SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
Fakultet elektrotehnike i računarstva

Diplomski studij

Informacijska i komunikacijska tehnologija:

Telekomunikacije i informatika

Računarstvo:

Programsko inženjerstvo i informacijski sustavi

Računarska znanost

Raspodijeljeni sustavi

5. Formalni model raspodijeljenog sustava i primjeri raspodijeljenih algoritama

Ak. god. 2020./2021.

Creative Commons

- slobodno smijete:
  - **dijeliti** — umnožavati, distribuirati i javnosti priopćavati djelo
  - **prerađivati** djelo
- pod sljedećim uvjetima:
  - **imenovanje:** morate priznati i označiti autorstvo djela na način kako je specificirao autor ili davatelj licence (ali ne način koji bi sugerirao da Vi ili Vaše korištenje njegova djela imate njegovu izravnu podršku).
  - **nekomercijalno:** ovo djelo ne smijete koristiti u komercijalne svrhe.
  - **dijeli pod istim uvjetima:** ako ovo djelo izmijenite, preoblikujete ili stvarate koristeći ga, preradu možete distribuirati samo pod licencom koja je ista ili slična ovoj.

U slučaju daljnjeg korištenja ili distribuiranja morate drugima jasno dati do znanja licencne uvjete ovog djela.
Od svakog od gornjih uvjeta moguće je odstupiti, ako dobijete dopuštenje nositelja autorskog prava.
Ništa u ovoj licenci ne narušava ili ograničava autorova moralna prava. *Tekst licence preuzet je s http://creativecommons.org/*

Raspodijeljeni (distribuirani) algoritam

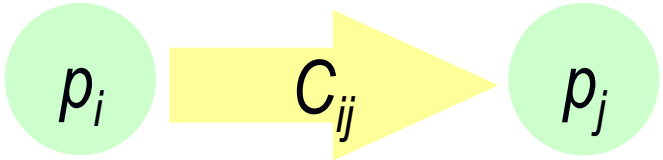
- Algoritam koji se izvodi u raspodijeljenoj okolini, uključuje procese koji komuniciraju razmjenom poruka
- Izvodi se na većem broju računala povezanih mrežom, nije jednostavno odrediti početak i kraj izvođenja algoritma, koliko procesa izvodi raspodijeljeni algoritam, globalno stanje sustava
- Treba biti otporan na ispade procesa jer je to djelomični ispad sustava
- Komunikacija složenost: brojimo poruke koje se generiraju tijekom izvođenja algoritma

Sadržaj predavanja

- Osnovni model raspodijeljenog sustava
- Model raspodijeljenog izvođenja
- Uzročna ovisnost događaja
- Globalno stanje raspodijeljenog sustava
- Sinkroni model raspodijeljenog sustava
- Asinkroni model raspodijeljenog sustava

Osnovni model raspodijeljenog sustava

- skup autonomnih procesa p_1, p_2, …, p_n
- C_{ij} –kanal koji povezuje procese p_i i p_j
- m_{ij} – poruka od p_i za p_j

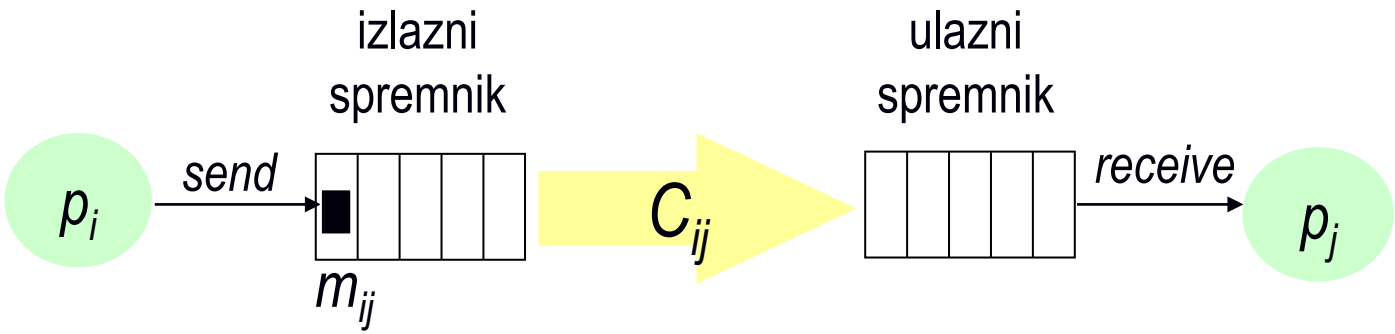


Svojstva

- Izvođenje procesa i prijenos poruka su asinkroni
- Procesi ne dijele zajednički memorijski prostor
- Pri komunikaciji procesa neminovno se javlja kašnjenje
- Procesi ne koriste jedinstveni globalni sat

Komunikacija procesa

- procesi međusobno komuniciraju razmjenom poruka (*message passing*) preko komunikacijskog medija (komunikacijske mreže)



- procesi koriste operatore *send* i *receive*
- *send*: pohranjuje poruku u izlazni spremnik i priprema za prijenos preko kanala
- *receive*: čita poruku iz dolaznog spremnika i prosljeđuje procesu

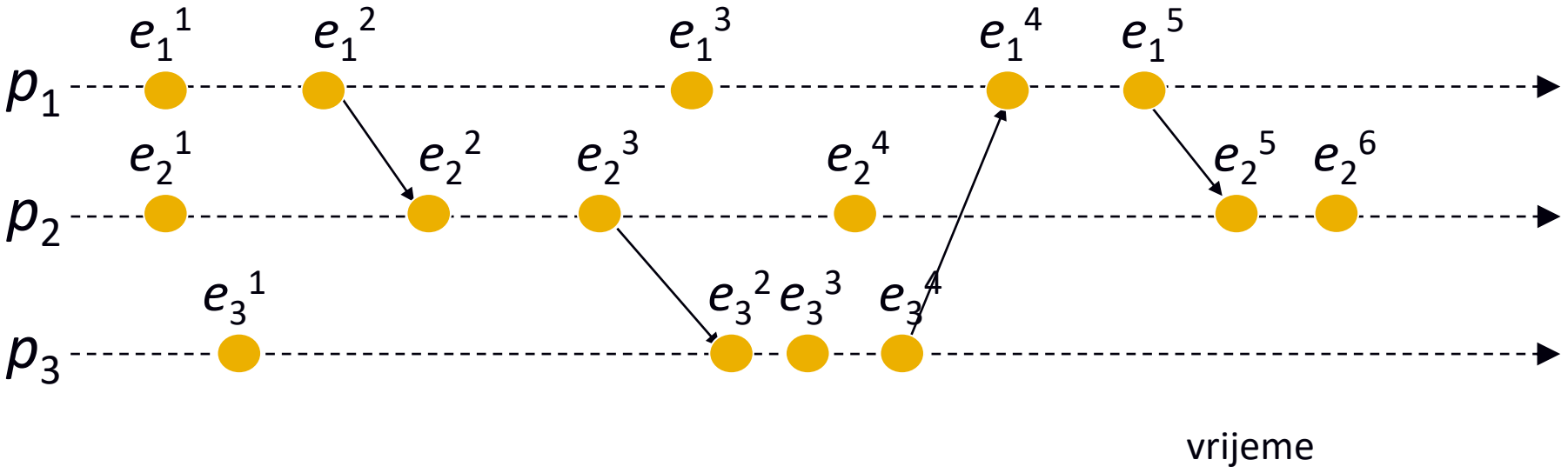
Model raspodijeljenog izvođenja

- Izvođenje procesa: slijedno izvođenje akcija procesa
- Akcije se modeliraju sljedećim događajima:
  - unutarnji događaj
  - slanje poruke
  - primanje poruke
- Događaj mijenja stanje procesa i komunikacijskog kanala
- Slijed događaja na procesu p_i:

$$e_i^1, e_i^2, e_i^3, \ldots, e_i^x$$

(e_i^2 se dogodio prije e_i^3)

Primjer raspodijeljenog izvođenja



Uzročna ovisnost događaja (1)

- Uzročna relacija ovisnosti događaja (oznaka: →)
  - izražava uzročnu ovisnost između dva događaja tijekom raspodijeljenog izvođenja, uzročnost može biti direktna ili tranzitivna
- $e_i^x \longrightarrow e_i^y$
  - događaj e_i^x je izvršen na procesu p_i prije događaja e_i^y te su oni uzročno povezani (e_i^x se nužno dogodio prije e_i^y)
- $send(m) \longrightarrow_{msg} receive(m)$
  - uzročna ovisnost vezana uz slanje i primanje poruke, da bi poruka bila primljena, mora prethodno nužno biti poslana na kanal
- $e_i^x \longrightarrow e_k^z \wedge e_k^z \longrightarrow e_j^y \Rightarrow e_i^x \longrightarrow e_j^y$
  - primjer tranzitivne uzročnosti događaja izvršenih na 3 različita procesa

Uzročna ovisnost događaja (2)

- Kada su 2 događaja uzročno ovisna?

$$e_i^x \rightarrow e_j^y \Leftrightarrow \begin{cases} e_i^x \rightarrow e_j^y, (i = j) \wedge (x < y) & \text{slijedni događaji na istom procesu} \\ e_i^x \rightarrow_{msg} e_j^y & \text{slanje i primanje poruke } msg \\ e_i^x \rightarrow e_k^z \wedge e_k^z \rightarrow e_j^y & \text{tranzitivna uzročnost} \end{cases}$$

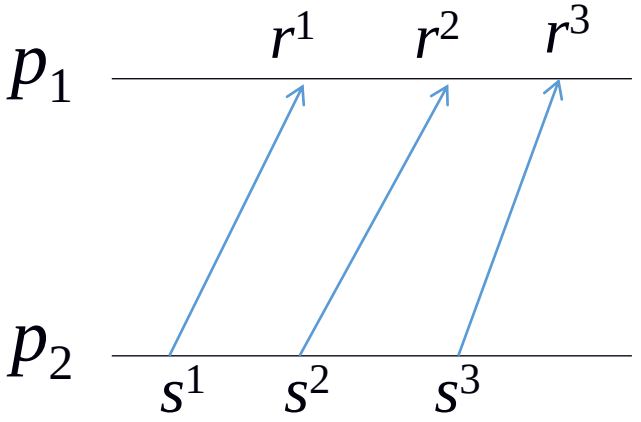
Uzročna neovisnost događaja

- Uzročna relacija neovisnosti dvaju događaja (oznaka: $\not\rightarrow$)
  - označava neovisnost dvaju događaja tijekom raspodijeljenog izvođenja
- $e_i \not\rightarrow e_j$
  - događaj e_j nije ovisan o događaju e_i
- Vrijede sljedeća pravila
  1. za 2 događaja e_i i e_j, $e_i \not\rightarrow e_j \not\Rightarrow e_j \not\rightarrow e_i$
  2. za 2 događaja e_i i e_j, $e_i \rightarrow e_j \Rightarrow e_j \not\rightarrow e_i$
  3. ako za 2 događaja e_i i e_j, vrijedi $e_i \not\rightarrow e_j$ i $e_j \not\rightarrow e_i$, onda su e_i i e_j konkurenti događaji i to možemo napisati na sljedeći način $e_i \,||\, e_j$

