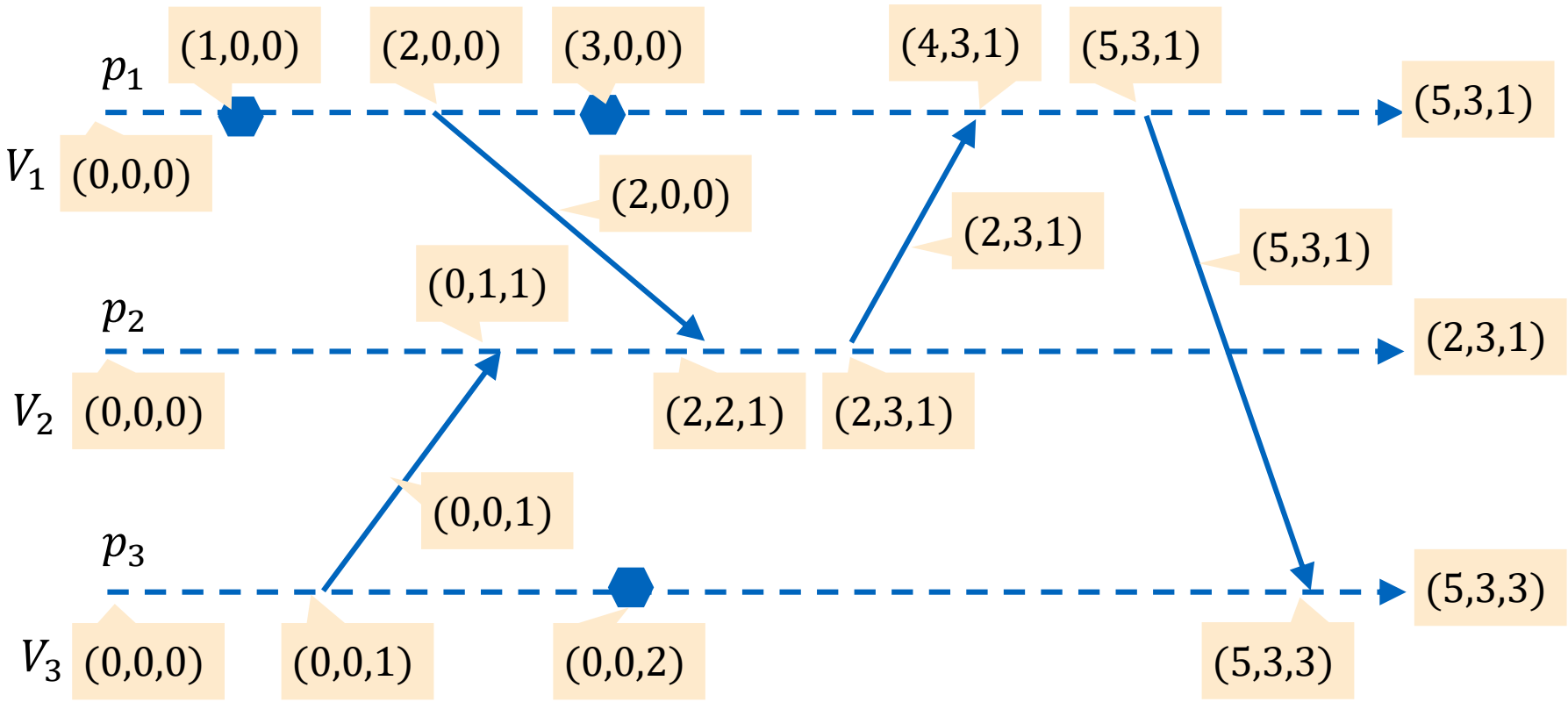
- j-tý element vektorových hodin procesu $V_i[j]$ je znalost procesu i o událostech v procesu j

Synchronizace vektorových hodin

Každý proces p_i si udržuje **lokální vektorové hodiny** V_i a nastavuje

1. Před **provedením akce** v procesu p_i se V_i **inkrementuje** o 1, tj. $V_i[i] := V_i[i] + 1$
2. **Pošle-li** proces p_i zprávu m procesu p_j, **nastaví** *vektorovou* časovou značku $ts(m)$ zprávy m na V_i (poté, co provedl krok 1)
3. Proces p_j po **přijetí** zprávy m
   - nastaví své hodiny $V_j[k] := \max\big(V_j[k], ts(m)[k]\big)$ pro všechna $k = 1, \ldots, N$ (tzv. **sloučení**)
   - poté **inkrementuje** $V_j[j]$ a předá zprávu m aplikaci.

