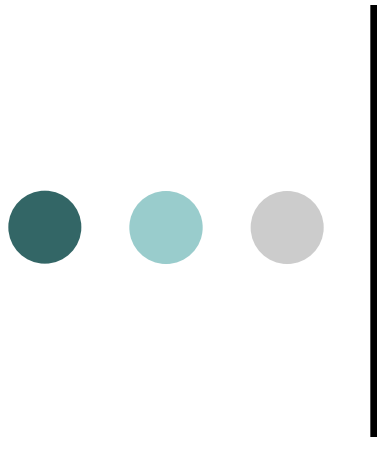


Multimedijalno inženjerstvo – master strukovne studije



Digitalni komunikacioni sistemi: Lekcija 4: MAC protokoli

zima 2019/2020

Branimir M. Trenkić



MAC (Media Access) protokoli

- deljenje komunikacionog kanala -



Deljenje komunikacionog kanala

- Postoje ***komunikacioni kanali*** kojima može biti ***povezan veći broj stanica*** tako da mogu međusobno komunicirati (sa ili bez grešaka)
 - ***radio kanali***
 - određeni oblik žičanih linkova (***koaksijalni kablovi***)
- Ova lekcija se bavi ***fundamentalnim pitanjima*** ***kako zajednički komunikacioni kanal*** – takođe nazvan ***deljeni prenosni medijum*** – ***može biti deljen između različitih stanica***



Deljenje komunikacionog kanala

- ***Dva fundamentalna načina*** deljenja takvih kanala
- **Vremensko deljenje** (*time sharing*)
 - Zasniva se na **međusobnoj koordinaciji svih stanica** u cilju ***vremenske podele prava pristupa*** prenosnom medijumu
- **Frekvencijsko** (prostorno) **deljenje** (*frequency sharing*)
 - ***Podela frekvencijskog opsega između stanica*** na način tako da se ***isključi interferencija*** u slučaju istovremenih prenosa



Deljenje komunikacionog kanala

- Ova lekcija je **fokusirana na vremensku raspodelu**
- Analiziraćemo **dva pristupa**:
 - Vremenska raspodela višestrukog pristupa, **TDMA** (*time division multiple access*) i
 - **Kompetitivni protokoli**
- Oba pristupa su zastupljena u savremenim mrežama



Deljenje komunikacionog kanala

- ***Postupci*** vremenskog i prostornog ***deljenja*** se ***najčešće realizuju*** u okviru ***komunikacionih protokola***
- Protokol?: Skup pravila koji reguliše sve aspekte komunikacije
- Ovi protokoli se nazivaju ***MAC (media access) protokoli***
- Regulišu ***kako više stanica pristupa deljenom prenosnom medijumu***



Deljenje komunikacionog kanala

- ***Od posebnog interesa*** su ***kompetitivni protokoli***
- ***Stanice*** se ***međusobno takmiče*** za pristup mediju ***bez predhodno***
 - ***utvrđenog vremenskog redosleda*** koji određuje kad koja tačka može slati podatke, ili
 - ***prostorne rezervacije*** koja garantuje malu ili nikakvu interferenciju



Deljenje komunikacionog kanala

- Ovi protokoli ***funkcionišu po principu:***

“Stanice šalju podatke saglasno svojoj volji bez intervenisanja bilo kog spolja”

- Kompetitivni protokoli su ***prilagođeni za mreže podataka***, koje karakteriše naizak podataka u grupama i sa ***promenljivim intezitetom***

Mreže sa deljenim medijumom

Satelitske komunikacije

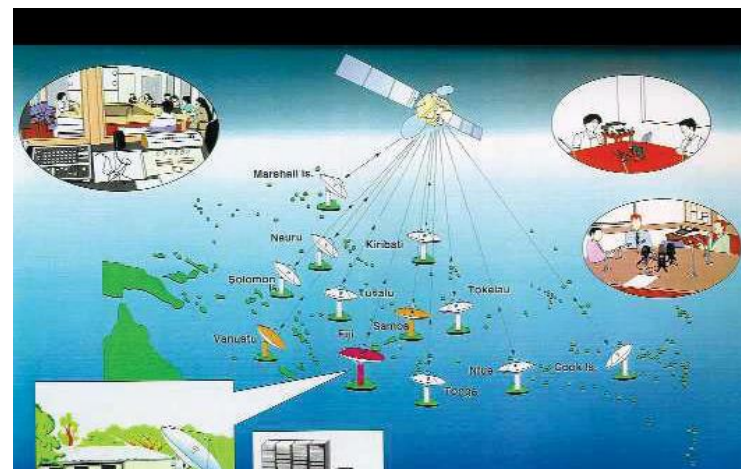
- **Prvi primer** mreže za prenos podataka sa deljenim prenosnim medijumom satelitska mreža - **Alohanet** na Havajima
- Kao rešenje povezivanja računara lociranih na različitim ostrvima



Tim na čelu sa **Normom Abramsonom** 1960. godine sa Havajskog univerziteta

Mreže sa deljenim medijumom

- ***Računar na satelitu*** funkcioniše ***kao komutator (hub)*** koji omogućuje povezivanje stanica na ostrvima
- Paket se prvo šalje po ***uplink-u*** do komutatora, a odatle ***downlink-om*** do željene destinacije
- ***Oba smeru prenosa*** koriste radio prenos a ***prenosni medijum je deljen***



Mreže sa deljenim medijumom

Bežične mreže

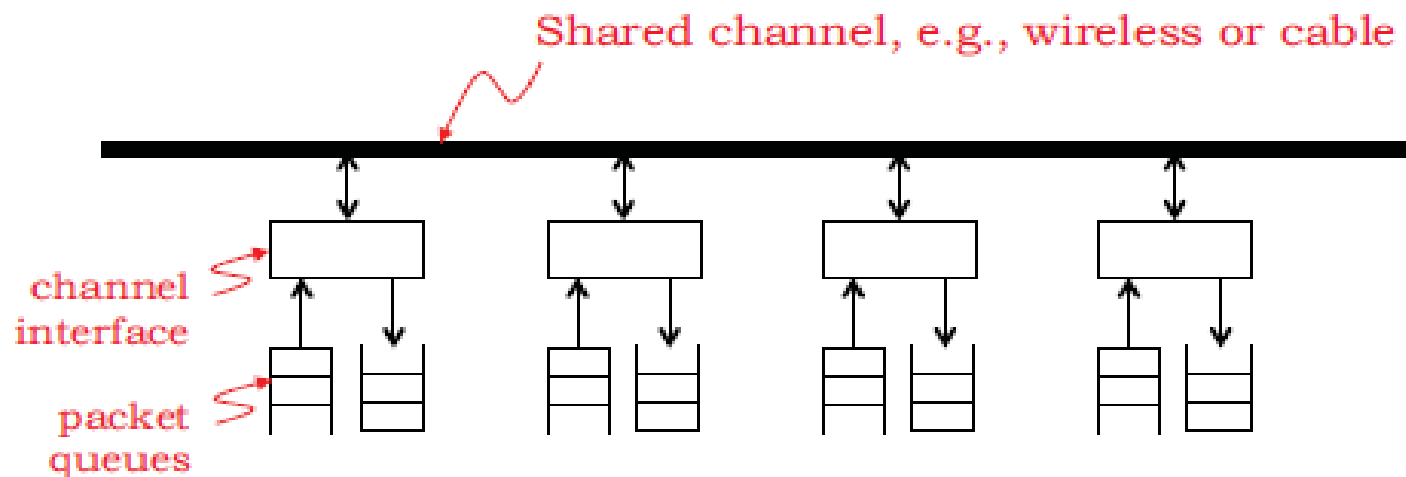
- ***Najčešći primer*** deljenja komunikacionog medijuma ***danas***, i jedini čija ***popularnost raste*** - koristi ***radio prenos***
- Primeri uključuju
 - ***mobilne bežične mreže*** (standardi kao što su EDGE, 3G i 4G),
 - ***bežične lokalne mreže*** (kao što su 802.11, WiFi standard) i
 - različite druge forme radio komunikacija

