

Рачунарске мреже

Александар Картељ

kartelj@matf.bg.ac.rs

Наставни материјали су преузети од: TANENBAUM, ANDREW S.; WETHERALL, DAVID J., COMPUTER NETWORKS, 5th Edition, © 2011
и прилагођени настави на Математичком факултету, Универзитета у Београду.

Slide material from: TANENBAUM, ANDREW S.; WETHERALL, DAVID J., COMPUTER NETWORKS, 5th Edition, © 2011.

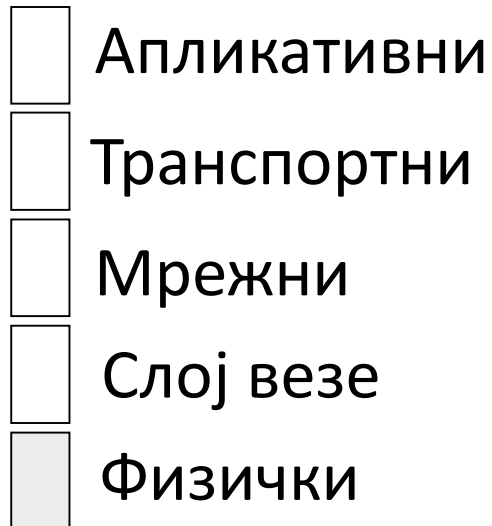
Electronically reproduced by permission of Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey

Физички слој

Преглед

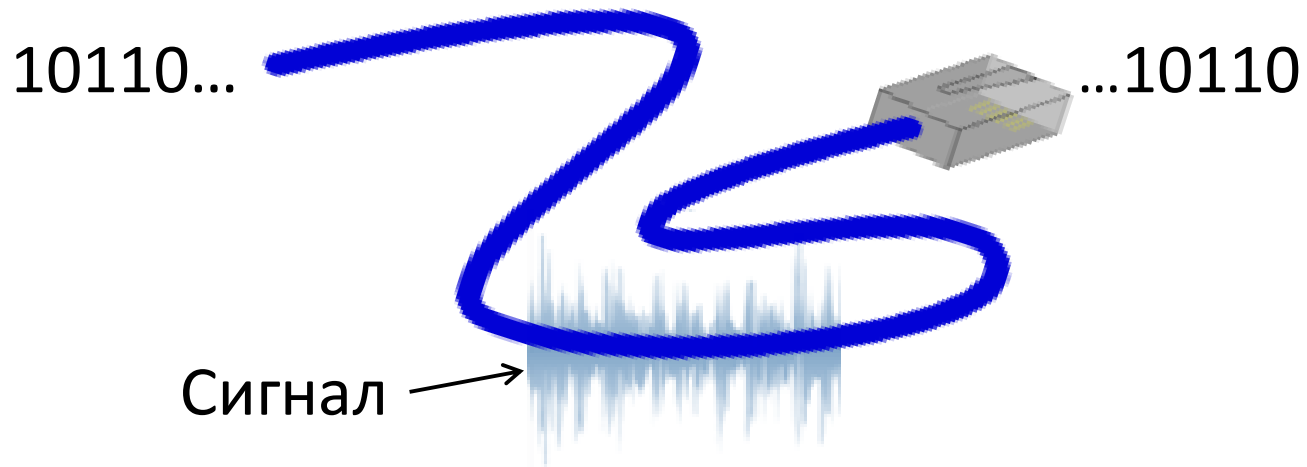
Где смо сада?

- Прошли смо брзи преглед свега, и сада се пењемо од физичког ка вишим слојевима...
- Користићемо хибридну приступ са 5 слојева



Домен физичког нивоа

- Тиче се слања порука путем комуникационог канала
 - Жице шаљу аналогни (физички) сигнал
 - Ми желимо да шаљемо битове, који су дигитални



Теме

1. Карактеристике преносног медијума
 - Електрична жица, оптички кабл, бежично слање
2. Слање сигнала
 - Проток, слабљење, шум, ...
3. Технике модулације
 - Репрезентација битова, шум
4. Природна ограничења
 - Најквист-Шенон теорема, теорија информација

Поједностављени модел

- Уопштени физички канал – карактеристике:
 - Проток (или брзина, капацитет) мерен као битови/секунди b/s
 - Кашњење у секундама



- Друге битне карактеристике:
 - Да ли канал емитује или не, расподела вероватноћа грешака, ...

Кашњење порука

- Кашњење подразумева време потребно да порука стигне на циљну адресу

- Кашњење преноса (transmission delay): време потребно да се М-битовна порука постави на комуникациони канал

$$T\text{-delay} = M \text{ (b)} / V \text{ (b/s)} = M/V \text{ s (секунди)}$$

- Кашњење пропагације (propagation delay): време потребно да битови прођу кроз комуникациони канал

$$P\text{-delay} = \text{дужина канала/брзина сигнала (2/3 c)} = X \text{ s (секунди)}$$

*c – брзина светлости (није свуда 2/3, различито за WiFi, оптику, ...)

- Сабирањем добијамо укупно време: $L = T+P = M/V + P$

Јединице мере

Озн.	Вред.	Озн.	Вред.
K(ilo)	10^3	m(illi)	10^{-3}
M(ega)	10^6	μ (micro)	10^{-6}
G(iga)	10^9	n(ano)	10^{-9}

- “B” ознака бајта, “b” ознака бита

Примери кашњења – израчунати?