Model komunikacijskog kanala (1/3)

FIFO (first-in, first-out)

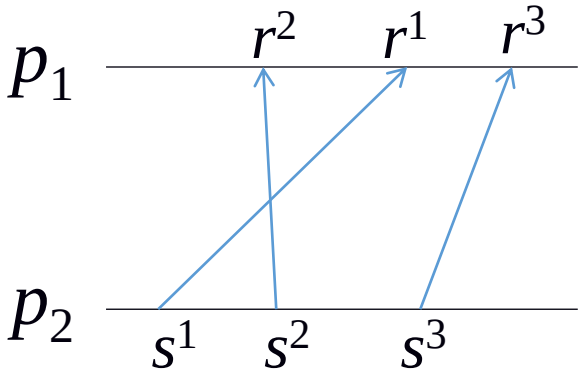
- kanal čuva slijednost poruka, ponaša se kao rep



FIFO

non-FIFO

- kanal ne čuva slijednost poruka, ponaša se kao skup

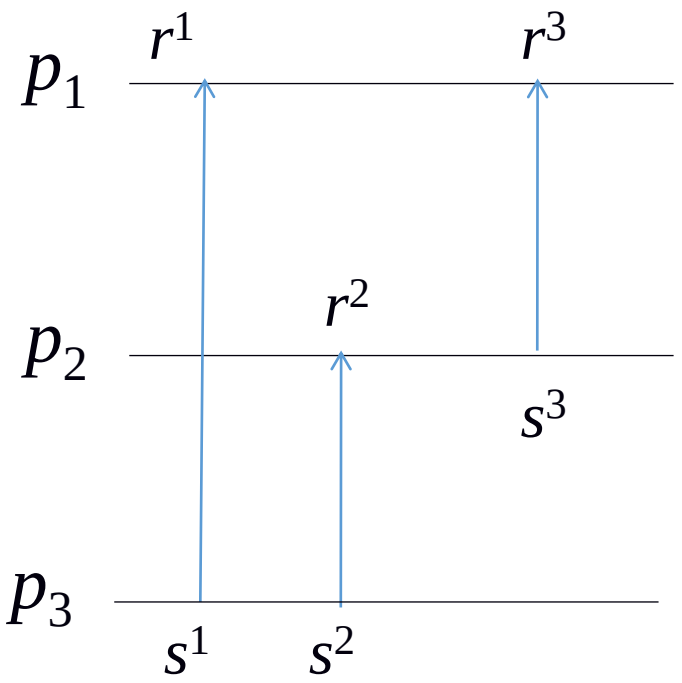


non-FIFO

Model komunikacijskog kanala (2/3)

sinkrona slijednost

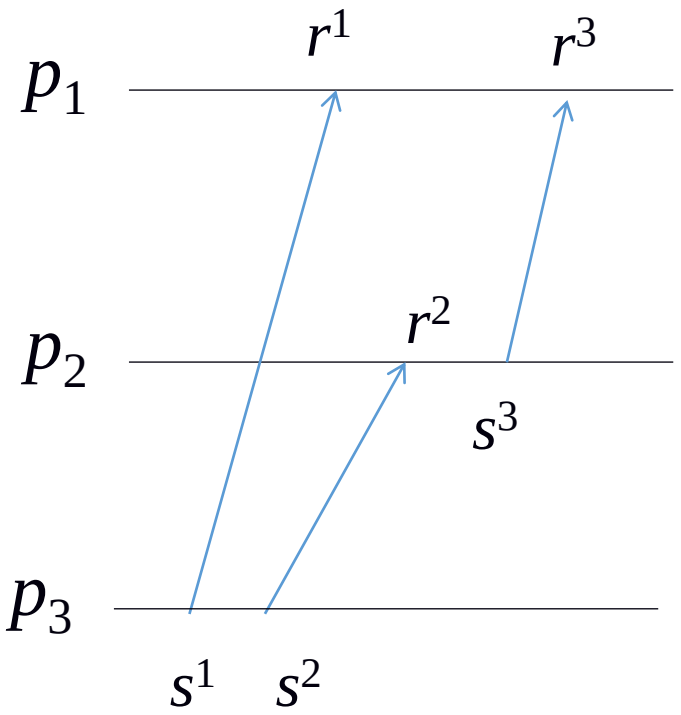
- slanje i primanje poruke događa se istovremeno



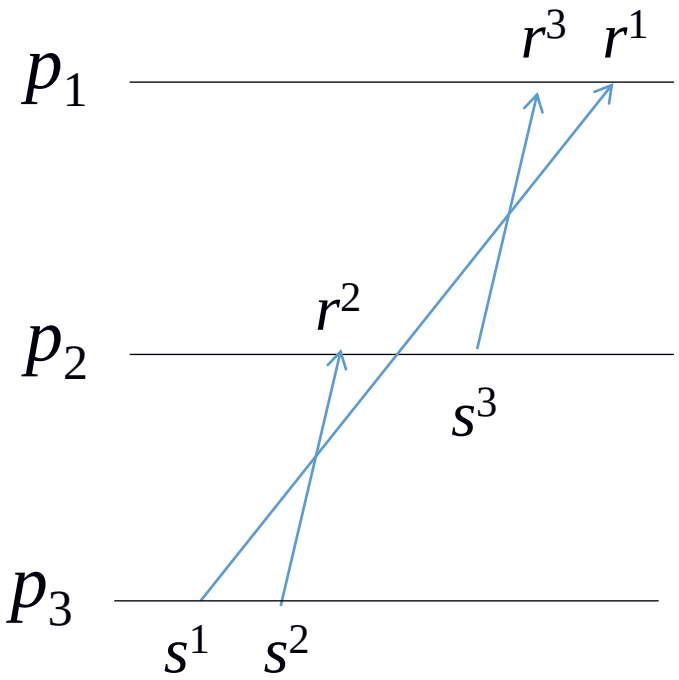
Model komunikacijskog kanala (3/3)

uzročna slijednost (*causal ordering*, CO)

- osigurava da uzročno povezani događaji slanja dviju poruka istom primatelju rezultiraju primanjem u slijedu kojim su poslani

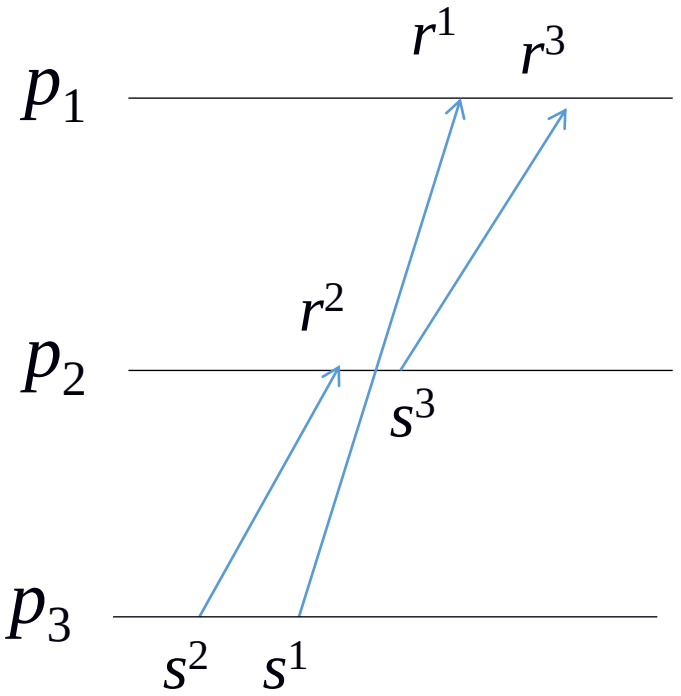


Primjer izvođenja non-CO i CO



non-CO

$s^1 \rightarrow s^3$, jer na p_1 imamo $r^1 \rightarrow r^3$



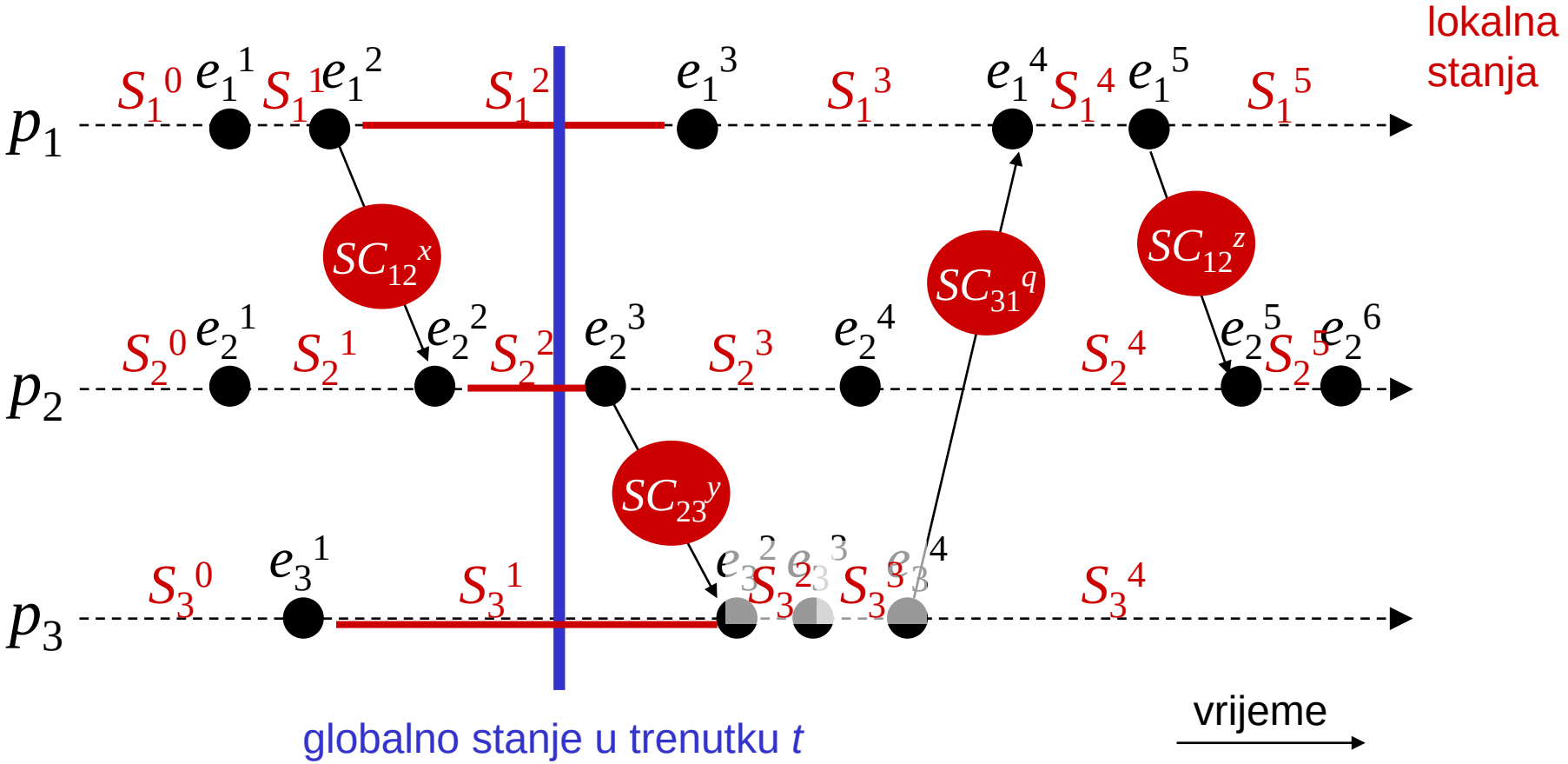
CO

$s^2 \rightarrow s^1$, $s^2 \rightarrow s^3$ ali odredišta poruka se razlikuju, a kada analiziramo r^1 i r^3, poruke slanja s^1 i s^3 su neovisne pa je njihov redoslijed irelevantan