Mreže sa deljenim medijumom

Kablovske mreže sa magistralom

- **Primer** žičanog deljenog prenosnog medijuma **je Eternet**
- Eternet je **izvorno koristio deljeni prenosni kabl** za međusobno povezivanje većeg broja stanica
- **Svaki paket** poslat kroz Eternet biće **prihvaćen od strane svih** fizički povezanih stanica, stvarajući idealan **deljeni medijum za difuziju**
- Ako dve ili više stanica šalju pakete u preklapajućim vremenskim intervalima – oni će biti primljeni sa greškom

Mreže sa deljenim medijumom



- **Osnovno načelo** u najjednostavnijoj formi: **izbeći koliziju predajnika** – kolizija se dešava kod istovremenih prenosa
- **Traži se:** komunikacioni **protokol** koji omogućuje „**dobre performanse**“



“Dobre performanse”: Šta su mere?

○ **Visoka iskorišćenost**

- **Kapacitet kanala** je ograničeni resurs – treba ga efikasno koristiti
- **Ideal**: korišćenje 100% kapaciteta kanala za prenos paketa
- **Gubitak**: slobodni periodi, periodi kolizije,....

○ **Pravičnost**

- **Pravična podela kapaciteta** između onih koji ga zahtevaju
- Ali ne zahteva ga svaka stanica svo vreme....



“Dobre performanse”: Šta su mere?

- ***Ograničeno kašnjenje***

- ***Gornja granica čekanja*** na uspešan prenos
- Značajno za izohrone komunikacije (npr. ***govor/video***)

- ***Dinamičnost i skalabilnost***

- ***Omogućiti promenu broja stanica***, idealno bez bez promene implementacije u bilo kojoj stanici

Iskorišćenost

- Definicija: **Iskorišćenost** (*utilization*) koju protokol dostigne je definisana kao **količnik ukupnog ostvarenog protoka i kapaciteta kanala**

$$U = \frac{\text{Ukupni protok svih stanica}}{\text{Kapacitet kanala}}$$

- Primer: 4 stanice koje dele kanal čiji je kapacitet 10Mb/s, a ostvareni protok je 1, 2, 2 i 3 Mb/s,
 $U = (1+2+2+3)/10 = 0.8$
- **$0 \leq U \leq 1$**

Iskorišćenost

- $0 \leq U \leq 1$. Može biti **manja od 1 ako**:
 - Stanice imaju spremne pakete za slanje, ali je **protokol neefikasan**
(**“backlogged” stanice** - stanice koje imaju spremne pakete u njihovim predajnim baferima)
 - Ponuđeni **saobraćaj sa nedovoljnim opterećenjem** t.j. nema dovoljno paketa za slanje kako bi se iskoristio pun kapacitet kanala
- Sa “backlogged” stanicama idealnu iskorišćenost je lako dostići – neka jedna stanica šalje pakete svo vreme (**Ali da li bi to bilo fer!**)

Pravičnost

- **Više** verodostojnih **definicija**. **Standardni recept**:
 - Izmeriti protok stanice i u datom vremenskom intervalu = x_i
 - **Posmatramo raspodelu** ovih vrednosti po stanicama
- **Raspodela sa manjom standardnom devijacijom je pravičnija** od raspodele sa većom standardnom devijacijom

Pravičnost

- Dato je N stanica, **indeks pravičnosti F** je definisan na sledeći način:

$$F = \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

- **$1/N \leq F \leq 1$**
 - $F = 1/N$ - jedna stanica preuzima sav kapacitet,
 - $F = 1$ - idealna pravičnost (svi x_i -ovi jednaki)
- Videćemo da **često postoji kompromis između iskorišćenosti i pravičnosti**

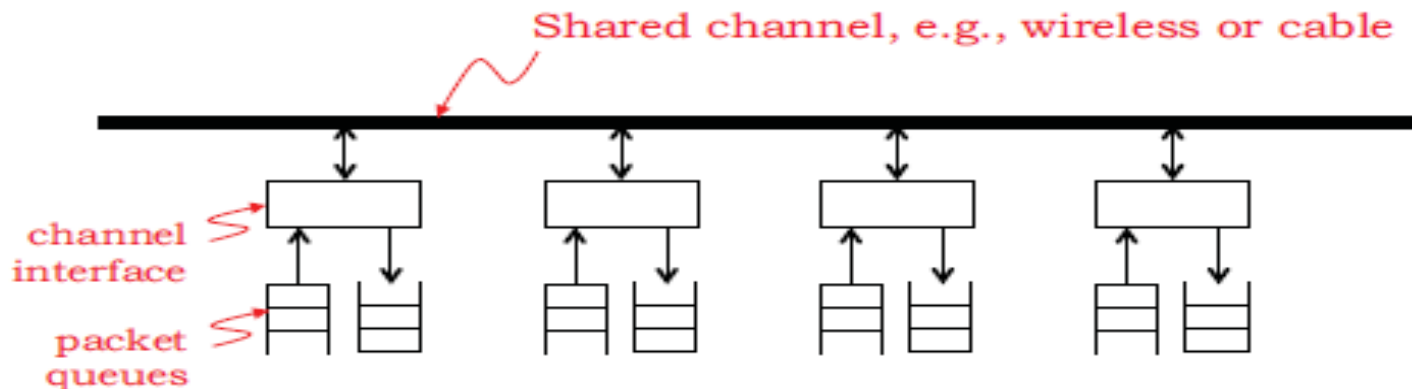


Model

- Vreme je ***podeljeno u slotove*** jednakih dužina, τ
- Stanice mogu ***slati paket samo na početku slota***
- Svi ***paketi su iste dužine*** (ista količina vremena za prenos) koja je ***jednaka celobrojnom umnošku vremenskog slota***
- Ako dve ili ***više stanica šalje paket u okviru istog vremenskog slota***, doći će do njihovog sudara i ni jedan paket neće biti korektno primljen – ***ovu situaciju nazivamo kolizija u prenosu***

Model

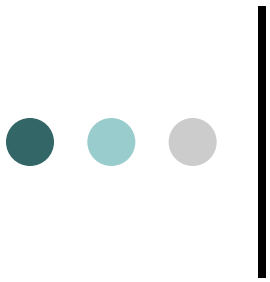
- Predajna stanica **može da detektuje koliziju** u prenosu paketa i može odlučiti da ponovo pošalje taj paket
- **Svaka stanica poseduje predajni bafer** (red čekanja) gde su smešteni **paketi koji čekaju da bi bili poslati** (stanica sa nepraznim baferom se naziva “backlogged”- stanica)