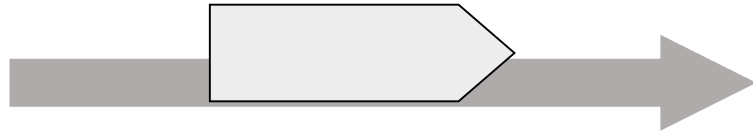
- “Dialup” са телефонским модемом
(слање ка рачунару у истом граду нпр):
 - $P = 5 \text{ ms}$, $V = 56 \text{ kb/s}$, $M = 1250 \text{ B}$
- Широкопојасна веза – кабловска или DSL
(слање кроз државу):
 - $P = 50 \text{ ms}$, $V = 10 \text{ Mb/s}$, $M = 1250 \text{ B}$

Примери кашњења - решење

- “Dialup” са телефонским модемом (слање ка рачунару у истом граду нпр):
 - $P = 5 \text{ ms}$, $B = 56 \text{ kb/s}$, $M = 1250 \text{ B}$
 - $L = 5 \text{ ms} + (1250 \times 8) / (56 \times 10^3) \text{ s} = 5 \text{ ms} + \underline{179 \text{ ms}} = 184 \text{ ms}$
- Широкопојасна веза – кабловска или DSL (слање кроз државу):
 - $P = 50 \text{ ms}$, $B = 10 \text{ Mb/s}$, $M = 1250 \text{ B}$
 - $L = 50 \text{ ms} + (1250 \times 8) / (10 \times 10^6) \text{ s} = \underline{50 \text{ ms}} + 1 \text{ ms} = 51 \text{ ms}$
- Дугачка веза или мали проток производе веће кашњење
 - Обично једна од компоненти кашњења P или T је доминантна

Проток-кашњење производ BDP (Bandwidth-Delay Product)

- Порукe заузимају простор на каналу!



- Количина података присутних на каналу у неком моменту је BDP
- Ако бисмо посматрали податак као материју, онда је ово запремина (количина) материје
$$BDP = B \times D$$
 - Мери се у битовима
 - Мали за канале у локалним мрежама нпр. WiFi, велики за „велике дебеле“ канале

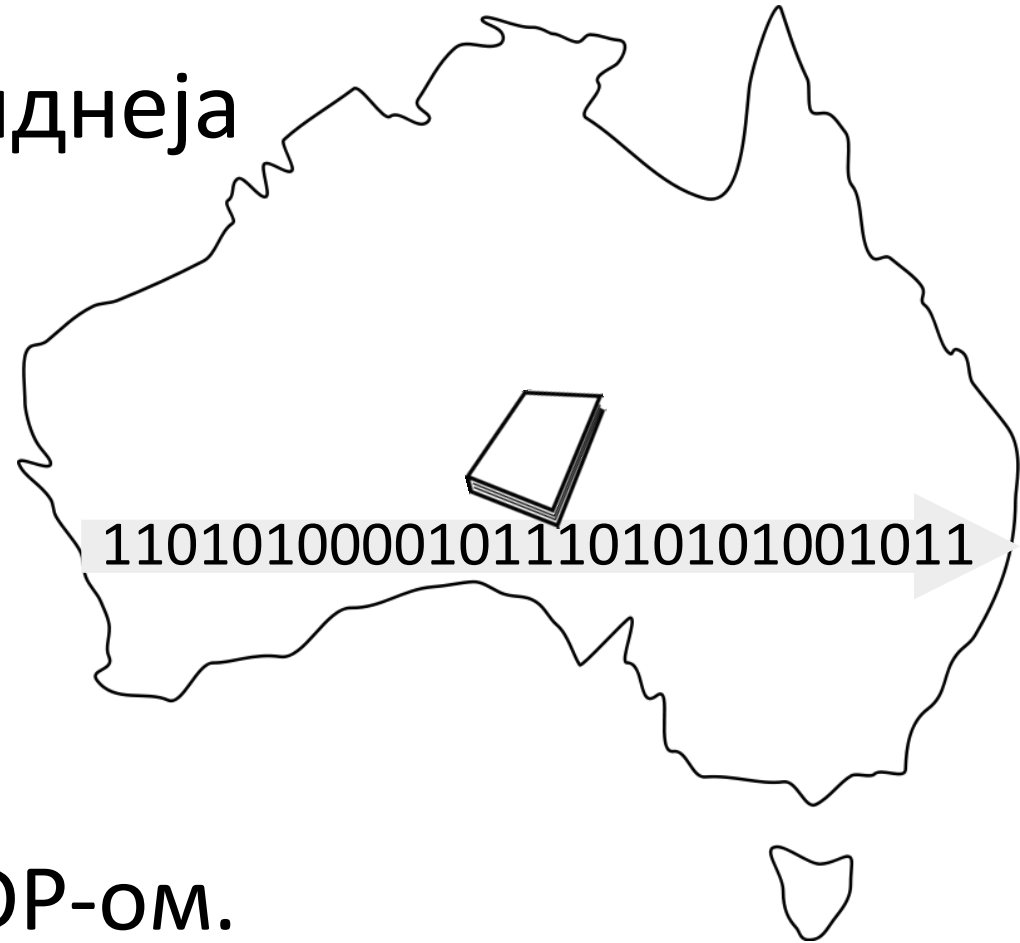
BDP пример

- Слање нпр. од Перта до Сиднеја
- Оптички канал
- Дугачак канал
 $V=40 \text{ Mb/s}$, $D=50 \text{ ms}$



BDP пример

- Слање нпр. од Перта до Сиднеја
- Оптички канал
- Дугачак канал
 - $V=40 \text{ Mb/s}$, $D=50 \text{ ms}$
 - $\text{BDP} = 40 \times 10^6 \times 50 \times 10^{-3} \text{ b}$
 - $= 2000 \text{ Kb}$
 - $= 250 \text{ KB}$
- Ово се сматра великим BDP-ом.



Физички слој

Типови комуникационих медија (канала)

Комуникациони медијум

- Медијум пропагира сигнал са информацијама у виду битова
- Три основна типа медија су:
 - Жичани
 - Оптички (оптички каблови)
 - Бежични

Да ли смо нешто заборавили?