Globalno stanje raspodijeljenog sustava

- Određeno lokanim stanjima procesa i kanala
- Stanje procesa određeno je stanjem lokalne memorije i izvođenjem unutarnjih događaja
- Stanje kanala određeno je skupom primljenih i poslanih poruka
- Izvođenje događaja mijenja lokano stanje procesa/kanala te istovremeno i globalno stanje raspodijeljenog sustava

Primjer lokalnog/globalnog stanja



$$GS(t) = \{S_1^2, S_2^2, S_3^1, SC_{12}^x, SC_{23}^a, SC_{31}^b\}$$

Proširenje osnovnog modela (sinkroni i asinkroni)

Sinkroni model

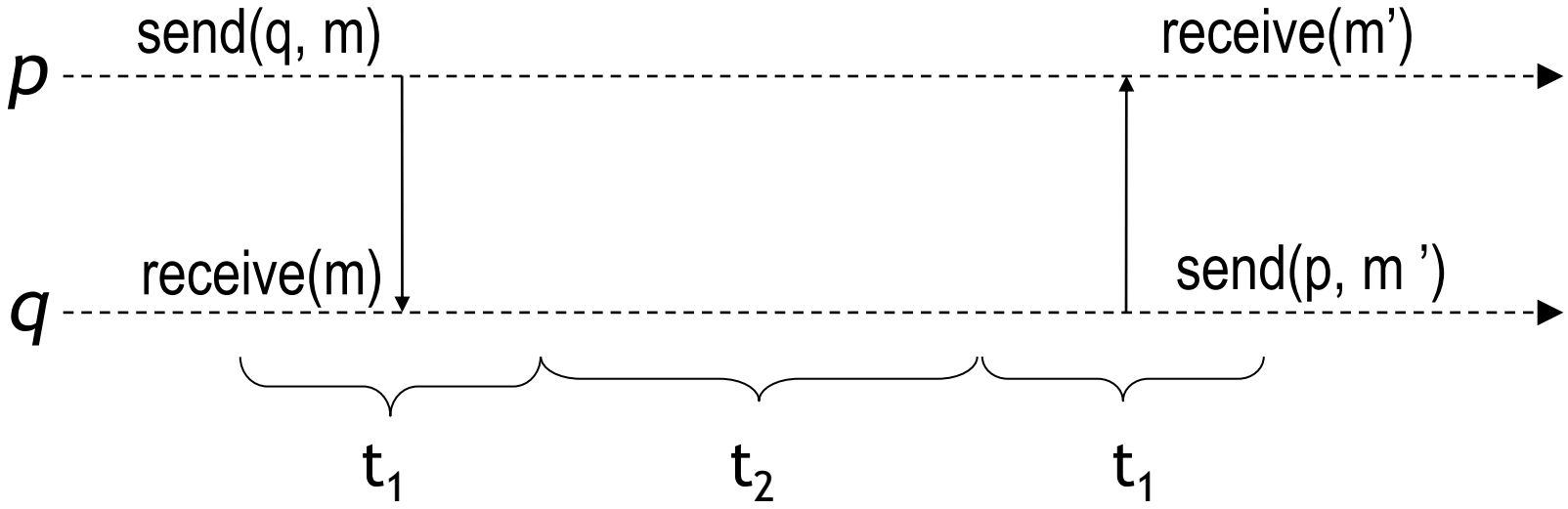
- pretpostavka: svi procesi raspodijeljenog sustava izvode događaje (tj. korake) istovremeno
- pojednostavljenje koje nije realno za raspodijeljene sustave, ali može biti korisno za njihovo razumijevanje i analizu

Asinkroni model

- pretpostavka: procesi izvode događaje u proizvoljnom slijedu
- postoji neodređenost vezana uz slijed događaja
- realna situacija

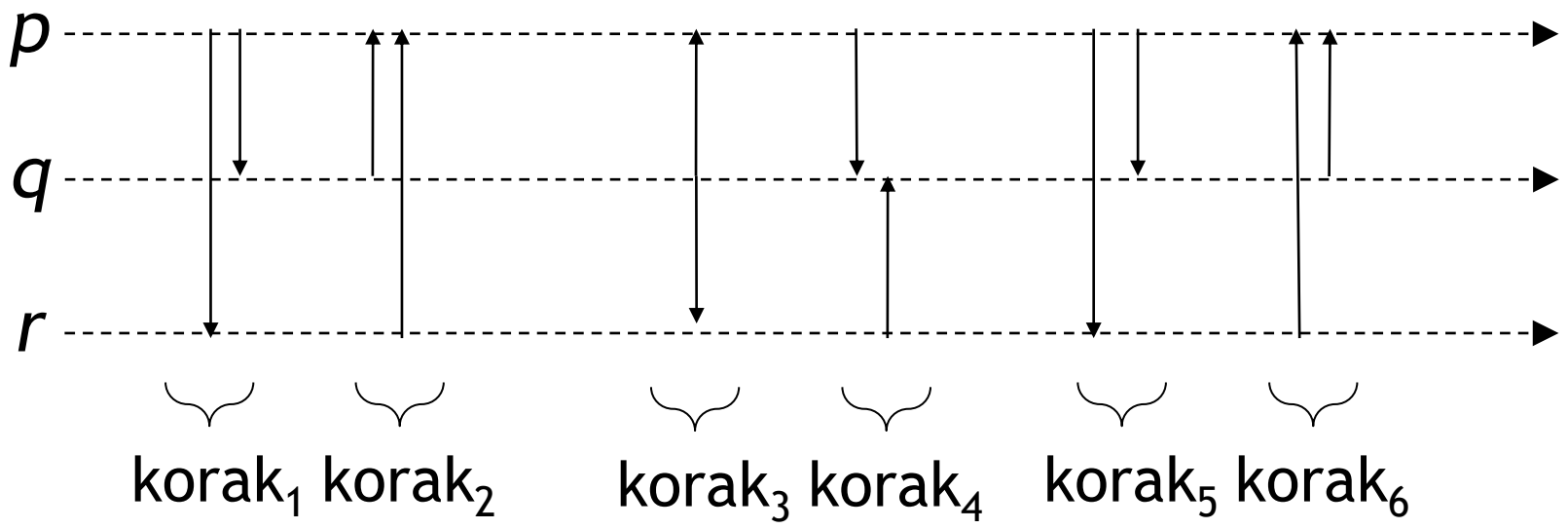
Sinkroni model

- Poznata je gornja vremenska granica za
  - trajanje prijenosa poruke kanalom (t_1) i izvođenje prijelaza nekog procesa (t_2)
- Pretpostavka
  - procesi imaju potpuno sinkronizirana lokalna vremena



Primjer sinkrone komunikacije

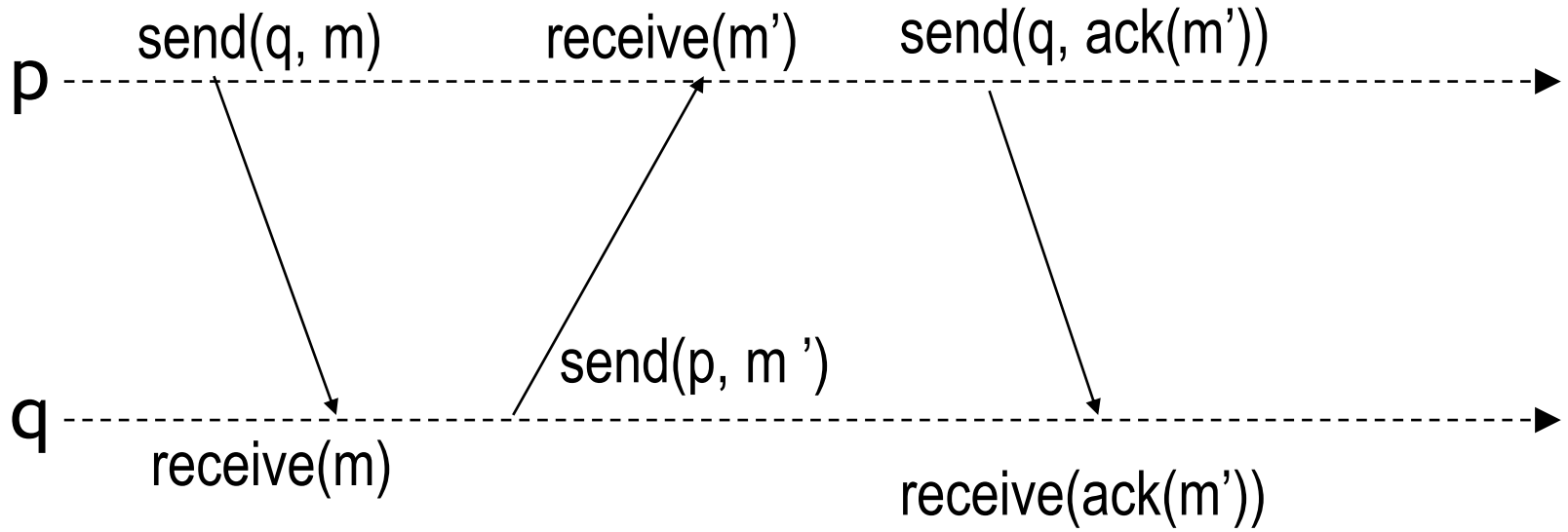
- izvođenje algoritma u sinkronom sustavu organizirano je u koracima
  - pošalji poruke procesima u sustavu
  - primi poruke od drugih procesa u sustavu
  - izvođenje prijelaza: promijeni stanje na temelju primljenih poruka