Model

- U zavisnosti od tehnologije, ***stanice mogu da se savršeno „čuju“*** (npr. Ethernet) ili ***uopšte ne*** (satelitske mreže) ili ***delimično*** (WiFi uređaji)



MAC protokoli

MAC protokoli

- ***TDMA (Time Division Multiple Access)***
 - ***Visok stepen pravednosti*** ali ***iskorišćenost prenosnog medijuma može biti niska*** u slučaju ***ne-uniformnog saobraćajnog opterećenja*** stanica
 - ***Nije ga lako implementirati u potpuno distribuiranom obliku*** bez ***centralnog koordinatora*** kada broj stanica dinamički varira
 - Postoje situacije u kojima ***TDMA dobro funkcioniše*** i takvi protokoli se koriste ***u nekim mobilnim mrežama***



MAC protokoli

- *Varijante Aloha protokola*

- *Prvog kompetitivnog* MAC protokola
- *Osnova* za široki spektar upotrebljivih kompetitivnih protokola
- Uključujući onaj koji se koristi *u IEEE 802.11* (WiFi) *standardu*

Time Division Multiple Access

- **Višestruki pristup na bazi vremenske raspodele** (TDMA, *time division multiple access*)
- **„Raspodelu vremena“ nije teško realizovati ako postoji:**
 1. **Centralizovani dodeljivač resursa**
(bazna stanica u mobilnoj mreži)
 2. Način koji omogućuje neki oblik **vremenske sinhronizacije** između stanica

Time Division Multiple Access

- Cilj je *podjednaka podela vremena na*, recimo, ***N stanica***
- Jedan ***način realizacije***:
 - ***Vreme podeliti na*** jednake vremenske intervale – ***vremenske slotove***
 - ***Numerisati ih*** od 0 sa inkrementom 1 i
 - Svakoj ***stanici dodeliti jedinstven identifikator*** (***ID***) u intervalu ***[0, N – 1]***

Time Division Multiple Access

○ Jednostavni **TDMA** protokol **koristi sledeća pravila:**

- A. Ako je redni broj tekućeg slota t , tada stanica sa identifikatorom $ID = i$ može slati paket **ako i samo ako**
1. poseduje paket za slanje, i
 2. $t \bmod N = i$
- B. Ako stanica čiji je red da šalje paket u slotu t **nema sperman paket** za slanje – tada je **taj vremenski slot „izgubljen“**

Time Division Multiple Access

- TDMA šema poseduje neka **dobra svojstva**
- Ona je **pravična** - svakoj stanici je dodeljena ***ista količina vremena*** t.j., isti broj pokušaja za slanje paketa
- Protokol **sprečava mogućnost kolizije** u prenosu paketa - samo jedna stanica ima ekskluzivno pravo slanja u jednom slotu
- ***Uslovi jednostavne implemtacije:***
 - Broj stanica fiksan i
 - Postoji centralni koordinator (master stanica)

Time Division Multiple Access

- TDMA protokol *ima i nedostataka*
- *Stepen iskorišćenosti zavisi od prirode samog saobraćaja*, ako je saobraćaj **neizbalansiran** – **veća je neiskorišćenost** prenosnog medijuma
- Ako stanice šalju *pakete različitih dužina*, obezbeđivanje **korektog rada** TDMA šeme je mnogo **zahtevno**
- TDMA rad u potpuno **distribuiranom okruženju**, **bez master- stanice**, i kada se ukupan broj stanica dinamički menja je **vrlo složen i komplikovan**

Kompetitivni protokoli

- **Kompetitivni protokoli** kao što su Aloha i CSMA **nemaju probleme ove vrste**
- Za razliku od TDMA, **oni se susreću sa** drugim problemom – **problemom kolizije u prenosu paketa**
- **Neizbalansirana priroda saobraćaja**, **favorizuju kompetitivne protokole** u odnosu na TDMA
- **Cilj**: Dodela pristupa medijumu se realizuje na **pravedan način** ali samo među stanicama koje u datom trenutku imaju spremene pakete za slanje

Kompetitivni protokoli

- ***Svaka stanica*** sa izvesnošću ***zna*** samo ***svoje stanje***: da li ima spremne pakete za slanje ili ne
- Rešenja se baziraju na korišćenju – ***randomizacije*** (odlaganja slanja)
- ***Jednostavna*** ali jaka ***ideja***: svaka stanica koja poseduje paket za slanje ***šalje taj paket sa određenom verovatnoćom (p)***
- Svakoj stanici ***dodeliti verovatnoću slanja paketa (p)*** tako da konačan ishod te dodele bude ***prihvatljiva iskorišćenost i pravičnost*** u korišćenju zajedničkog prenosnog medijuma

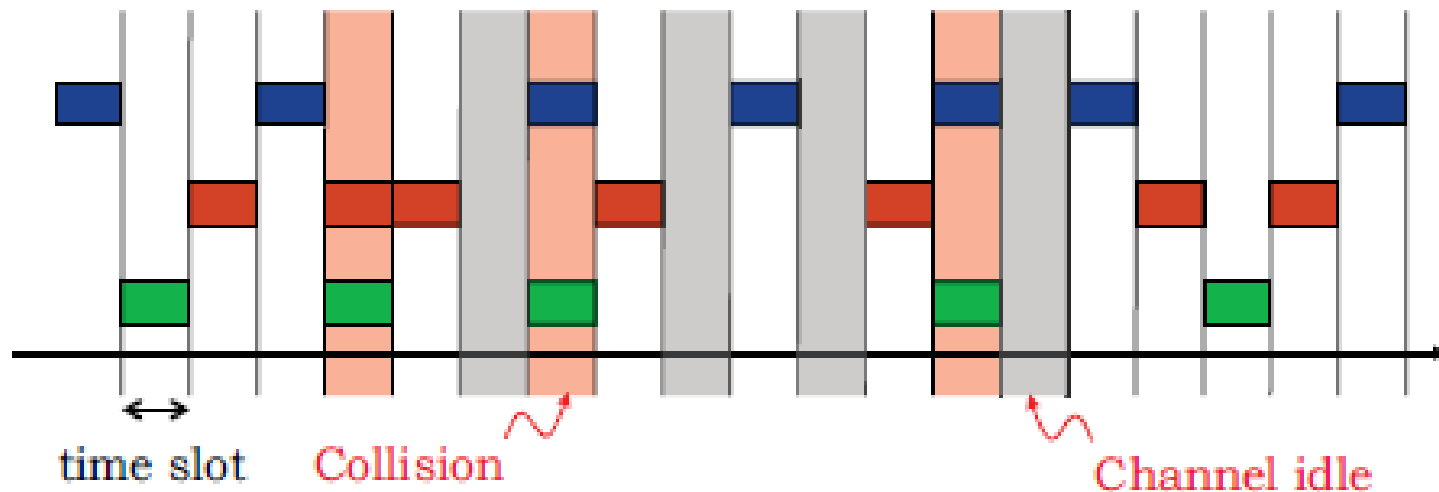
Aloha protokol

- Osnovna varijanta Aloha protokola, sa kojom počinjemo, je vrlo jednostavna:

Ako stanica ima spreman paket za slanje – ona šalje paket iz svog predajnog bafera - sa verovatnoćom p

- **Vreme prenosa** jednog paketa jednako vremenskom intervalu **jednog slot**a – *sinhronizovan model*
- Takav sistem zovemo p -persistent slotovana (vremenski raspodeljena) Aloha

Slot: uspešan, besposlen, koliziran



Protok = Broj nekoliziranih i nepraznih slotova
(paketa) u jedinici vremena

$$U \text{ (sa slike)} = \text{Protok} / \text{Kapacitet kanala} = 13/20 = \\ = \mathbf{0.65}$$

(frakcija slotova u kojima tačno jedna stanica šalje paket)

Slotovana Aloha

- *Kako se određuje p ?*
- O tome ćemo ***kasnije*** - sada analiziramo ***protokol – iskorišćenost kao funkciju od p***
- Predpostavimo da sve stanice imaju spremne pakete za slanje (N) – to čine sa istom verovatnoćom p
- ***Izračunati iskorišćenost*** deljenog prenosnog medijuma ***kao funkciju od N i p***
 - Kako?: ***frakcija slotova u kojima tačno jedna stanica šalje paket (ili verovatnoća da slučajno izabrani slot bude “uspešan”)***

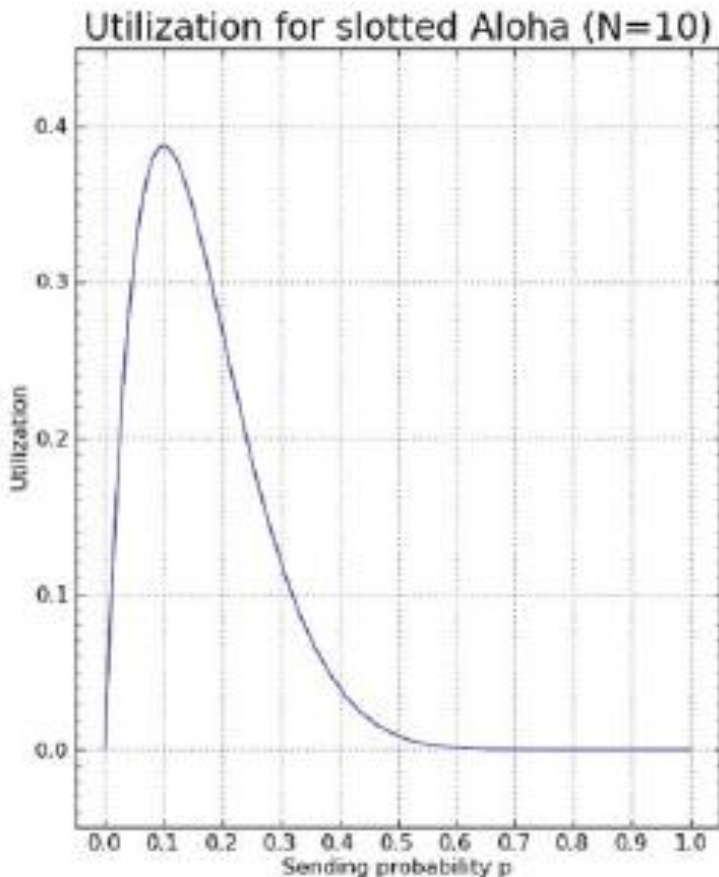
Slotovana Aloha

- Verovatnoća da će ***tačno jedna stanica slati paket u datom slotu?***
 - $P(\text{stanica šalje paket u datom slotu}) = p$
 - $P(\text{stanica ne šalje paket u datom slotu}) = 1 - p$
 - $P(\text{jedna stanica (od } N) \text{ šalje paket u datom slotu}) = p(1 - p)^{N-1}$
 - N načina da se izabere taj jedan predajnik

$$U_{\text{slotovana Aloha}}(p) = Np(1 - p)^{N-1}$$

Slotovana Aloha

- Kako **maksimizirati** U u zavisnosti od p ?



Jednačinu $dU/dp = 0$ treba rešiti po p
Rešenje: $p = 1/N$

$$U_{\max} = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1}$$

$$\text{As } N \rightarrow \infty, U_{\max} \rightarrow \frac{1}{e} \approx 37\%$$

$$\ln\left(\left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1}\right) = (N-1) \ln\left(1 - \frac{1}{N}\right)$$

$$= (N-1) \left(-\frac{1}{N} - \frac{1}{2N^2} - \frac{1}{3N^3} - \dots\right)$$

$$= -1 + \frac{1}{N} + \frac{1}{6N^2} + \frac{1}{12N^3} + \dots$$

$$= -1 \text{ as } N \rightarrow \infty$$



Slotovana Aloha

- **37%** može se **činiti kao mala vrednost** - većina slotova biće praktično neiskoršćeni

Ali,

- Protokol je **ekstremno jednostavan** koji je vrlo **lako implementirati**
- Potpuno je **distribuiran** i
- **Ne zahteva koordinaciju** ili neku drugu komunikaciju između stanica

Dakle,

- Vrlo je **dobra ideja** žrtvovati visoke performanse za jednostavnost a brinuti se o optimizaciji samo ako je neki deo sistema usko grlo u komunikaciji

Slotovana Aloha

- Nedostaje još *mehanizam određivanja vrednosti za p*
- Idealno, *ako sve stanice znaju vrednost N* , za *$p = 1/N$* dostiže se maksimalna iskorišćenost
- Na žalost, to nije jednostavno
 - N je broj stanica koje u tom trenutku imaju spreman paket za slanje
- *Kako stanice mogu odrediti najbolju vrednost za p ?* - Ovo je vrlo važno pitanje

Stabilizirana Aloha

Stabilizacija: Selektovanje “pravog” p

- **“Stabilizacija”** je **postupak podešavanja** da sistem funkcioniše (radi) blizu željene radne (operativne) tačke
- **Stabilizacija Alohe**: određivanje optimalne vrednosti za p – tako da se **iskorišćenost maksimalizuje u zavisnosti od promena saobraćajnog opterećenja** u mreži

Stabilizirana Aloha

Stabilizacija: Selektovanje “pravog” p

- Za $p = 1/N$ maksimalizuje se iskorišćenost
- N – broj “backlogged” stanica
- Broj ovih stanica ***konstantno varira***
 - Saobraćaj sa grupnim naitascima
 - Stanice sa nejednakim saobraćajnim opterećenjem
- Problem: ***Kako dinamički podesiti vrednost p tako da se dostigne maksimalna iskorišćenost?***



Stabilizirana Aloha

Stabilizacija: Selektovanje “pravog” p

- Stabilizacija protokola kao što je Aloha je ***vrlo težak problem***
 - Onemogućena međusobna komunikacija svih stanica, ili
 - Koordinacija uključuje značajno dodatno opterećenje
- Ono što nama treba je „***procedura traženja***“ kojom bi svaka stanica ***konvergirala*** ka najboljoj vrednosti za p

Stabilizirana Aloha

Stabilizacija: Selektovanje “pravog” p

- ***Kako dinamički podesiti vrednost p tako da se dostigne maksimalna iskorišćenost?***
 - ***Postojanje povratne informacije*** - detekcija kolizije sa “oslušivanjem” ili izostankom potvrde
 - Svaka stanica ***vrši svoju procenu za p***
 - Ako se detektuje kolizija znači ***previše je saobraćaja*** – treba ***smanjiti lokalno p***
 - Ako se ne detektuje kolizija verovatno je moguće povećati saobraćaj - treba ***povećati lokalno p***