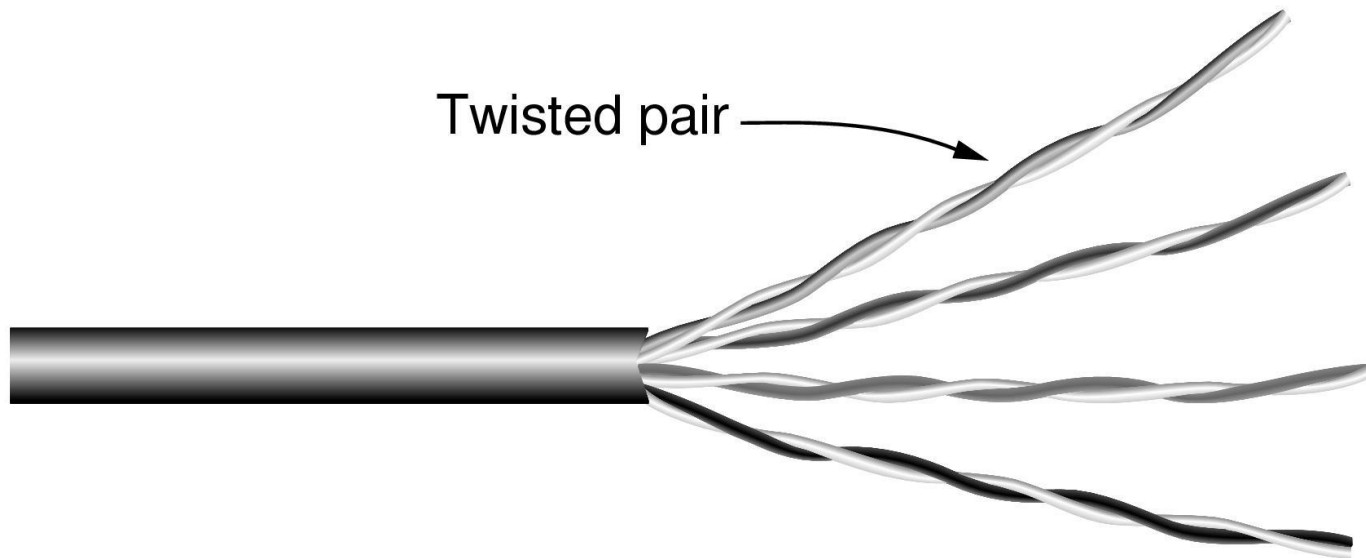
- Зашто не бисмо слали податке на хард диску или DVD-у поштом?
 - Нпр. кутија са 1000 дискова од по 800GB (6400 Tb)
 - Испорука траје један дан (86,400 s)
 - Проток је око 70 Gb/s.
- Овај проток не може да оствари ниједна дужа мрежа!
- Шта је, међутим, лоше овде?

Жичани – упредена парица

(UTP – unshielded twisted pair)

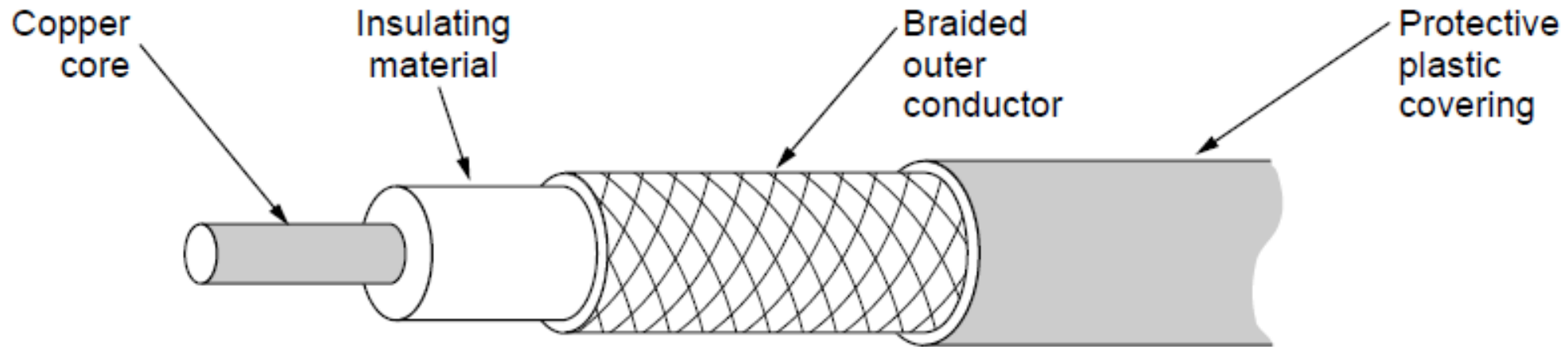
- Веома чест; користи се за LAN каблове и код телефонских линија
 - Увртањем се умањују сметње

UTP кабл категорије 5
са 4 упредена пара



Жичани – коаксијални кабл

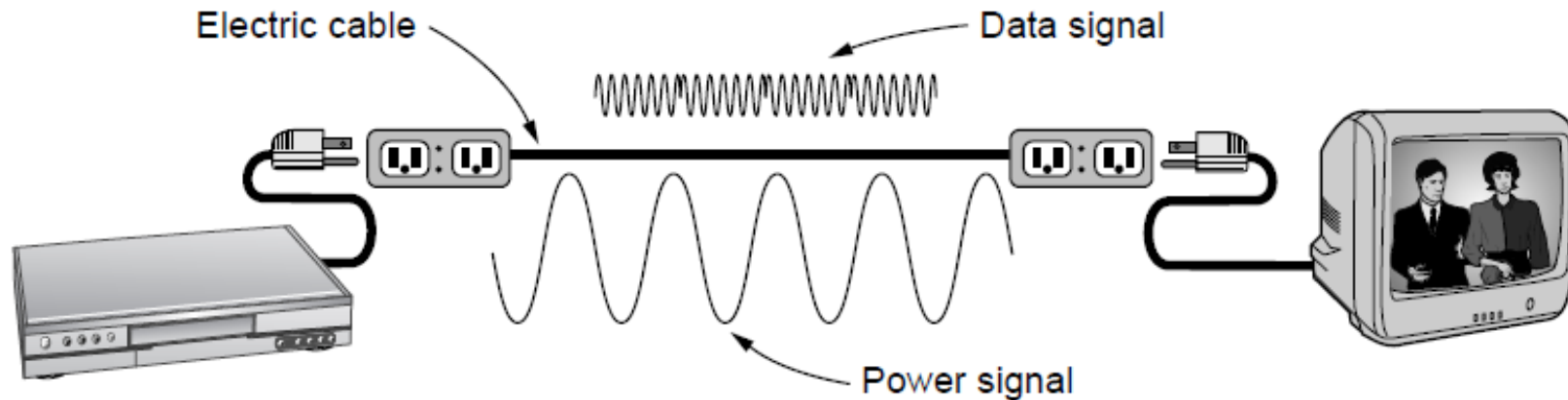
- Такође чест. Боља заштита даје и боље перформансе



- Други типови жица такође могу да преносе податке, нпр. електричне жице за провођење струје.