Asinkroni model

- Ne postoji gornja vremenska granica za
  - izvođenje prijelaza nekog procesa (no trajanje prijelaza je uvijek konačno)
  - trajanje prijenosa poruke kanalom
- Pretpostavka
  - procesi **nemaju** sinkronizirana lokalna vremena
- Realni slučaj koji ćemo najčešće razmatrati, znatno komplicira model i analizu distribuiranog algoritma raspodijeljenog sustava

Primjer asinkrone komunikacije

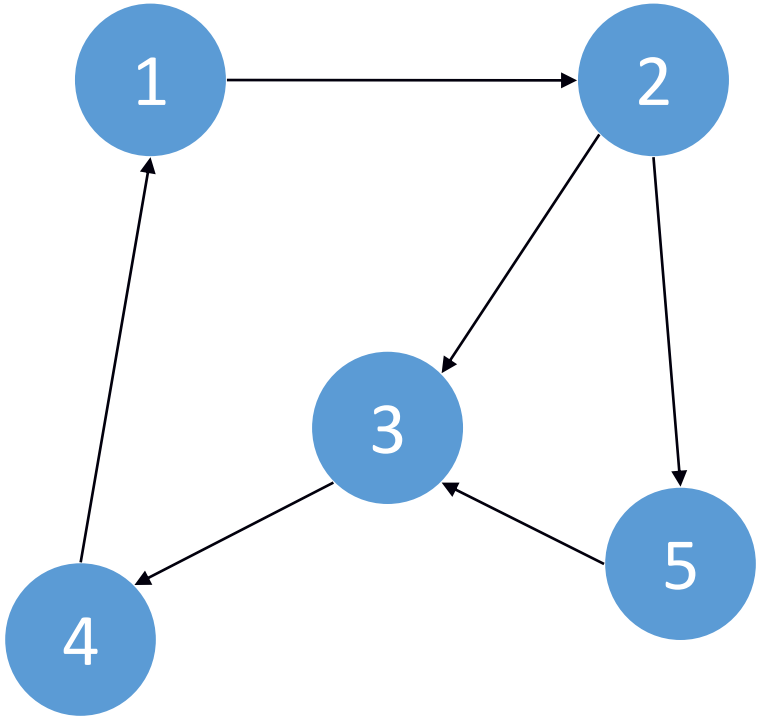


nepouzdani komunikacijski medij, potrebno je modelirati vjerojatnost gubitka poruke na kanalu

Sinkroni model raspodijeljenog sustava

Sinkroni model

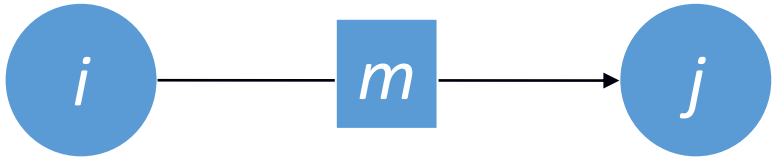
- usmjereni graf $G = (V, E)$
- $v_i \in V$, čvor modelira **proces**
- $e_j \in E$, grana modelira **kanal**
- ***M*** je skup poruka, *null* ako na kanalu nema poruka
- $out\text{-}nbrs_i$ – izlazni susjedi
- $in\text{-}nbrs_i$ – ulazni susjedi
- *distance*(i, j) – najkraći put između i i j u G, $(i, j \in V)$
- *diameter*(G) – max *distance*(i, j) za sve parove (i, j)



Model procesa

- svaki se proces vezan uz čvor $v_i \in V$ modelira kao uređena četvorka: ($states_i$, $start_i$, $msgs_i$, $trans_i$)
- $states_i$ – skup mogućih stanja procesa
- $start_i$ – skup početnih stanja
  - $start_i \subset states_i$, $start_i \neq 0$
- $msgs_i$ – funkcija za generiranje poruka
  - određuje izlaznu poruku za svakog susjeda na temelju trenutnog stanja procesa
  - $states_i \times out\text{-}nbrs_i \rightarrow M_i \subset M \cup \{\text{null}\}$
- $trans_i$ – funkcija prijelaza, određuje sljedeće stanje na temelju trenutnog stanja i primljenih poruka od ulaznih susjeda

Model kanala

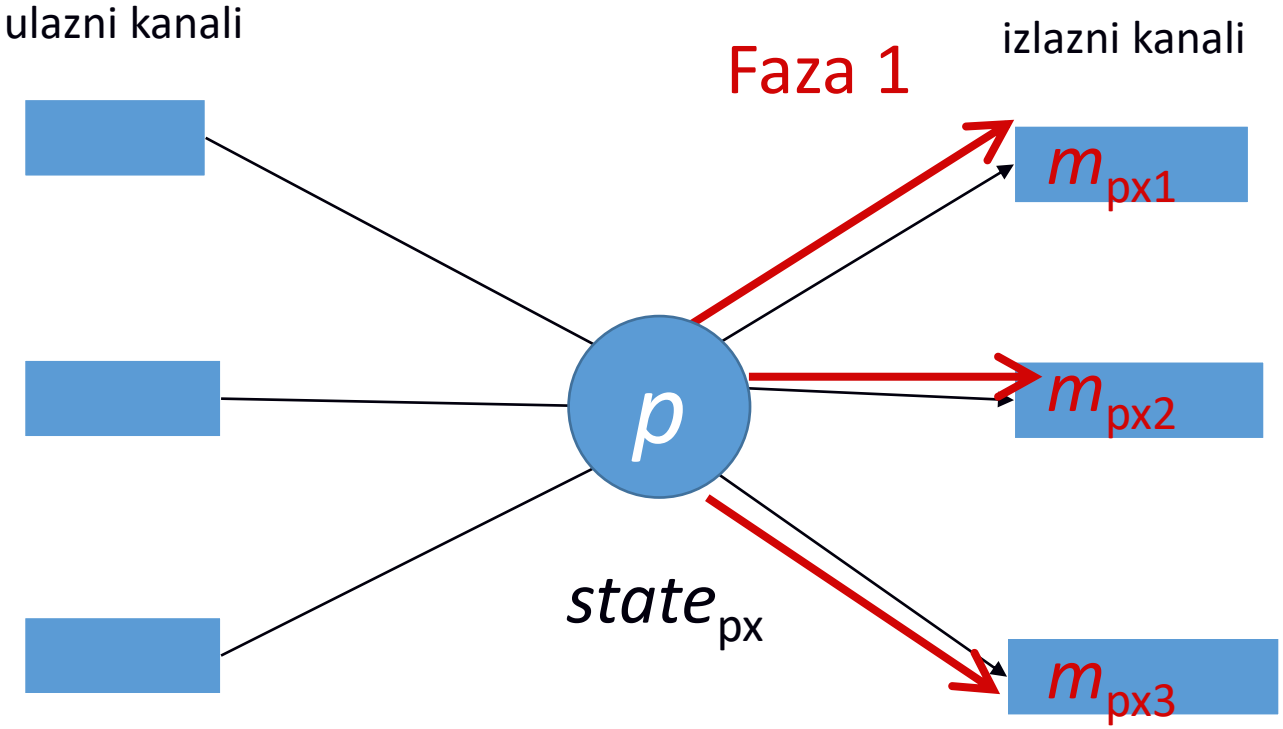


- modelira ga grana između para čvorova (*i*, *j*) iz *G*
- može primiti poruku *m* iz definiranog skupa poruka *M* ili *null*
- *null* označava praznu poruku

Izvođenje sinkronog modela

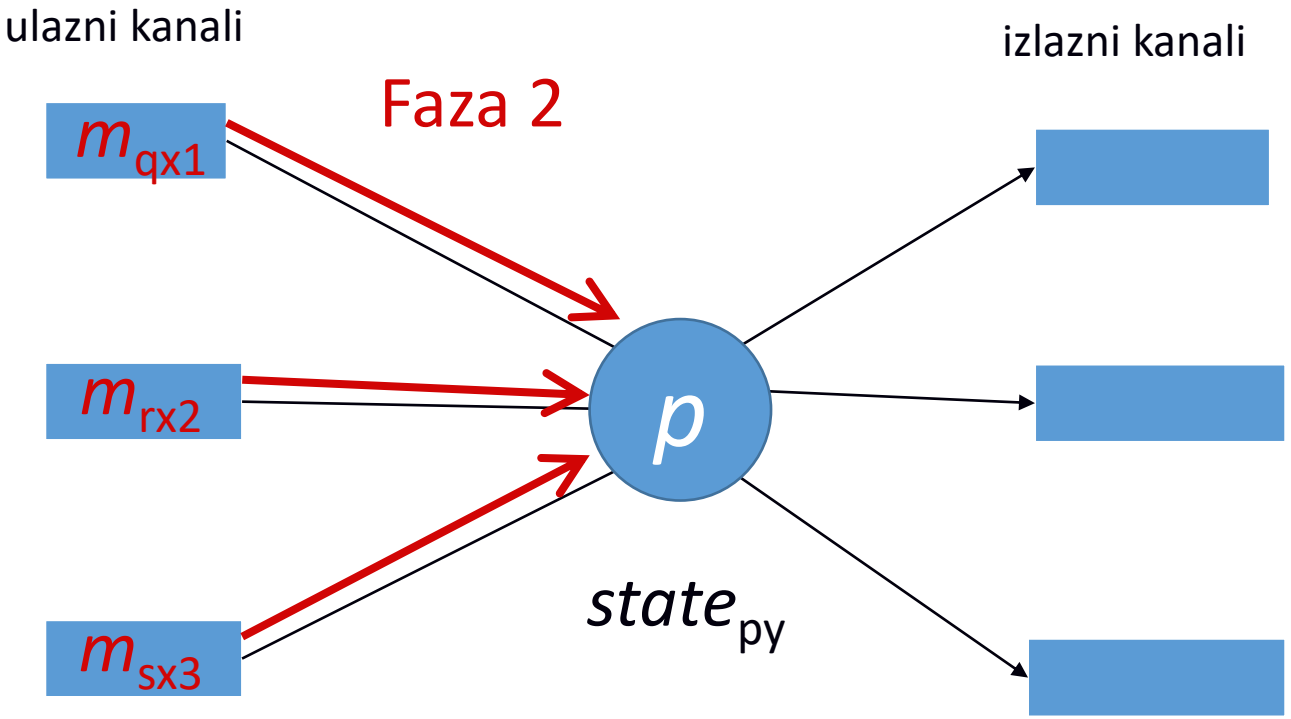
- Algoritmi za sinkrone modele se izvode u koracima (*round*). Inicijalno su svi procesi u proizvoljnom početnom stanju i svi su kanali prazni. Nakon toga se izvode koraci.
- Korak se sastoji od 2 faze
  - Faza 1: Za svaki proces primijeni funkciju za generiranje poruka (*msg*), a na temelju trenutnog stanja. Generiraj poruke koje će biti poslane izlaznim susjedima i postavi te poruke na izlazne kanale.
  - Faza 2: Primijeni funkciju prijelaza (*trans*) koja će na temelju trenutnog stanja i primljenih poruka odrediti sljedeće stanje procesa. Briši sve poruke na kanalima.