Stabilizirana Aloha

Procedura: Binarno-eksponencijalni back-off

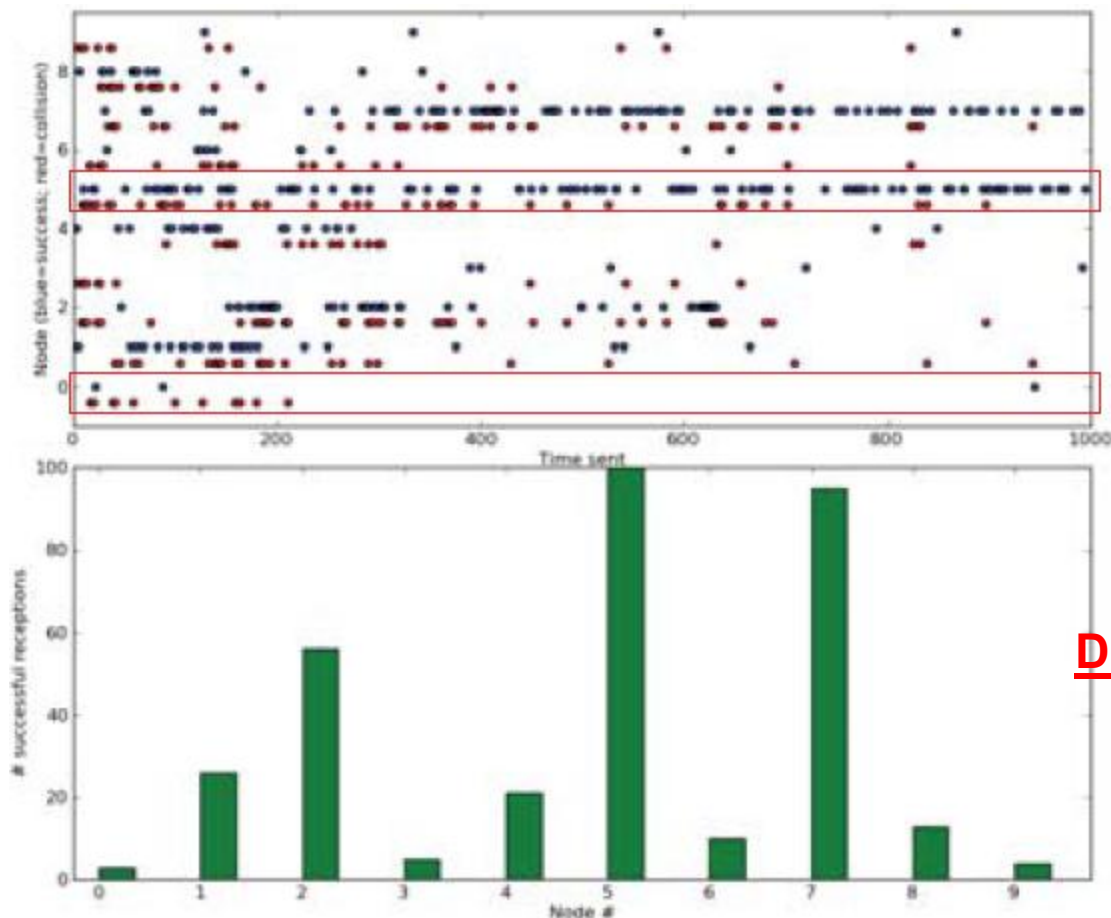
- **Smanjivanje** vrednosti p **usled kolizije**
 - **Podcenjeno N** (broj “backlogged” stanica), t.j. **p je preveliko**
 - Brzo naći korektnu vrednost za p korišćenjem **multiplikativno smanjivanje** ($p \leftarrow p/2$)
 - k uzastopnih kolizija – smanjivanje sa faktorom 2^{-k}
(binarno: 2, eksponencijalni: k , back-off:
manje $p \rightarrow$ više vremena između pokušaja)
- **Povećavanje** vrednosti p **usled uspešnog slanja**

Stabilizirana Aloha

Procedura: Binarno-eksponencijalni back-off

- **Povečavanje** vrednosti p **usled uspešnog slanja**
 - Dok je stanica čekala na slanje, druge stanice su možda ispraznile svoje predajne baferne – i time se **redukovalo ponuđeno** saobraćajno **opterećenje**
 - Ako je **povećanje malo** – **slotovi** mogu biti **neiskorišćeni** (besposleni)
 - Pokušati sa **multiplikativnim povećanjem** vrednosti
$$p \leftarrow \min(2p, p_{\max})$$
 - Ili samo, $p \leftarrow p_{\max}$

Simulacija stabilizirane Alohe



Neke stanice dobro rade

Druge ne!

Dugoročna nepravičnost!

Iskorišćenost = 0.33, Pravičnost = 0.47

Šta je krenulo po zlu?

- **Stagnacija (starvation)**

(čekanje na uslov bez mogućnosti napredovanja)

- **Više uzastopnih kolizija** → ***p* vrlo malo** → ***praktično bez novih pokušaja***
- Rezultat: značajna ***dugotrajna nepravичnost***

- **Rešenje:**

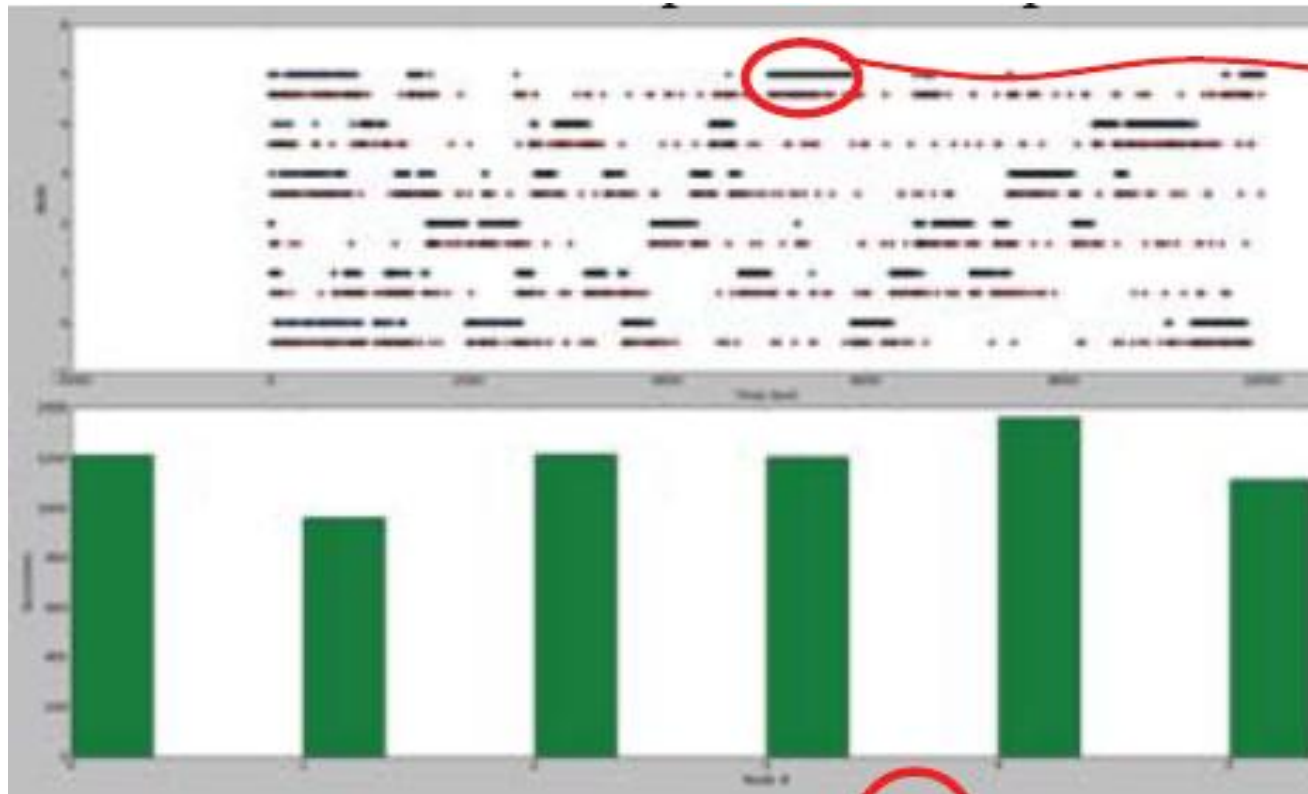
- **Pokušati** sa izmenom pravila smanjivanja:

$$p \leftarrow \max(p_{\min}, p/2)$$

- Izbor $p_{\min} \ll 1/\max(N)$ dobro deluje

Šta je krenulo po zlu?

- Ali postoji i drugi problem: **efekat uzurpacije**



Neke stanice izvesno vreme "uzurpiraju" mrežu

Značajna kratkotrajna nepravichnost

Iskorišćenost = **0.71**, Pravičnost = 0.99

Limitiranje efekta uzurpacije

- Efekat uzurpacije
- **Uspešna stanica** održava **veliko p** (blizu 1)
- **Druge stanice** – **kratkoročno stagniraju**
- **Pokušati** sa izmenom gornje granice u pravilu povećavanja:

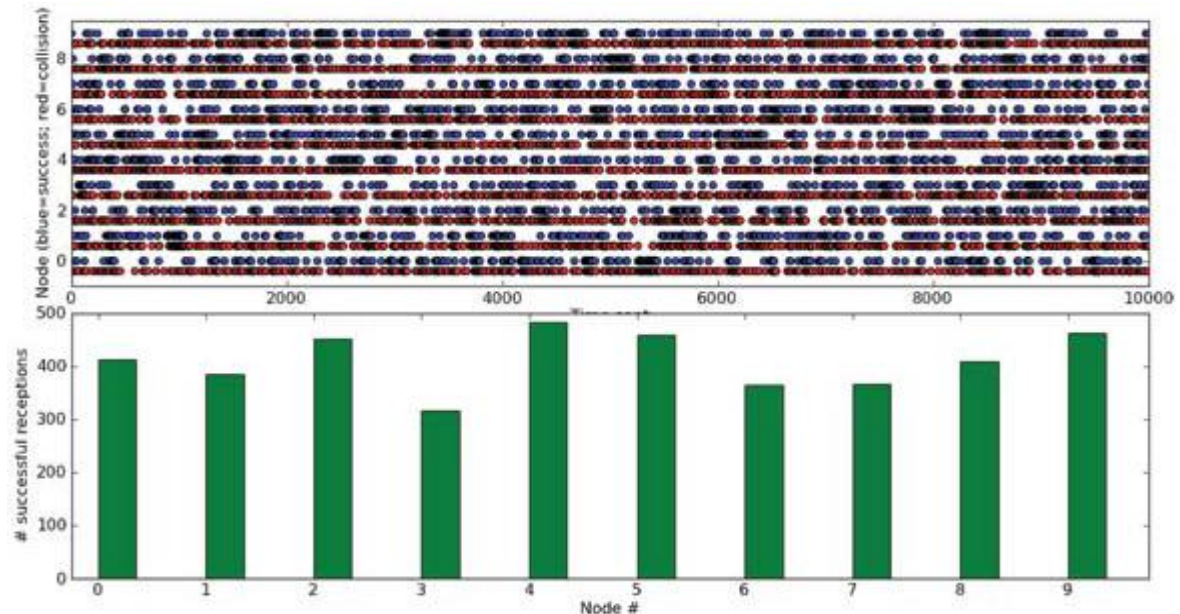
$$p \leftarrow \min(2p, p_{\max})$$

$$U = 0.41$$

$$F = 0.97$$

$$p_{\min} = 0.05$$

$$p_{\max} = 0.8$$





Generalizacija: Neslotovana Aloha

- Šta će se desiti ako *je dužina paketa veća od dužine jednog slot-a?*
 - Faktički, može se postaviti pitanje **zašto je uopšte potrebno slotovanje vremena**
- Šta će se desiti ako **stanice šalju pakete bez obzira na granice slotova?**
 - Dužina slot-a je mnogo manja od dužine jednog paketa
- Ova varijanta protokola se naziva **neslotovana Aloha**



Generalizacija: Neslotovana Aloha

- Model **čiste (pure) neslotovane Alohe** podrazumeva da:
 - A. slotovi** uopšte ne postoje i
 - B. stanice mogu slati** paket u bilo kom trenutku



Generalizacija: Neslotovana Aloha

- Ovaj model može biti **aproksimiran sledećim modelom**:
 - Stanica može **slati** paket **samo na početku svakog slot**
 - **Dužina svakog paketa** jednaka dužini **više slotova**
- (Kada se **dužina paketa** definiše tako da bude **mного veća u odnosu na dužinu jednog slot** – dobija se **neslotovan prenos**)

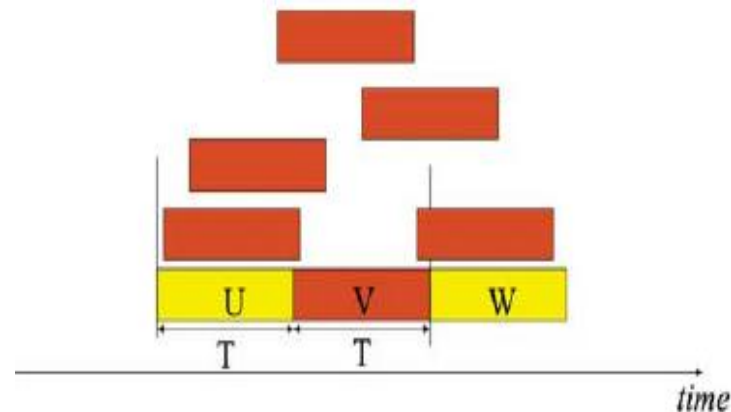


Generalizacija: Neslotovana Aloha

- Predpostavimo da ***svaka stanica šalje pakete dužine T slotova***
- Izračunati ***verovatnoća uspešnog slanja*** u mreži ***sa N „backlogged“ stanica***
 - Svaka stanica sa verovatnoćom ***p*** pokušava da pošalje paket
- Ključna činjenica: Bilo koji paket čiji slanje počinje u ***$2T - 1$*** slotova može imati ***neki oblik preklapanja sa tekućim paketom*** – time može proizvesti koliziju