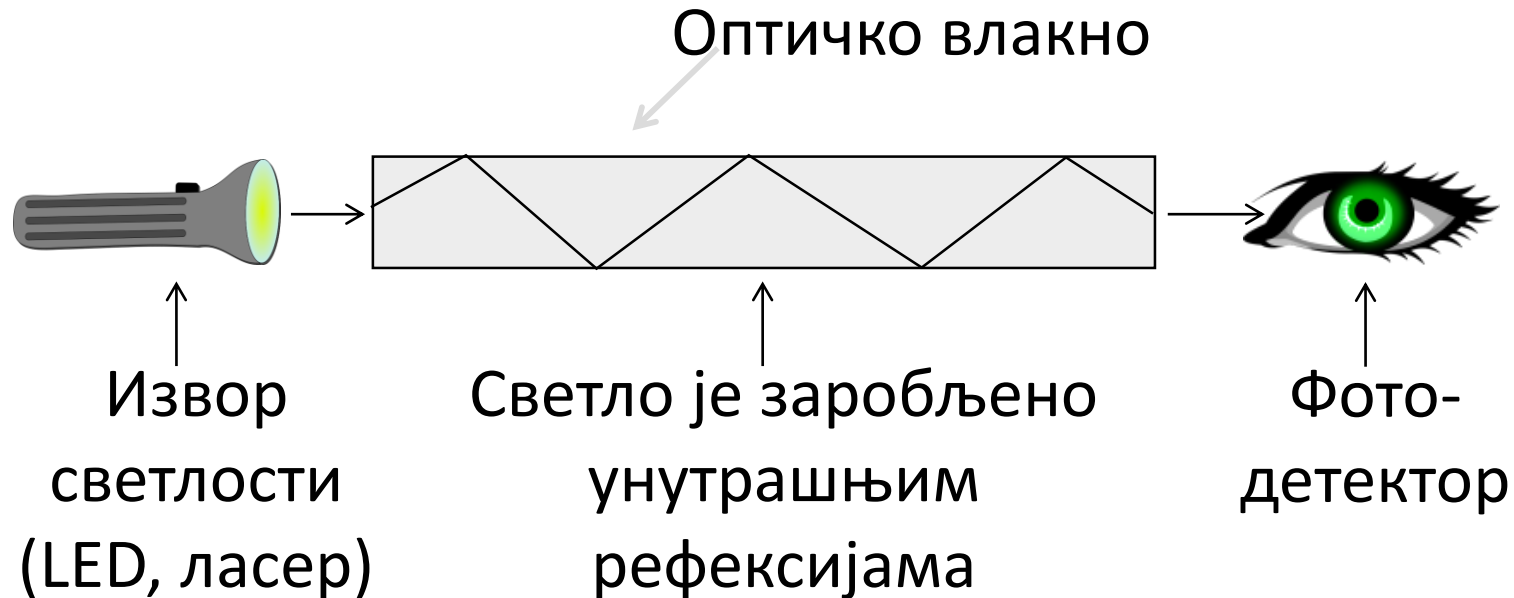
Жичани – инсталације за пренос струје

- Практичне за употребу (већ постоје)
- Јако лоше карактеристике преноса (нису дизајниране за то)



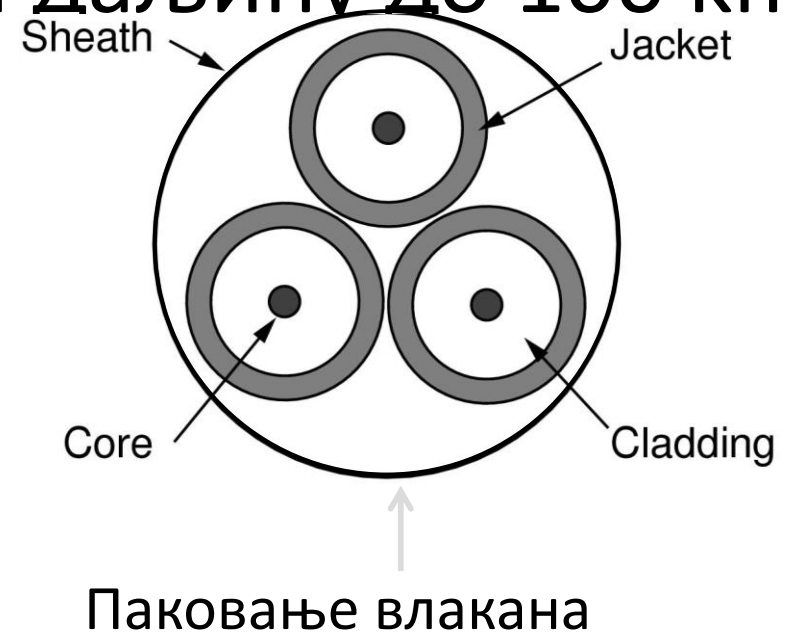
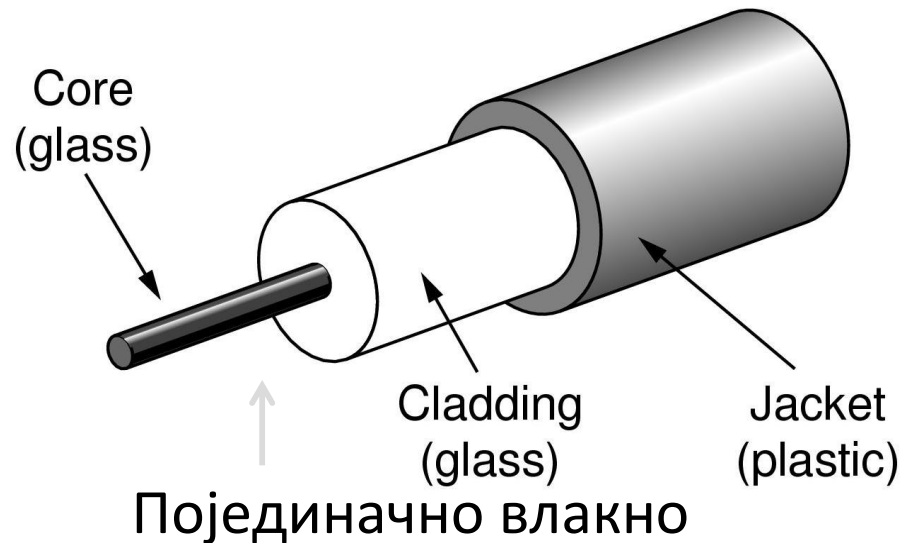
Оптика