Izvođenje (faza 1)



na temelju trenutnog stanja generiraj poruke i postavi ih na izlazne kanale

Izvođenje (faza 2)



primijeni funkciju prijelaza koja na temelju primljenih poruka određuje sljedeće stanje procesa

Formalni model izvođenja

- Beskonačni slijed:

  $C_0, M_1, N_1, C_1, M_2, N_2, C_2, \ldots$

- C_k - stanje svih procesa nakon k koraka
- M_k – poslane poruke na svim kanalima nakon k koraka
- N_k – primljene poruke na svim kanalima nakon k koraka
- $M_k \neq N_k$ – ako dođe do ispada na nekom kanalu, inače je u sustavima bez gubitaka poruka $M_k = N_k$ za svaki k

Složenost sinkronog algoritma

- vremenska složenost
  - mjeri se brojem izvedenih koraka (*rounds*, *r*) koji dovodi do završnog stanja algoritma tj. do stanja u kome su svi procesi zaustavljeni ili kada se više ne proizvode novi izlazi
- komunikacijska složenost
  - mjeri se broj kreiranih i poslanih poruka na kanalima

(Pri određivanju mjere složenosti uvijek se analizira najgori mogući scenarij izvođenja algoritma!)

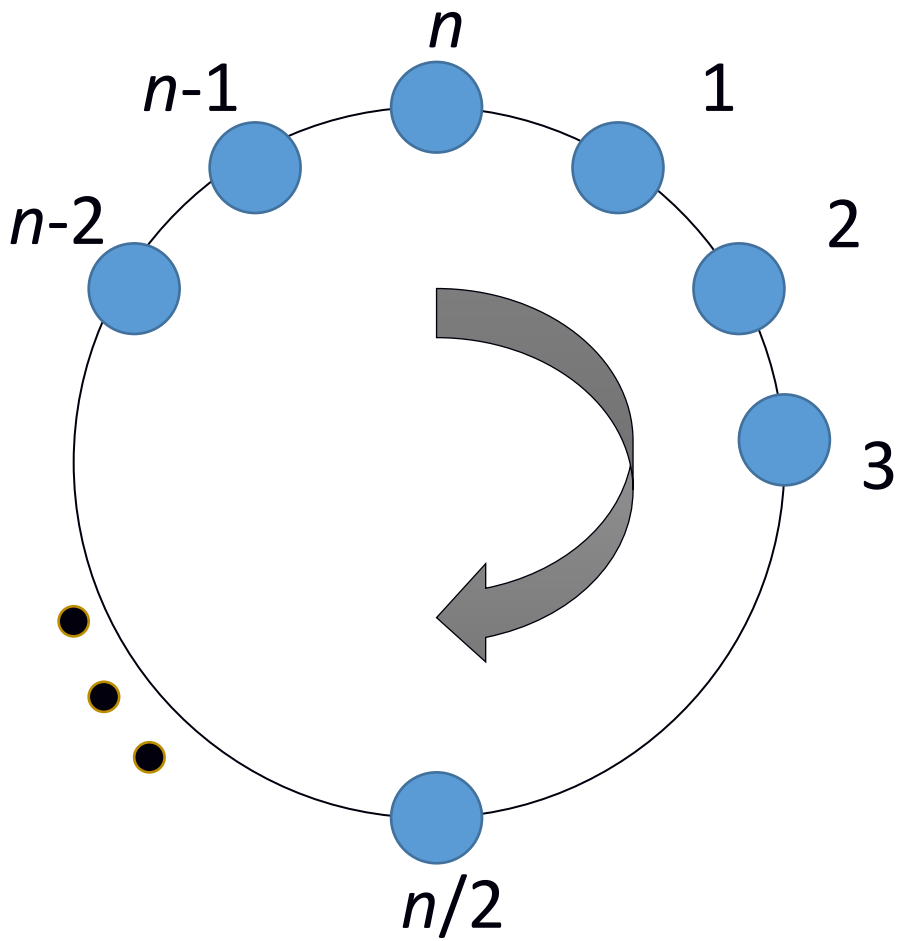
(Usporedite s mjerama složenosti algoritama, vremenska i prostorna)

Primjeri sinkronog modela

Problem 1: Odabir vođe u sinkronom prstenu

Definicija problema

- Izabrati jedinstvenog “vođu” među procesima u mreži
- U bilo kojem koraku samo 1 proces može postati vođa i promijeniti status u *leader*
- Pretpostavka jednostavne mreže od *n* čvorova
  - *token ring*
  - svaki čvor je označen brojem od 1 do *n*



Dodatni zahtjevi

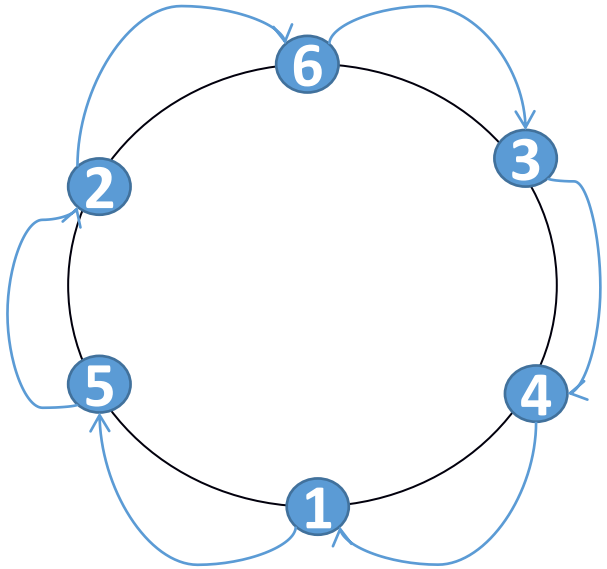
- Svi procesi su identični osim po identifikatoru
  - svaki ima jedinstven identifikator (UID - *Unique* ID)
  - UID nisu sljedbenici u prstenu
  - UID se mogu međusobno uspoređivati
  - (to omogućuje odabir vođe, inače bi svi procesi bili jednaki i vođa se ne bi mogao odabrati)
- Procesi znaju svoje susjede (ulazni ili izlazni)
- Broj procesa u prstenu (*n*) može biti poznat ili nepoznat svim procesima

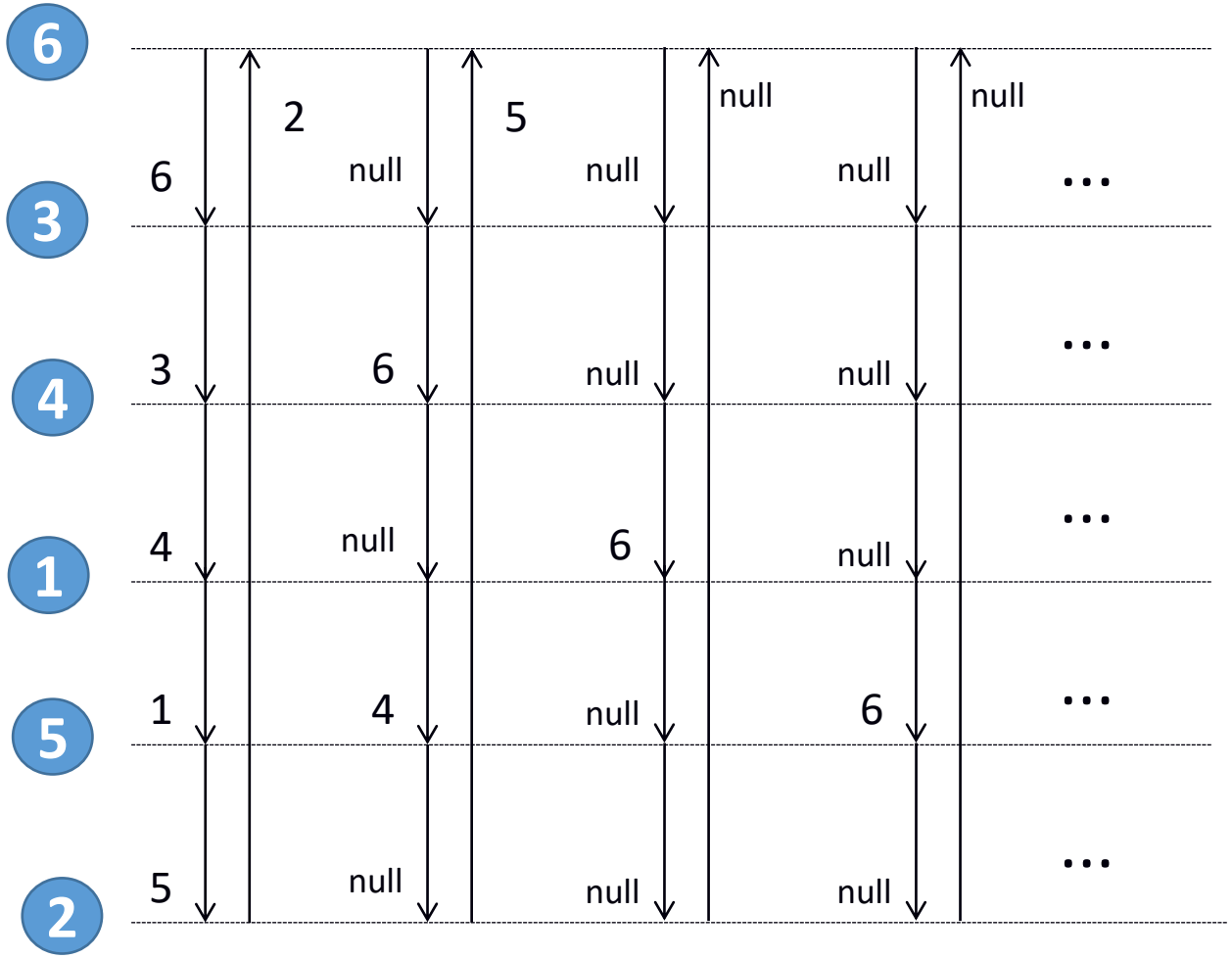
Osnovni algoritam za odabir vođe

- Pretpostavke
  - Jednosmjerna komunikacija među procesima u prstenu (usmjereni graf u smjeru kazaljke na satu)
  - Procesi ne znaju veličinu prstena *n*
  - Svaki proces ima jedinstveni identifikator UID iz skupa prirodnih brojeva, UID se procesu dodjeljuje na slučajan način
- Vođa je proces s najvećim UID
- Skica algoritma:

  Svaki proces inicijalno šalje svoj UID susjedu. Kada proces primi UID, ako je taj veći od njegovog UID-a prosljeđuje ga dalje, ako je primljeni UID malji od njegovog UID-a primljeni UID se odbacuje, a ako je primljeni UID jednak njegovom UID-u proces objavljuje sebe kao vođu