Generalizacija: Neslotovana Aloha

- Dužina paketa je T slotova
- Slanje počinje na početku slota



- Svaki paket, osim U i W su u koliziji sa paketom V
- Bilo koji drugi paket poslat u bilo kom od **$2T - 1$** slotova je u koliziji sa paketom V –
 - **T slotova u kojima se šalje** V paket i
 - **$T - 1$ slotova** koji **neposredno predhode** periodu slanja V paketa



Generalizacija: Neslotovana Aloha

- *Koja je verovatnoća da ovo slanje bude uspešno – bez kolizije?*
- Na ovaj način se određuje **postignuti protok** kroz komunikacioni kanal
- **Konstatacija sa predhodnog slajda:** Dati paket neće ući u koliziju ako **ostale stanice ne započinju slanje** u $2T - 1$ slotova

Generalizacija: Neslotovana Aloha

- Postupak izračunavanja protoka:
- p - verovatnoća da će „backlogged“ stanica započeti slanje u slotu, i
- $1-p$ - verovatnoća da stanica neće započeti slanje u slotu,
- Postoji $N - 1$ takvih stanica
- Tražena verovatnoća je jednaka $(1 - p)^{(2T - 1)(N - 1)}$
- Postoji N mogućnosti za izbor stanice koja šalje
- Dakle, tražena verovatnoća je $Np(1 - p)^{(2T - 1)(N - 1)}$

Generalizacija: Neslotovana Aloha

- **Iskorišćenost** U je jednaka:

$$\begin{aligned} U &= \text{Protok} / \text{Kapacitet (maksimalan intezitet)} \\ &= Np(1 - p)^{(2T - 1)(N - 1)} / (1/T) \\ &= \mathbf{TNp(1 - p)^{(2T - 1)(N - 1)}} \end{aligned}$$

- *Za koju vrednost p se dobija maksimalna iskorišćenost i koja je to vrednost ($\mathbf{U_{max}}$)?*
- Diferenciramo U po p i primenom nekih algebarskih relacija:
- Rezultat $\mathbf{p = T/((2T - 1)e)}$, za veliko N

Generalizacija: Neslotovana Aloha

- Šta se dešava ***u čistoj neslotovanoj Alohi?***
- Koristimo dobijeni rezultat + ključna pretpostavka
- ***Određujemo dužinu paketa T tako da bude mного veća od 1***
 - Irelevantno je za protok da li se slanje paketa započinje na granicama slotova ili ne
- Maksimalna iskorišćenost, u tom slučaju, za veliko N , jednaka je **$1/(2e) \approx 0.18$**
- Vrednost ***jednaka polovini U_{max} čiste slotovane Alohe*** (dužina paketa jednaka dužini slotova)



CSMA

- *Višestruki pristup sa osluškivanjem nosioca* (**CSMA**, *Carrier Sense Multiple Access*)
- **Konstatacija**: Stanice koje koriste zajednički medijum, *ne mogu da „čuju“ jedne druge*
 - To je **tačno** - satelitskim mrežama
 - To decidirano **nije tačno** - Ethernet
 - To je **ponekad tačno a ponekad nije** tačno – bežične mreže
 - Ako postoje tri stanice A, B i C, A i C mogu biti **skriveni terminali**



CSMA

- **Osnovna ideja**: Stanica šalje paket samo kada **smatra da je medijum slobodan**
- Mogućnost da se **prvo oslušne prenosni medijum** pre pokušaja slanja - **redukuje broj kolizija** i **poboljšava** njegovu **iskorišćenost**
- Tehnički pojam - **carrier sense**: stanica, **pre pokušaja slanja**, može da **oslušne medijum** da ustanovi da li **nivo napona ili nivo signala** veći od uobičajnog kada se medijum ne koristi



CSMA

- ***Ako stanica ustanovi da je u toku prenos nekog drugog paketa - smatra da je medijum zauzet i **odlaže slanje svog paketa** sve dok stanica ne ustanovi da je medijum slobodan***



CSMA v.s. Aloha

Prednost CSMA u odnosu na stabiliziranu Aloha

- Dobra ***iskorišćenost nije više uslovljena*** time da ***dužina paketa*** bude ***jednaka dužini*** trajanja jednog ***slot***
- Paketi, takođe, ***mogu da variraju u dužini***



CSMA v.s. Aloha

Prednost CSMA u odnosu na stabiliziranu Aloha

- **Problem u CSMA:** *više* „backlogged“ **stanica** može skoro ***istovremeno detektovati*** da je medijum ***slobodan***
- To će prouzrokovati da ***sve one započnu slanje*** paketa skoro istovremeno i ***desiće se kolizija***
- ***Neophodna je implementacije nekog od back-off mehanizama***
- Iz ovih razloga, CSMA ***ne može dostići 100%*** ⁶³***iskorišćenost*** medijuma

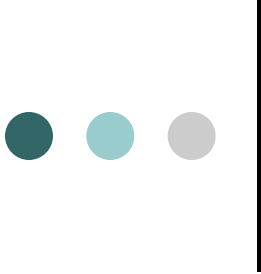


CSMA v.s. Aloha

Prednost CSMA u odnosu na stabiliziranu Alohu

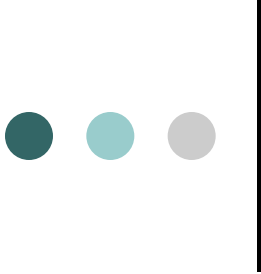
Ali i pored toga

- **CSMA dostiže veću iskorišćenost** prenosnog medijuma **od stabilizirane slotovane Alohe** implementiranih na jednom prenosnom medijumu



CSMA – prilozi za implementaciju

- *Verijante Aloha protokola*
- Svaka „backlogged“ stanica šalje paket **sa verovatnoćom p**
(posao protokola je da se odredi optimalna vrednost za p)
- *CSMA protokol*
- Paket se šalje **sa verovatnoćom p** ali samo ako je medijum slobodan



CSMA – prilozi za implementaciju

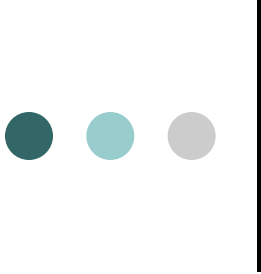
- Mnogi kompetitivni protokoli u praksi **rade malo drugačije**
- IEEE 802.3 (Ethernet) i 802.11 (WiFi) standardi
- Umesto da svaka stanica šalje paket sa određenom verovatnoćom u svakom vremenskom slotu – ***koriste koncept kompetitivnog prozora***
- ***Kako ova šema funkcioniše?***

CSMA – prilozi za implementaciju

- Šema kompetitivnog prozora:
- **Svaka stanica** poseduje **svoju vrednost za širinu prozora - CW**
 - CW može da varira između **CWmin** i **CWmax**
 - CWmin može biti **1**
 - CWmax može biti, recimo, **1024**
- **Kada** stanica **odluči da započne slanje**, ona **generiše slučajan broj r** iz intervala **$[1, CW]$**
- Nakon toga, **šalje paket u vremenskom slotu $C + r$** , gde je **C** tekući vremenski slot