- Дугачка, танка и чиста влакна стакла
 - Огроман проток због опсега фреквенција
 - Велике удаљености због малог слабљења



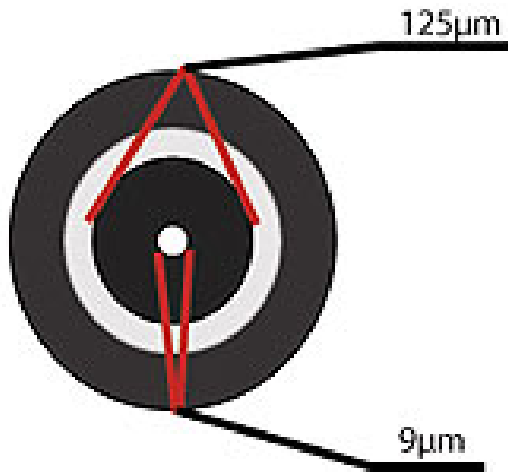
Оптика (2)

- Две врсте: вишемодално влакно (краће дужине, јефтиније) и унимодално (на даљину до 100 km)

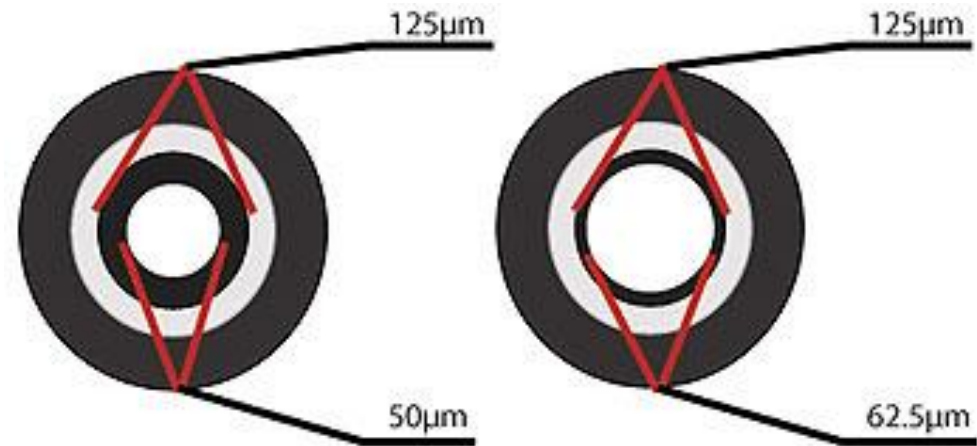


Оптика (3)

- Унимодално влакно је толико танко да светлост практично иде право
- Код мултимодалног се оно судара са зидовима