Primjer prstena i algoritma za odabir vođe





Formalni model osnovnog algoritma

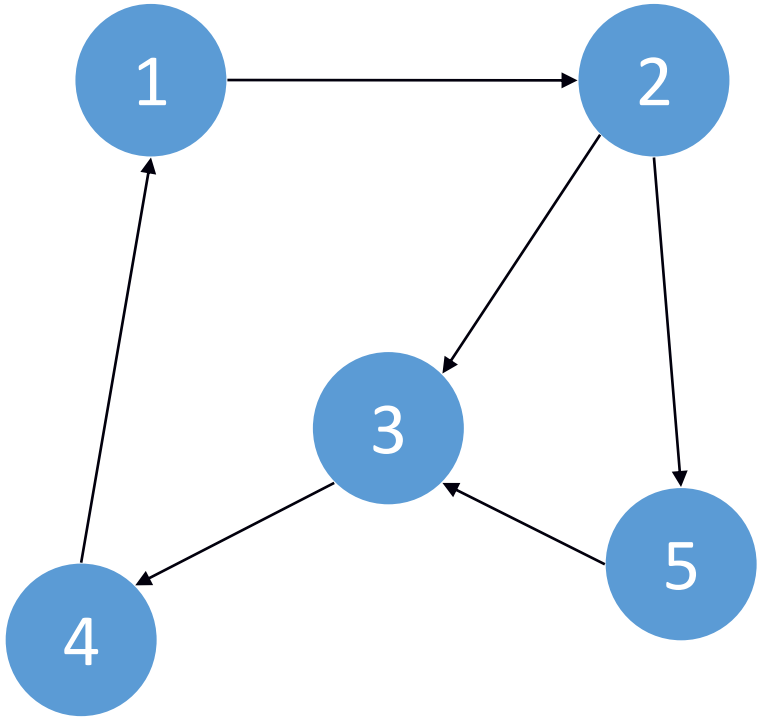
- *M* – skup poruka čini skup svih UID
- Za svaki proces *i*:
  - $states_i$ = (*u*, *send*, *status*)
    u – identifikator, inicijalno UID za *i*
    send – identifikator ili null, inicijalno UID za *i*
    status ∈ {*unknown*, *leader*}, inicijalno *unknown*
  - $start_i$ = (UID procesa *i*, UID procesa *i, unknown*)
  - $msgs_i$ – poslati vrijednost varijable *send* sljedećem procesu
  - $trans_i$ – receive *v*
    send := null (pobriši poruke na kanalima)
    if *v* > *u* then *send* := *v*
    if *v* = *u* then *status* := *leader*
    if *v* < *u* then *do nothing*

Složenost algoritma

- Vremenska
  - s obzirom da algoritam završava u slučaju kada čvor s najvećim UID ponovo primi vlastitu poruku, potrebno je *n* koraka da ta poruka stigne do vođe u prstenu s *n* čvorova
  - samo će proces koji je vođa znati da je algoritam završen (primio je poruku identičnu vlastitom UID), stoga može poslati posebnu poruku (*halt*) s obavijesti da je vođa izabran – potrebno je 2*n* koraka za pronalazak vođe i slanje poruka zaustavljanja
- Komunikacijska
  - u mreži se generira $O(n^2)$ poruka - pri svakom koraku svaki čvor potencijalno generira novu poruku ($n^2 = n$ poruka po koraku x n koraka do završetka algoritma)
  - Ako analiziramo max broj generiranih poruku uzimajući u obzir *null* poruke, onda je to za mrežu s padajućim UID u smjeru kazaljke na satu kada se za svaki korak generira $n+(n-1)+(n-2)+\ldots+1$, što je ukupno $n*(n+1)/2$ poruka, što je $O(n^2)$

Problem 2: Odabir vođe u usmjerenoj mreži

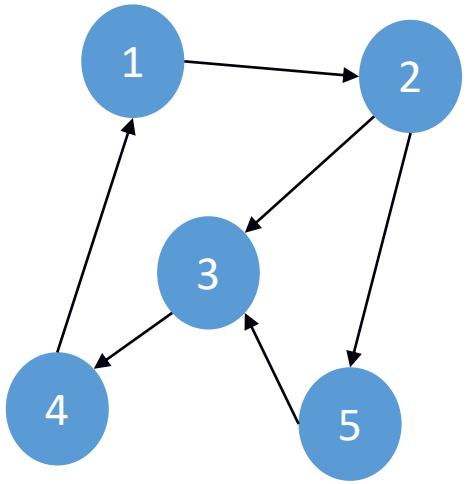
- Povezana usmjerena mreža, za svaki par čvorova postoji konačan *distance*(*i*, *j*)
- Svaki čvor ima jedinstveni identifikator UID
- Izabrati vođu među procesima u mreži
- Samo 1 proces mijenja status u *leader*
- *diameter*(*G*) = max *distance*(v_i, v_j) za sve parove (v_i, v_j) iz *G*



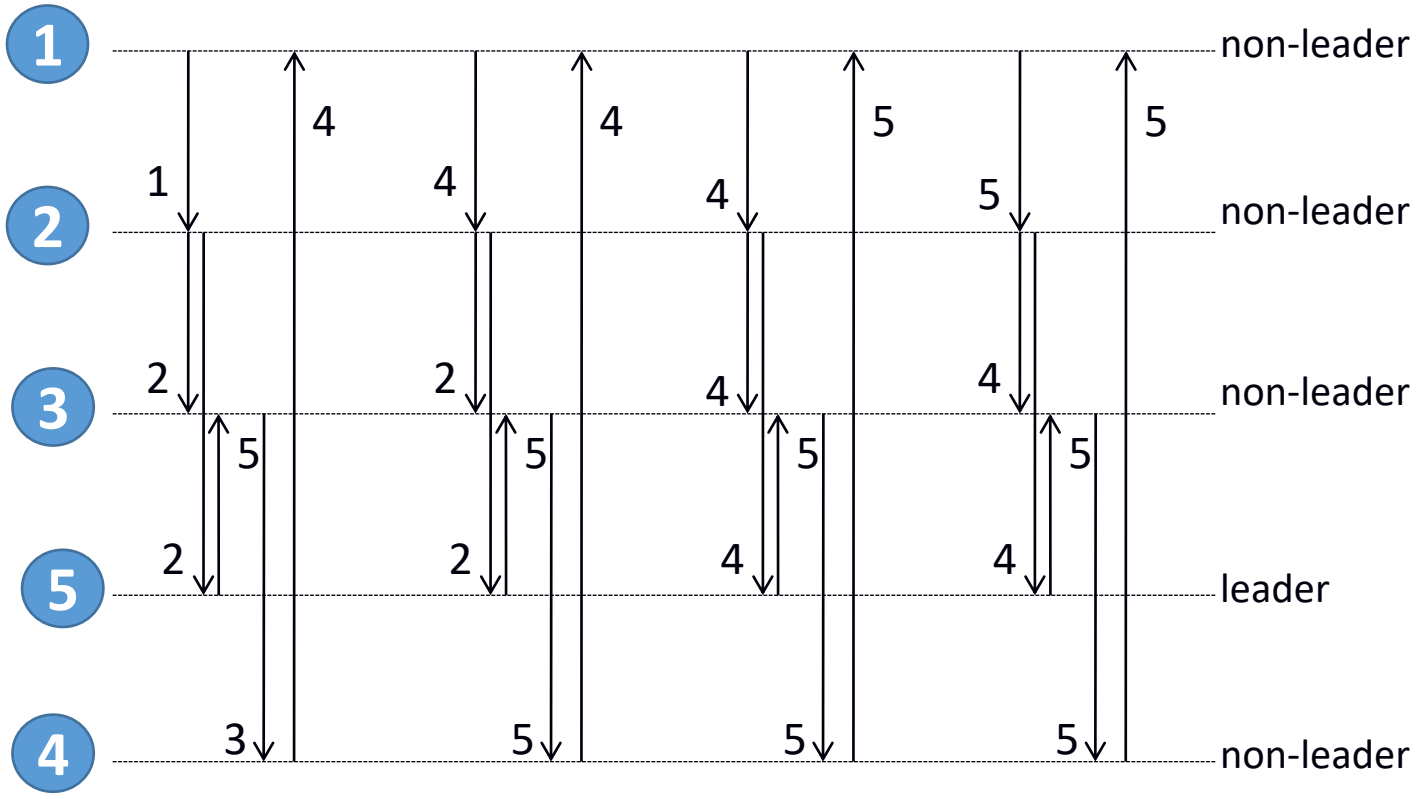
Rješenje problema 2: Algoritam preplavljivanja

- *Simple Flooding Algorithm* (SFA)
- Pretpostavke
  - Svaki proces ima UID iz skupa prirodnih brojeva
  - Svaki proces zna *diameter*(*G*)
- Skica algoritma
  - Svaki proces bilježi max primljeni UID (inicijalno je to vlastiti UID). U svakom koraku proces šalje tu maksimalnu vrijednost na izlaznim kanalima svim susjedima. Nakon *diameter*(*G*) koraka ako je maksimalna vrijednost jednaka vlastitom UID, proces se proglašava vođom, a u suprotnom nije vođa.