Vektorové hodiny: příklad



Vektorové hodiny a kauzalita

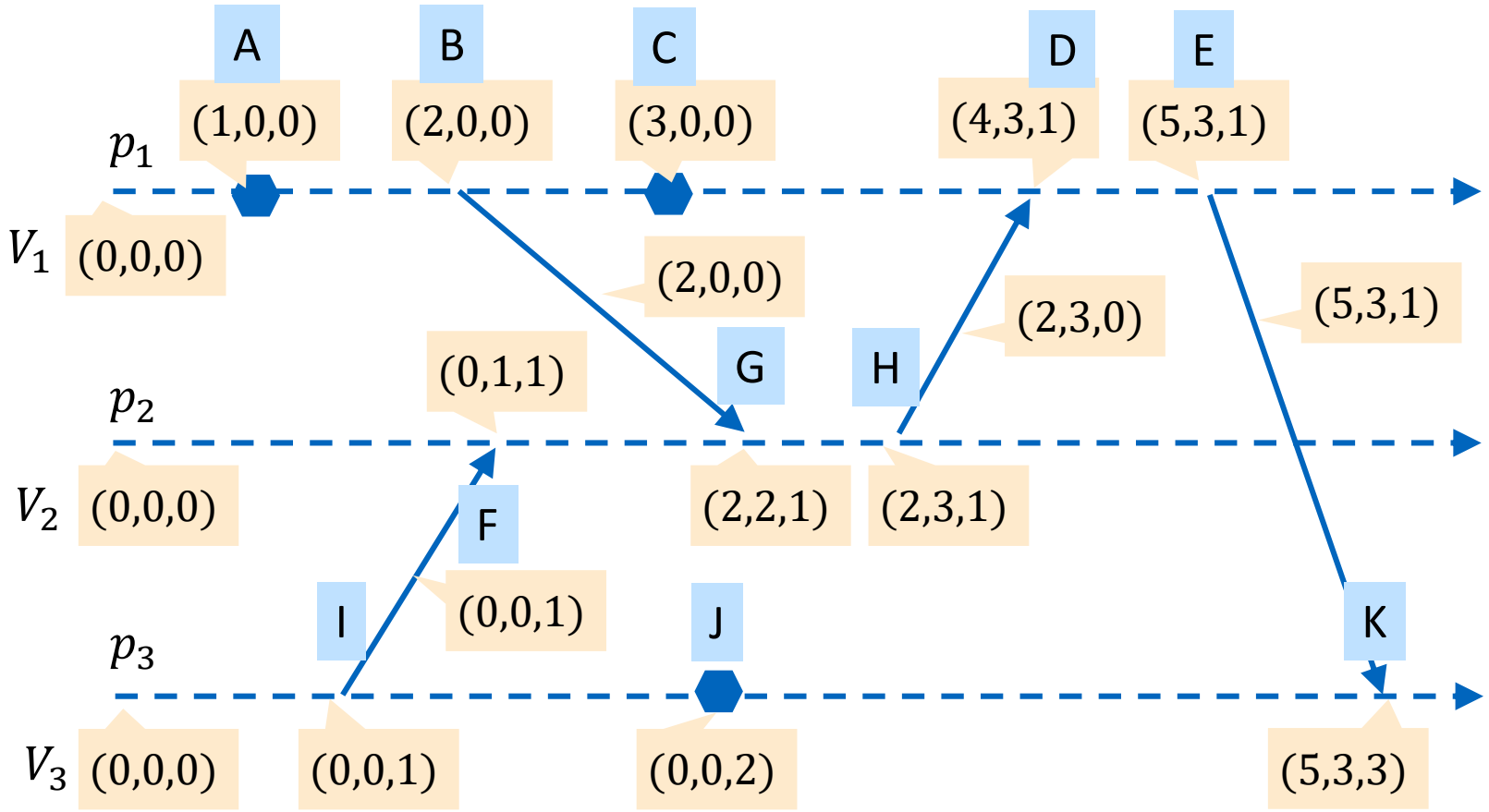
Upořádání vektorových časových značek:

- $V_1 = V_2$ iff $V_1[i] = V_2[i]$ pro všechna $i = 1, \dots, N$
- $V_1 < V_2$ iff $V_1[i] \leq V_2[i]$ pro všechna $i = 1, \dots, N$ a existuje j, že $V_1[j] < V_2[j]$
- Pokud: $\neg(V_1 < V_2) \wedge \neg(V_2 > V_1)$, pak píšeme $V_1 \parallel V_2$

Pro vektorové hodiny platí:

$e_1 \rightarrow e_2$ **iff** pro časové událostí platí: $V_1[j] < V_2[j]$

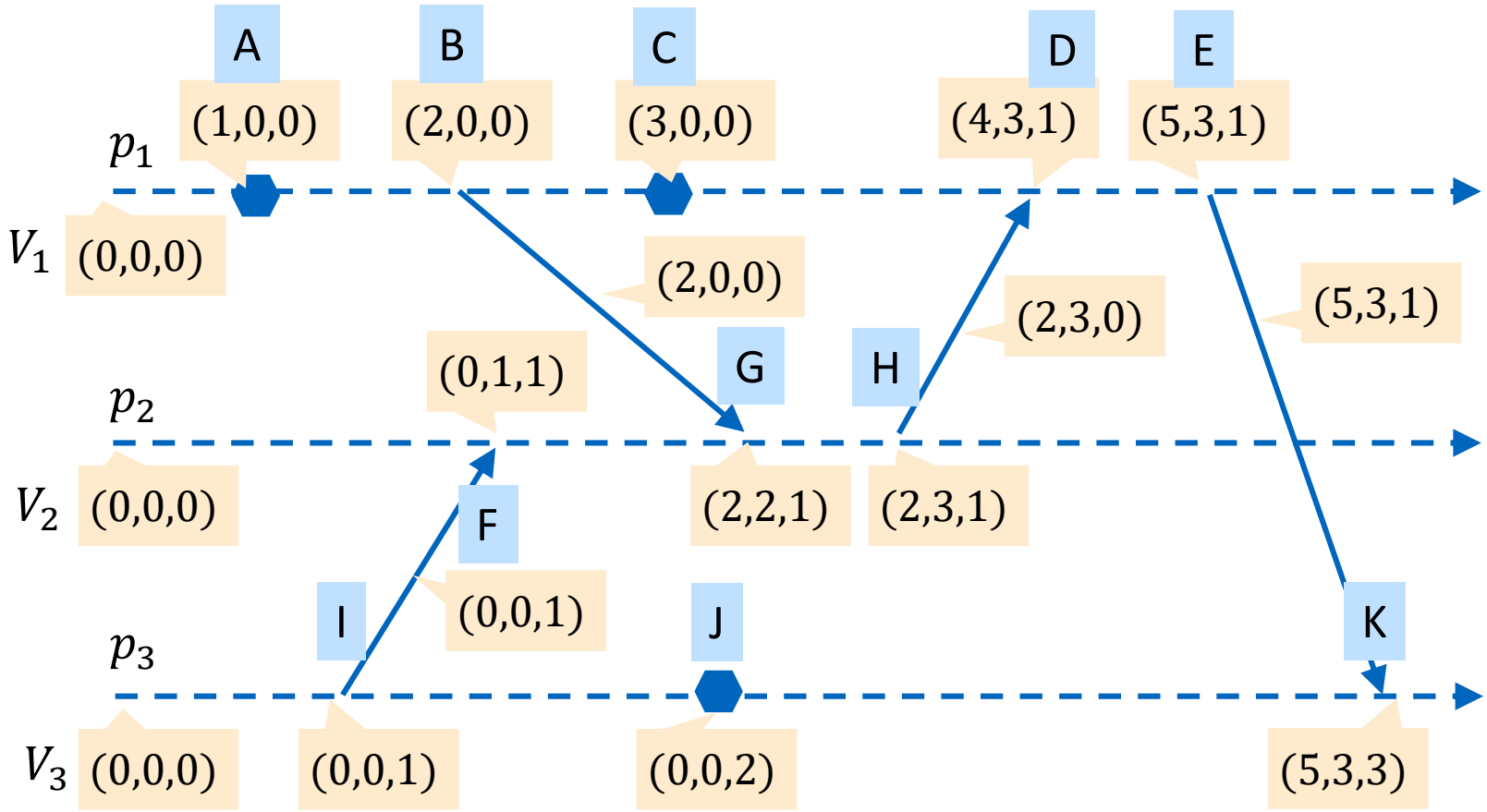
Vektorové hodiny: kauzalita



$A \rightarrow B :: (1,0,0) < (2,0,0)$
$B \rightarrow G :: (2,0,0) < (2,2,1)$
$A \rightarrow G :: (1,0,0) < (2,2,1)$

$I \rightarrow H :: (0,0,1) < (2,3,1)$
$F \rightarrow K :: (0,1,1) < (5,3,3)$
$I \rightarrow K :: (0,0,1) < (5,3,3)$
$C \rightarrow K :: (3,0,0) < (5,3,3)$

Souběžné události



$C \parallel G$ :: $(3,0,0) \parallel (2,2,1)$
$A \parallel J$ :: $(1,0,0) \parallel (0,0,2)$
$C \parallel H$ :: $(3,0,0) \parallel (2,3,1)$

vektorové hodiny rozliší **souběžné události**

Logické hodiny: Souhrn

Lamportovy (skálární) logické hodiny

- respektují **kauzalitu**
- ale nerozliší současné události

Vektorové hodiny

- respektují kauzalitu
- potřebují více místa, ale rozliší **současné události**

Lze dokázat, že pro zachycení kauzality ve skupině N procesů je potřeba **vektorové hodiny délky N** pro každý proces

- Existují algoritmy, které redukují množství dat potřebných pro udržbu vektorových hodin (např. Raynal a Singhal, 1996)

Čas v DS: Shrnutí

Přesně synchronizované globální hodiny v DS (s nenulovou latencí přenosu zpráv) neexistují.

Lze synchronizovat s určitou přesností:

- Cristianův algoritmus
- NTP
- Berkely algoritmus

… ale chyba je nenulová a je funkci **doby oběhu zprávy** (RTT)

Nutností synchronizovat hodiny se můžeme vyhnout využitím **logických hodin**.