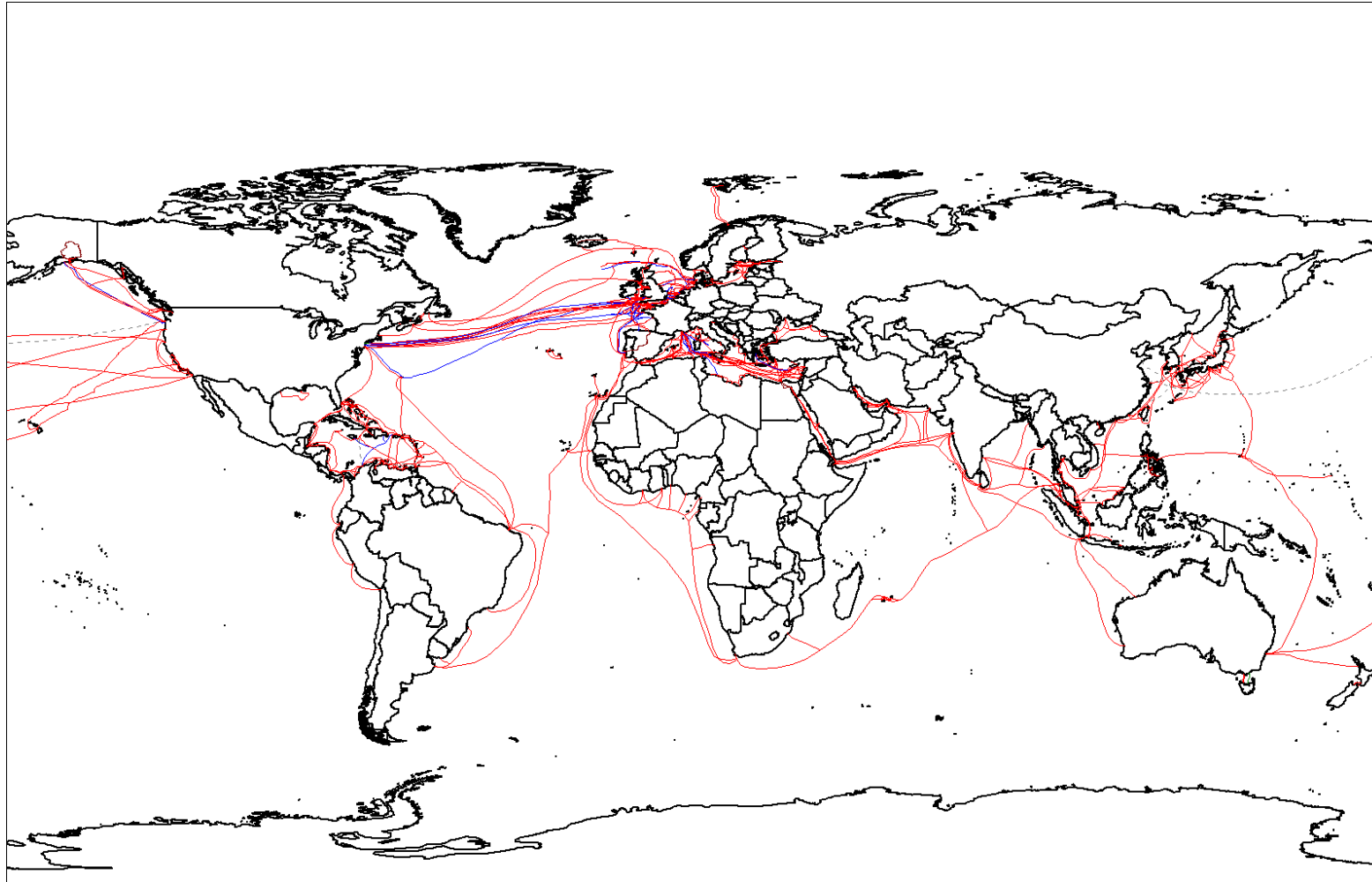


Унимодално влакно



Вишемодално влакна

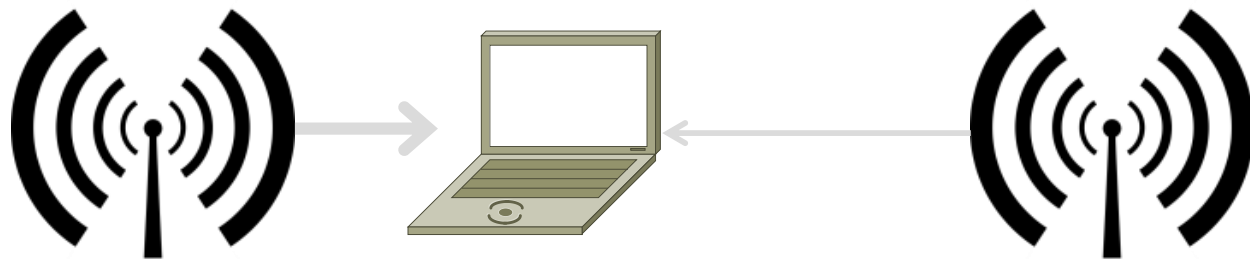
Оптичке везе на глобалном нивоу



Стање из 2007. године

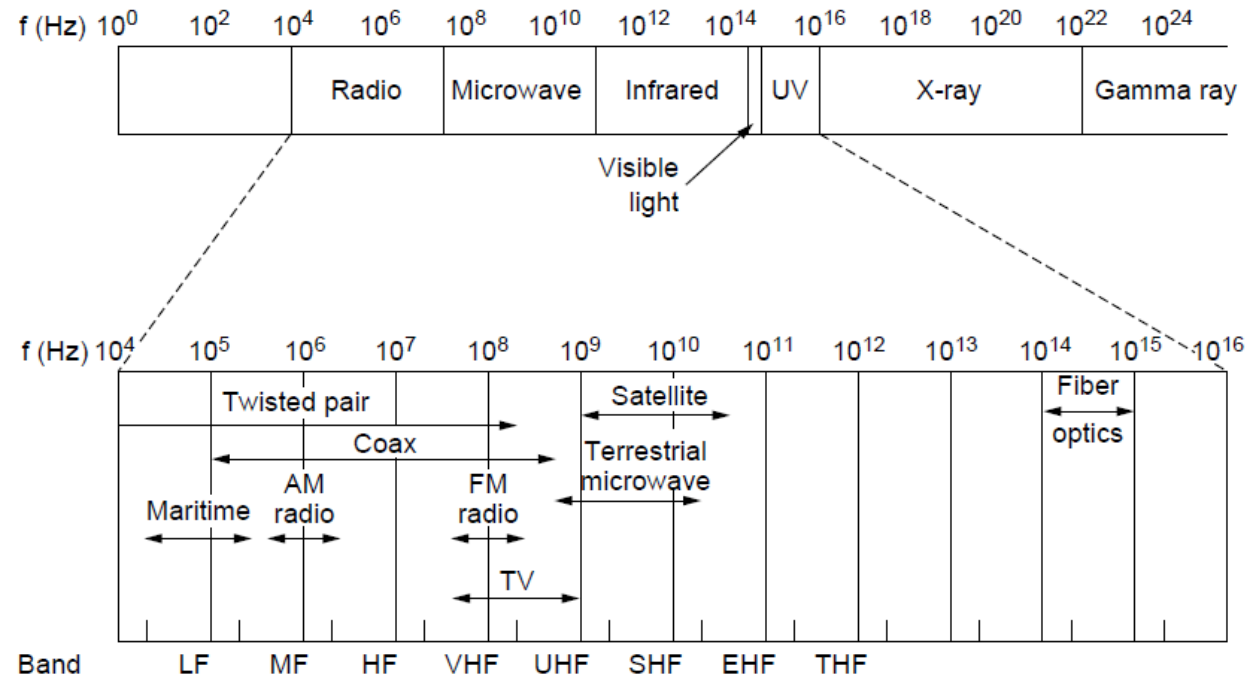
Бежични пренос

- Пошиљалац емитује сигнал кроз простор
 - У свим правцима, за разлику од жице, потенцијално велики број прималаца
 - Блиски сигнал (сличне фреквенције) се мешају код примаоца
 - Потребно координирати употребу!