Primjer algoritma za odabir vođe u usmjerenoj mreži



diameter = 4 jer je
distance (5,2) = 4



Formalni model algoritma preplavljivanja

- $states_i$ = (*u*, *max-uid*, *status*, *rounds*)
  u – UID, inicijalno UID za *i*
  max-uid – UID, inicijalno UID za *i*
  status $\in$ {*unknown*, *leader*, *non-leader*}, inicijalno *unknown*
  rounds – cijeli broj, inicijalno 0
- $msgs_i$ – if *rounds* < *diameter* then
  send *max-uid* to all $j \in$ *out-nbrs*
- $trans_i$ – *rounds* := *rounds* + 1
  receive set of UIDs *U* from neighbors
  max-uid := max({max-uid} $\cup$ *u*)
  if *rounds* = *diameter* then
  if *max-uid* = *u* then *status* := *leader*
  else *status* := *non-leader*

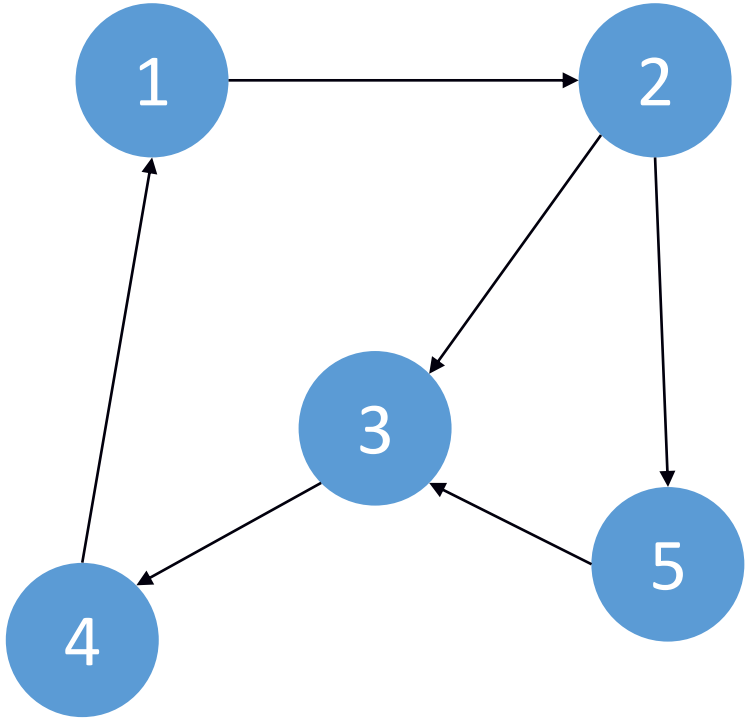
Složenost

- Vremenska
  - Određena vrijednošću *diameter*(*G*)
- Komunikacijska
  - broj poruka = diameter · |E|, gdje je |E| broj usmjerenih grana grafa
  - poruka se šalje na svaku granu za svaki korak algoritma
  - jednostavna optimizacija koja smanjuje broj poruka – proces šalje *max-uid* susjedima samo ako se vrijednost *max-uid* promijeni

Asinkroni model raspodijeljenog sustava

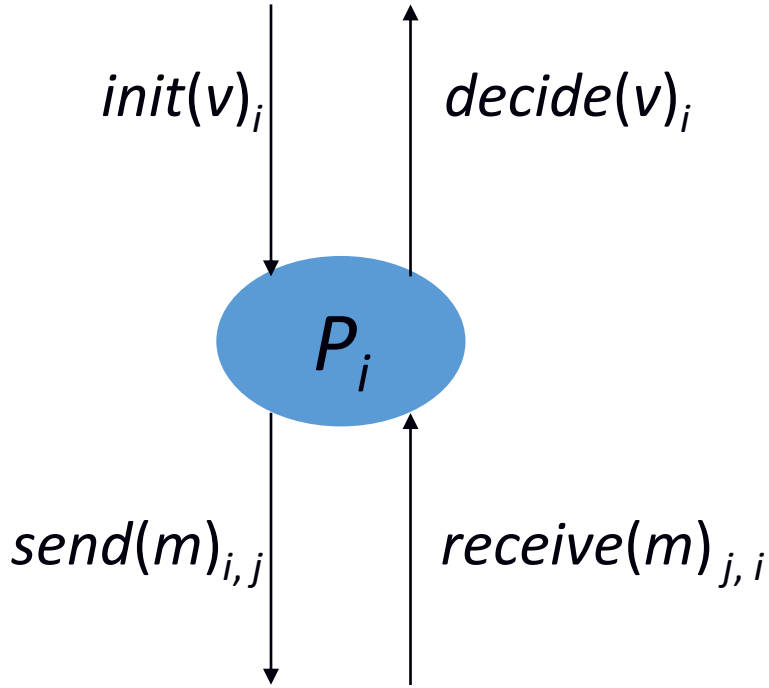
Asinkroni model

- usmjereni graf $G = (V, E)$
- $v_i \in V$, čvor modelira proces
- $e_j \in E$, grana modelira kanal
- $out\text{-}nbrs_i$ – izlazni susjedi
- $in\text{-}nbrs_i$ – ulazni susjedi
- asinkronost izvođenja procesa i komunikacije (razlika u odnosu na sinkroni model)
- svaki proces i svaki kanal se modeliraju I/O automatom



Ulazno/izlazni (I/O) automat

- formalni model za asinkrone sustave
- I/O automat modelira komponentu raspodijeljenog sustava koja je u interakciji s ostalim komponentama
- prijelazi su vezani uz **događaje**
- događaji mogu biti *ulazni*, *izlazni* ili *unutarnji*



primjer procesa u asinkronom raspodijeljenom sustavu

Formalna definicija I/O automata

I/O automat *A* se sastoji od sljedećih komponenti:

- *sig*(*A*) – signatura
  sig(A)={ *in*(*A*), *out*(*A*), *int*(*A*) } – opis ulaznih, izlaznih i unutarnjih događaja)
- *states*(*A*) – skup stanja automata
- *start*(*A*) – skup početnih stanja, *start*(*A*) $\neq 0$
- *trans*(*A*) – funkcija prijelaza,
  npr. (*s*, π, *s*') – *s* i *s*' su stanja, a π je događaj
  - za svako stanje *s* i svaki ulazni događaj π postoji prijelaz (*s*, π, *s'*) $\in$ *trans*(*A*)

Izvođenje automata

- automat *A* se izvodi kao konačan ili beskonačan slijed stanja i događaja, npr.

$$s_0, \pi_0, s_1, \pi_1, s_2, \pi_2, s_2, \ldots \pi_k, s_k, \ldots$$

- $(s_k, \pi_k, s_{k+1}) \in trans(A)$, za svaki $k \geq 0$

Primjer: automat kanala FIFO (1)

- $sig(C_{i,j}) = (send(m)_{i,j}, receive(m)_{i,j}, 0), m \in M$
- states:
  - *queue*, a FIFO queue
- trans:
  - $send(m)_{i,j}$ – dodaj *m* u *queue*
  - $receive(m)_{i,j}$ – preduvjet: *m* je 1. element iz *queue*, posljedica: briši *m* iz *queue*

Primjer: automat kanala FIFO (2)

primjeri izvođenja – tj. slijed događaja (engl. *trace*)

- [null], $send(1)_{i,j}$, [1], $receive(1)_{i,j}$, [null], $send(2)_{i,j}$, [2], $receive(2)_{i,j}$, [null]
- [null], $send(1)_{i,j}$, [1], $send(1)_{i,j}$, [11], $send(1)_{i,j}$, [111]...

Za "*trace*" su važna sljedeća 2 svojstva:

- *A **safety property** is often interpreted as saying that some particular "bad" thing never happens.*
- *A **liveness property** is often informally understood as saying that some particular "good" thing eventually happens.*

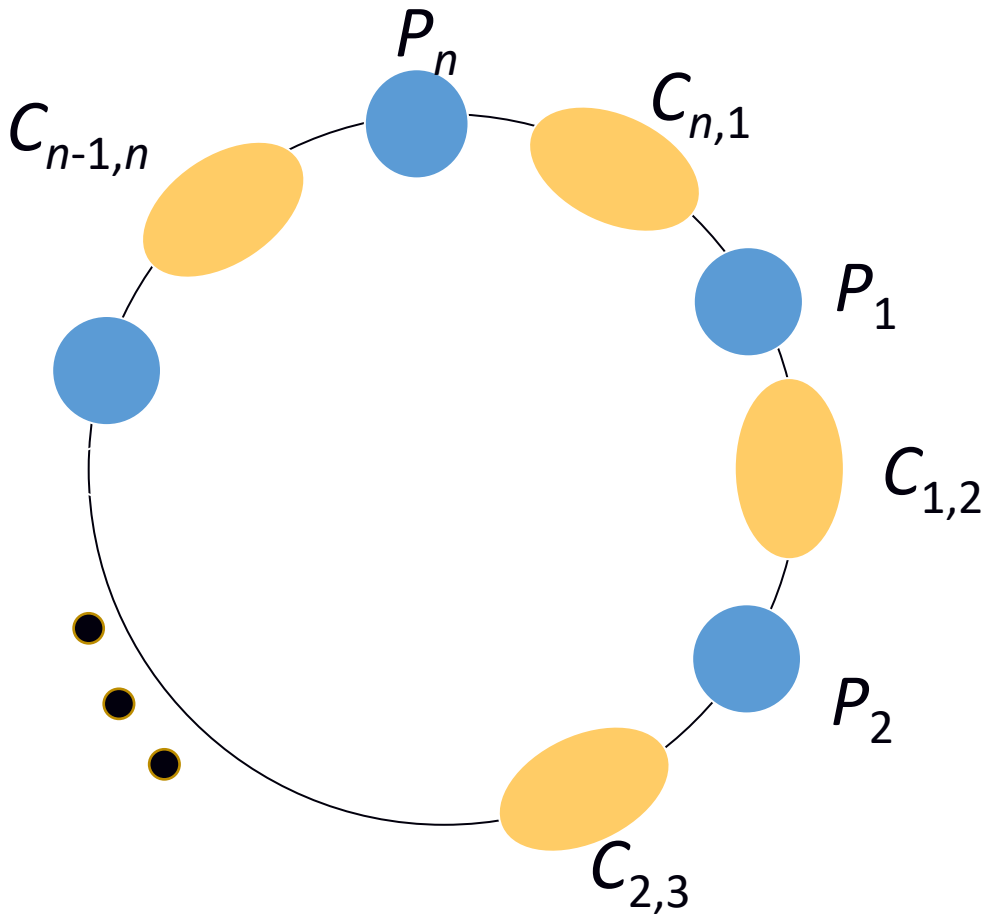
(prema N. Lynch)