CSMA – prilozi za implementaciju

- Šema kompetitivnog prozora:
- *Ako se desi kolizija*
 - Stanica **duplira vrednost CW**
- *U slučaju uspešnog prenosa*
 - Stanica **polovi vrednost CW** (ili, često iz praktičnih razloga **direktno resetuje na CW_{min}**)

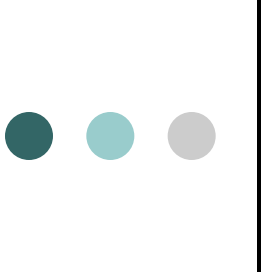


CSMA – prilozi za implementaciju

- Ova šema je slična onoj koju smo već analizirali
- **Dupliranje CW** je analogno **polovljenju verovatnoće** slanja paketa
- **Polovljenje CW** odgovara **dupliranju verovatnoće**
- **CW ima donju granicu - verovatnoća slanja ima gornju granicu**
- Ali **postoji ključna razlika!**

CSMA – prilozi za implementaciju

- **Slanje paketa** korišćenjem kompetitivnog prozora je **saglasno uniformnoj raspodeli** a ne **geometrijskoj raspodeli**
- Verovatnoća da će se **prvi pokušaj slanja paketa desiti t slotova nakon trenutnog**
- ***U predhodnom (Aloha) slučaju***
 - Ima geometrijsku raspodelu; jednaka **$p(1 - p)^{t-1}$**
- ***U slučaju korišćenja kompetitivnog prozora***
 - ona je jednaka **$1/CW$** za $t \in [1, CW]$ ili **0** inače



CSMA – prilozi za implementaciju

- *U slučaju korišćenja kompetitivnog prozora*
 - *Svakoj stanici je zajamčen pokušaj slanja unutar CW slotova*
- *U predhodnom slučaju*
 - Postoji šansa, mada se eksponencijalno smanjuje, da stanica *u okviru bilo kog fiksnog broja slotova ne pošalje paket*



Ethernet

- × Kontrola pristupa medijumu (CSMA/CD)
- × Ethernet je multipoint linija i zbog toga je neophodan mehanizam za **kontrolu pristupa** deljivom **prenosnom medijumu**
- × Kod Ethernet-a se za tu namenu koristi tehnika izbegavanja kolizija poznata pod nazivom:

CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection*)



Ethernet

- Kontrola pristupa medijumu (CSMA/CD)
- **CS** (*Carrier Sense*) označava **moгуćnost stanice da osluškuje liniju**, odnosno da detektuje prisustvo signala na liniji
- **CSMA** znači da pre slanja podataka stanica osluškuje liniju i **odlaže početak predaje** sve dok je linija zauzeta
- **CD** (*Collision Detection*) se odnosi na sposobnost stanice da **detektuje pojavu kolizije** na liniji

Ethernet

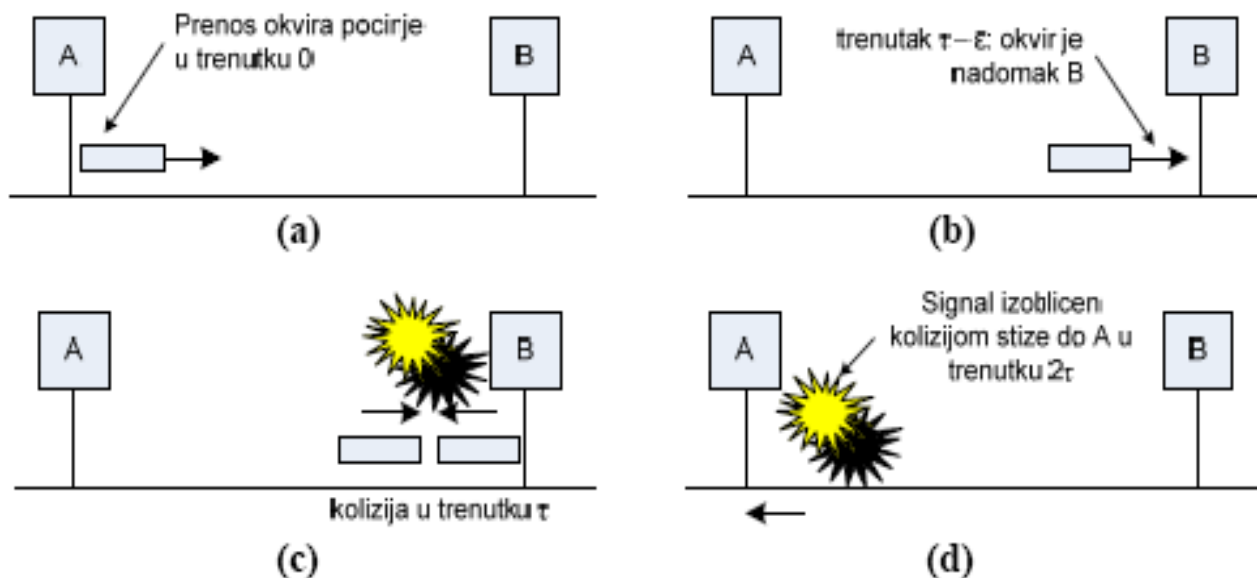
- Kontrola pristupa medijumu (CSMA/CD)
- **CSMA/CD** znači **mehanizam** izbegavanja kolizija koji sadrži sledeće korake:
 1. Ako je **medijum slobodan** počni sa predajom
 2. Ako je **medijum zauzet**, produži sa osluškivanjem sve dok medijum ne postane slobodan, a onda odmah počni sa prenosom
 3. Ako u toku predaje **detektuješ koliziju**, odmah prekini predaju
 4. Ako u toku predaje detektuješ koliziju, prekini predaju, sačekaj neko proizvoljno vreme, a onda pokušaj ponovo (vрати se na korak 1)

Ethernet

- Efekat konačne brzine prostiranja signala
- **Brzina propagacije** signala kroz kabl je konačna
 - Na primer, signal prevali put kroz kabl dužine **1 km** za oko **5 ns**
- To znači da **indikacija "linija je slobodna"**, koju dobija neka stanica **ne mora** uvek da bude **tačna**
- Može se desiti da je neka druga stanica već započela predaju, ali njen signal još uvek nije stigao do prve stanice

Ethernet

○ Efekat konačne brzine prostiranja signala



Predpostavimo:

- ***vreme prostiranja signala*** od stanice A do stanice B iznosi τ
- dužina okvira koji stanica A šalje je dovoljno mala tako da njegova **predaja traje manje od τ**

Ethernet

- Efekat konačne brzine prostiranja signala
- Zaključak:
- Da bi se ovakve situacije predupredile, **Ethernet standard** zahteva da svaka predaja mora da traje najmanje 2τ
 - gde je τ vreme propagacije signala kroz kabl maksimalne dužine – vreme ranjavanja
 - 2τ = osnovni vremenski interval (**slot time**)



Ethernet

- Efekat konačne brzine prostiranja signala
- Zaključak:
- Nemogućnost detekcije kolizije pri prenosu kratkih okvira glavni je razlog za postojanje ograničenja u pogledu minimalne dužine okvira - **64 bajta**
- Kako se došlo do ove minimalne dužine okvira?