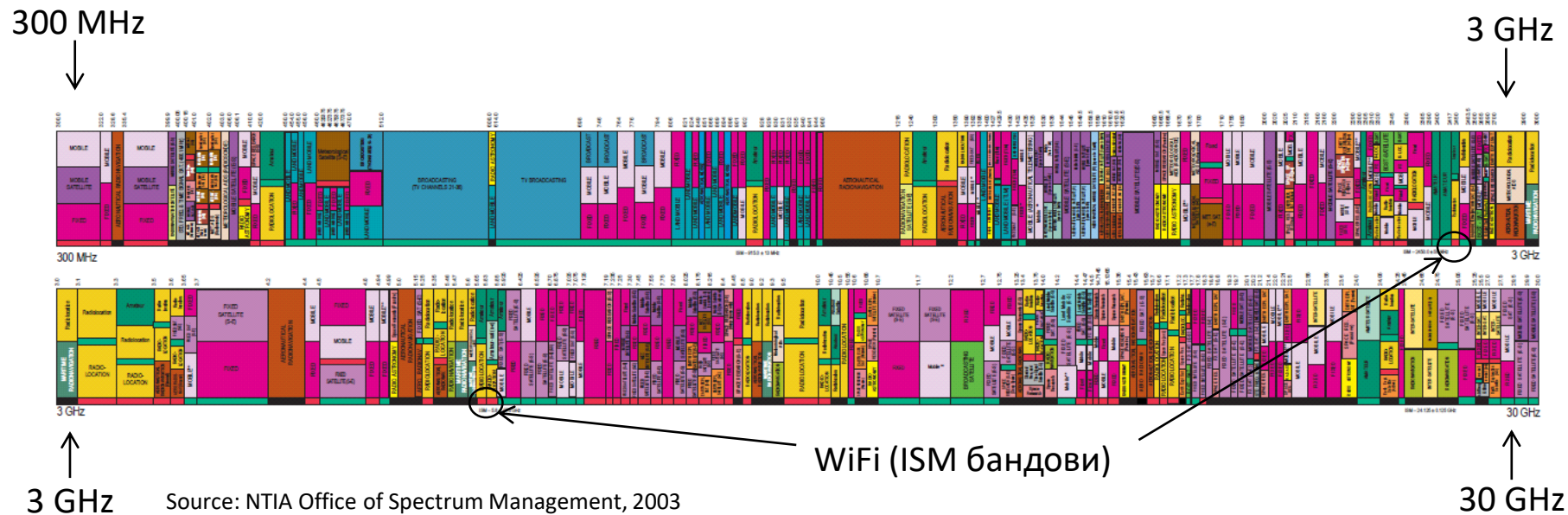
Електромагнетни спектар

- За мреже је најинтересантнији опсег микроталаса (3G, 4G, WiFi)
- Али се користе и остали делови спектра...



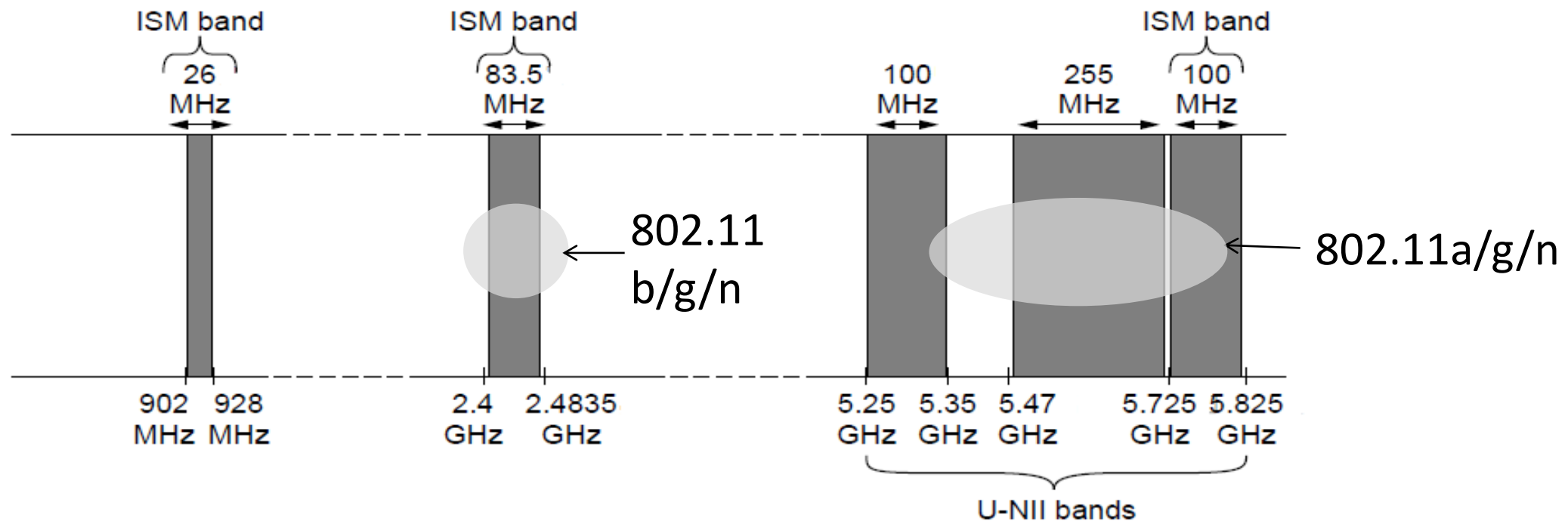
Електромагнетни спектар (2)

- Како би се избегла мешања сигнала, опсези (бандови) се пажљиво додељују
- Такође се продају на аукцијама за највише понуде



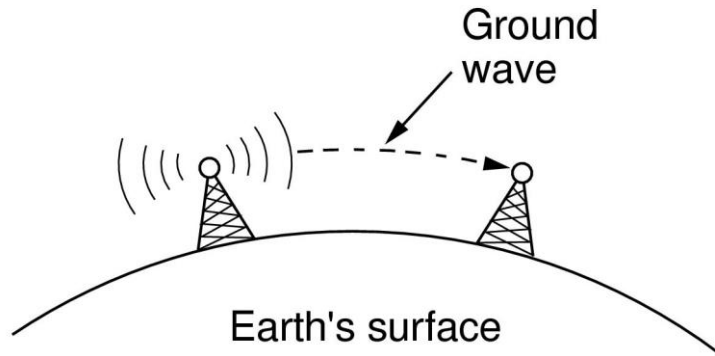
Интересантни делови спектра (бандови)

- Микроталаси, 3G и нелиценциране фреквенције (ISM) – обично због фрагментације других бандова, нпр. WiFi

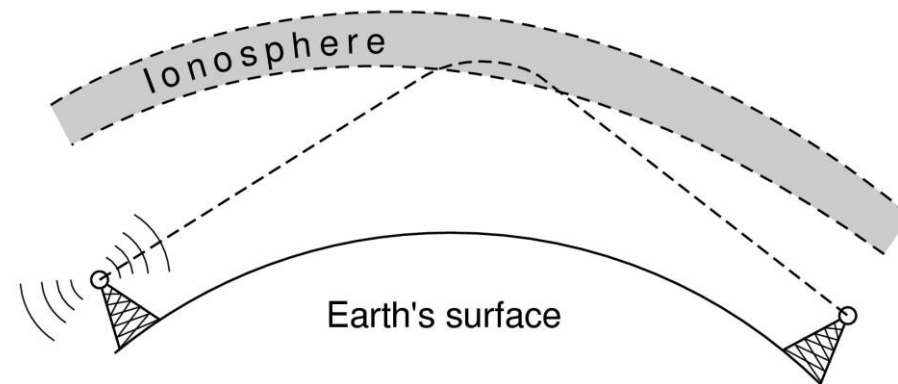


Радиоталаси

- Радио сигнали могу да пролазе кроз зграде, али им сигнал слаби из разних разлога: бива апсорбован, због одбијања, итд.