Primjeri asinkronog modela

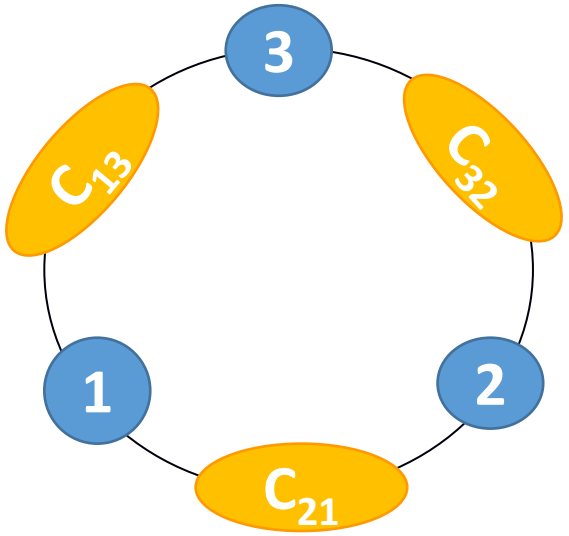
Odabir vođe u asinkronoj mreži

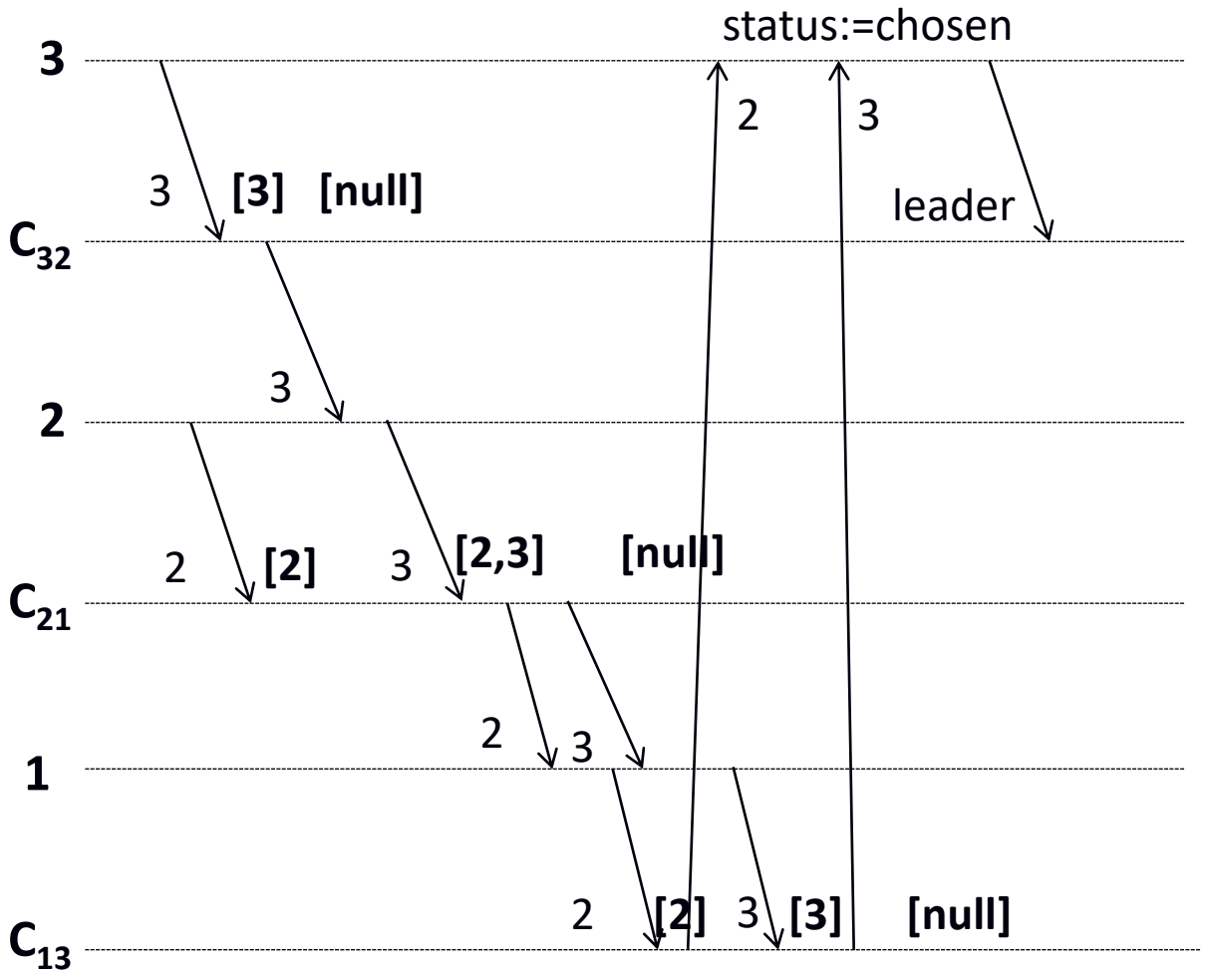
Definicija problema

- izabrati “vođu” među procesima u mreži
- samo 1 proces mijenja status u *leader*
- adaptacija sinkronog algoritma – svaki proces ima ulazni spremnik koji može primiti maksimalno *n* poruka (poruke se mogu gomilati zbog asinkronosti komunikacije)
- procesi: modelirani I/O automatom
- kanali: pretpostavka je pouzdani FIFO



Primjer asinkronog prstena i algoritma za odabir vođe





Osnovni algoritam za asinkroni model

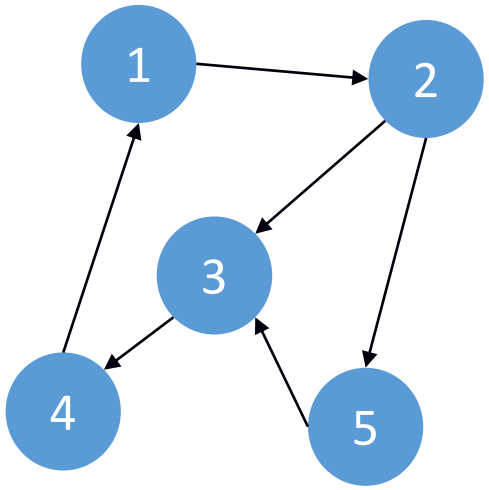
Definicija automata procesa P_i

- input: $receive(v)_{i-1,i}$, v je UID
- output: $send(v)_{i,i+1}$; $leader_i$
- $states_i$:
  - u – UID, inicijalno UID za i
  - *send* – FIFO queue UID-ova veličine n, inicijalno sadrži UID za i
  - $status \in \{unknown, chosen, reported\}$, inicijalno *unknown*
- trans:
  - $send(v)_{i,i+1}$ – preduvjet: v je 1. element iz *send*, posljedica: briši v iz *send*
  - $leader_i$ – preduvjet: *status* = *chosen*, posljedica: *status* := *reported*
  - $receive(v)_{i-1,i}$
    if $v > u$: *add v to send*
    if $v = u$: then *status* := *chosen*
    if $v < u$: *do nothing*

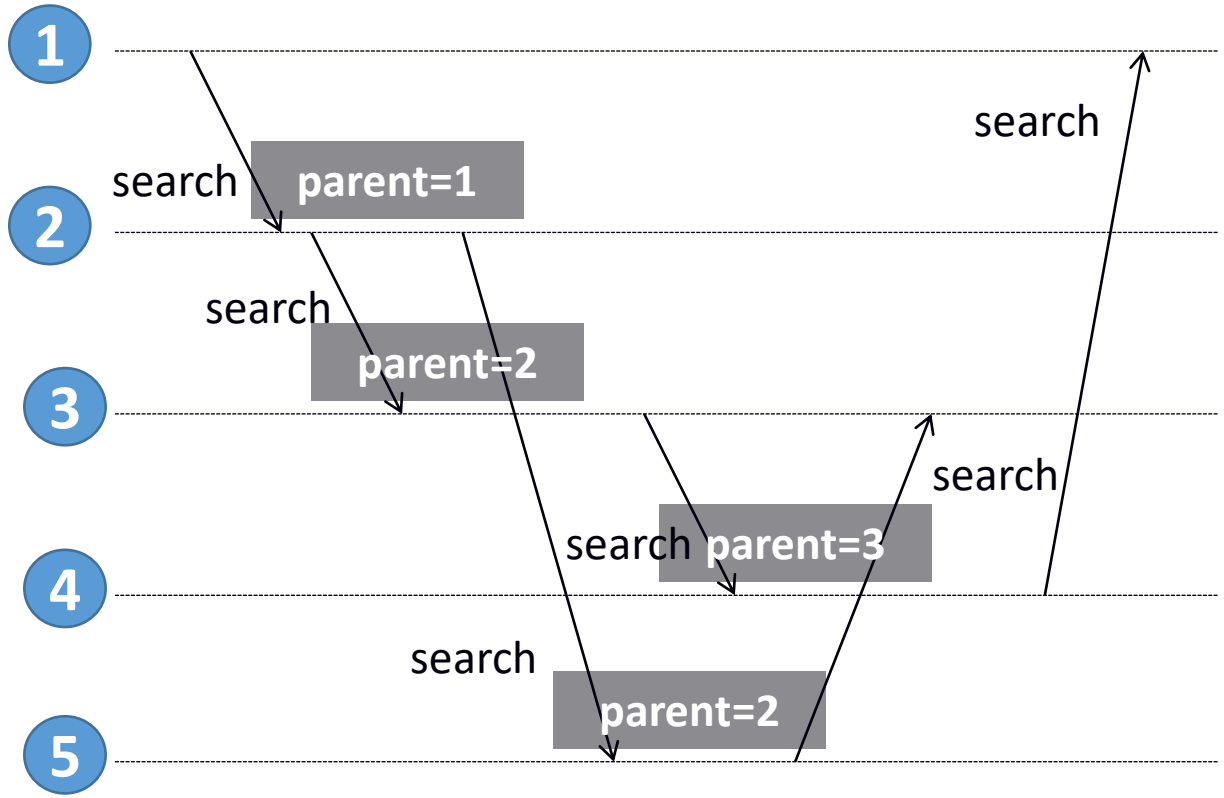
Kreiranje stabla u asinkronoj mreži

- kreiranje stabla s definiranim korijenskim čvorom i_0
- mreža je modelirana grafom $G(V, E)$ koji je usmjeren i povezan
- procesi ne znaju dijametar mreže
- cilj: svaki proces treba odrediti prethodnika (*parent*)
- Skica algoritma *AsynchSpanningTree*
  - Inicijalno je i_0 označen. i_0 šalje *search* svim izlaznim susjedima. Kada proces primi *search* taj proces postaje označen, odabire jedan od susjeda od kojih je primio poruku za *parent* i šalje *search* svim svojim susjedima.

Primjer algoritma *AsynchSpanningTree*



$i_0 = 1$



AsynchSpanningTree

Definicija automata procesa P_i

- input: *receive*(*"search"*)$_{j,i}$, $j \in$ *nbrs*
- output: *send*(*"search"*)$_{i,j}$, $j \in$ *nbrs; parent*(j)$_i$, $j \in$ *nbrs*
- *states*$_i$:
  - *parent* $\in$ *nbrs* $\cup$ {*null*}, inicijalno *null*
  - *reported* – boolean, inicijalno false
  - za svaki $j \in$ *nbrs* postoji
    send(j) $\in$ {*search*, *null*}, inicijalno *search ako je* $i = i_0$ inače *null*
- trans:
  - *send*(*"search"*)$_{i,j}$ – preduvjet: *send*(j) = *search*, posljedica: *send*(j) := *null*
  - *parent*(j)$_i$ – preduvjet: *parent = j, chosen = false*, posljedica: *reported* := *true*
  - *receive*(*"search"*)$_{j,i}$
    if $i \neq i_0$ *and parent = null*
    parent := *j*
    for all $k \in$ *nbrs* \ {*j*}
    send(k) := *search*

Literatura

- A.D. Kshemkalyani, M. Singhal: Distributed Computing: Principles, Algorithms, and Systems, *Cambridge University Press*, 2008.
- N. Lynch: Distributed Algorithms, *Morgan Kaufmann Publishers Inc.* 1996

Pitanja za učenje i ponavljanje

- Za koje je svojstvo raspodijeljenih sustava značajna komunikacijska složenost algoritama? Zašto?
  a) replikacijska transparentnost
  b) skalabilnost
  c) otvorenost
- Objasnite model komunikacijskog kanala koji se temelji na uzročnoj slijednosti. Vrijedi li za slijedeći primjer CO ili non-CO i zašto?