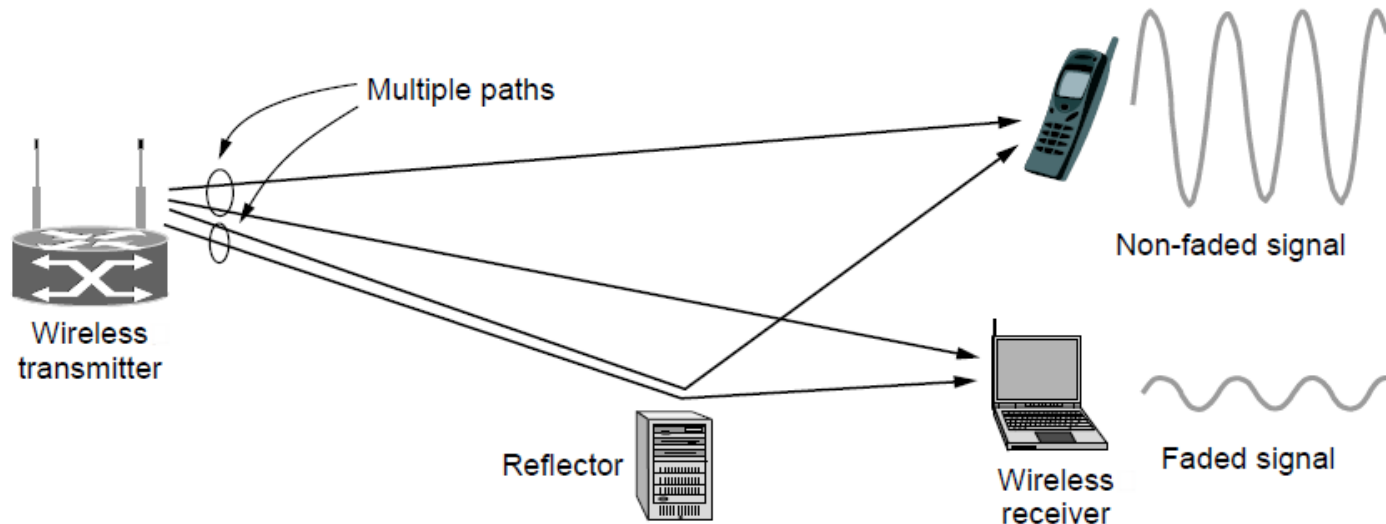
У опсезима VLF (very low freq.), LF (low), и MF (medium) радио таласи прате закривљеност Земље



У HF (high) опсегу, радио таласи се одбијају од јоносфере

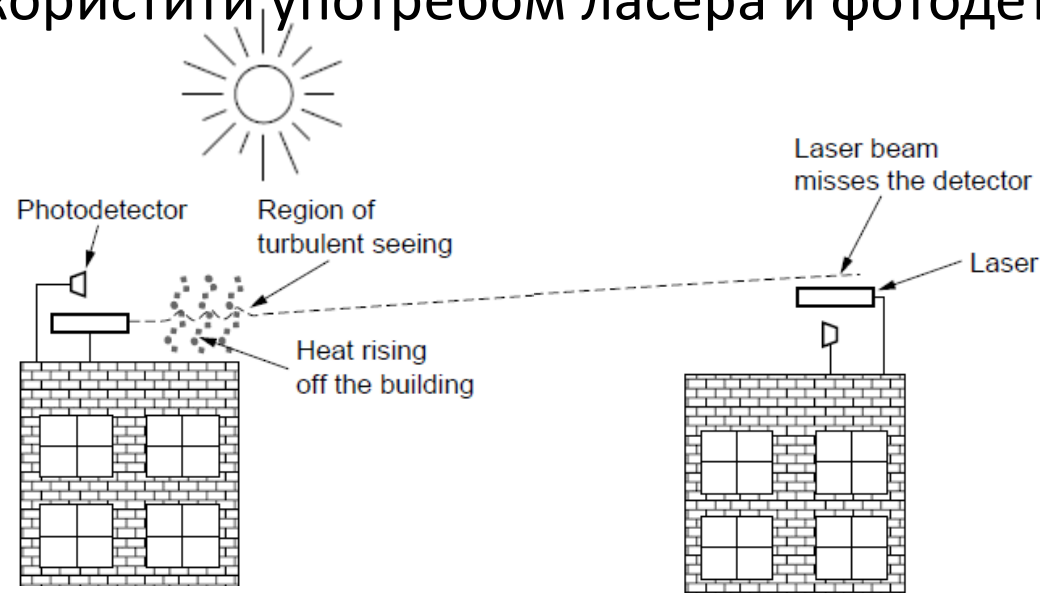
Микроталаси

- Микроталаси имају велики фреквентни опсег и користе се често за затворене намене попут WiFi, као и за отворене попут 3G и сателити
 - Сигнал слаби и рефлектује се од објеката из окружења
 - Јачина варира због удаљености, сабирања сигнала и сл.



Светлост

- Светлосни сигнали (не мисли се на оптичка влакна) се могу користити као комуникациони медијум
 - Светлост је врло усмерен талас и има велики фреквентни опсег (проток у електронижењерском смислу)
 - Може се искористити употребом ласера и фотодетектора



Бежичне или Жичане/Оптичке ком.

- Бежичне:

- + Једноставне за постављање и јефтине
- + Природно подржавају мобилност
- + Природно подржавају емитовање
 - Мешање сигнала се мора разрешавати
 - Јачина сигнала, па самим тим и проток изузетно варира

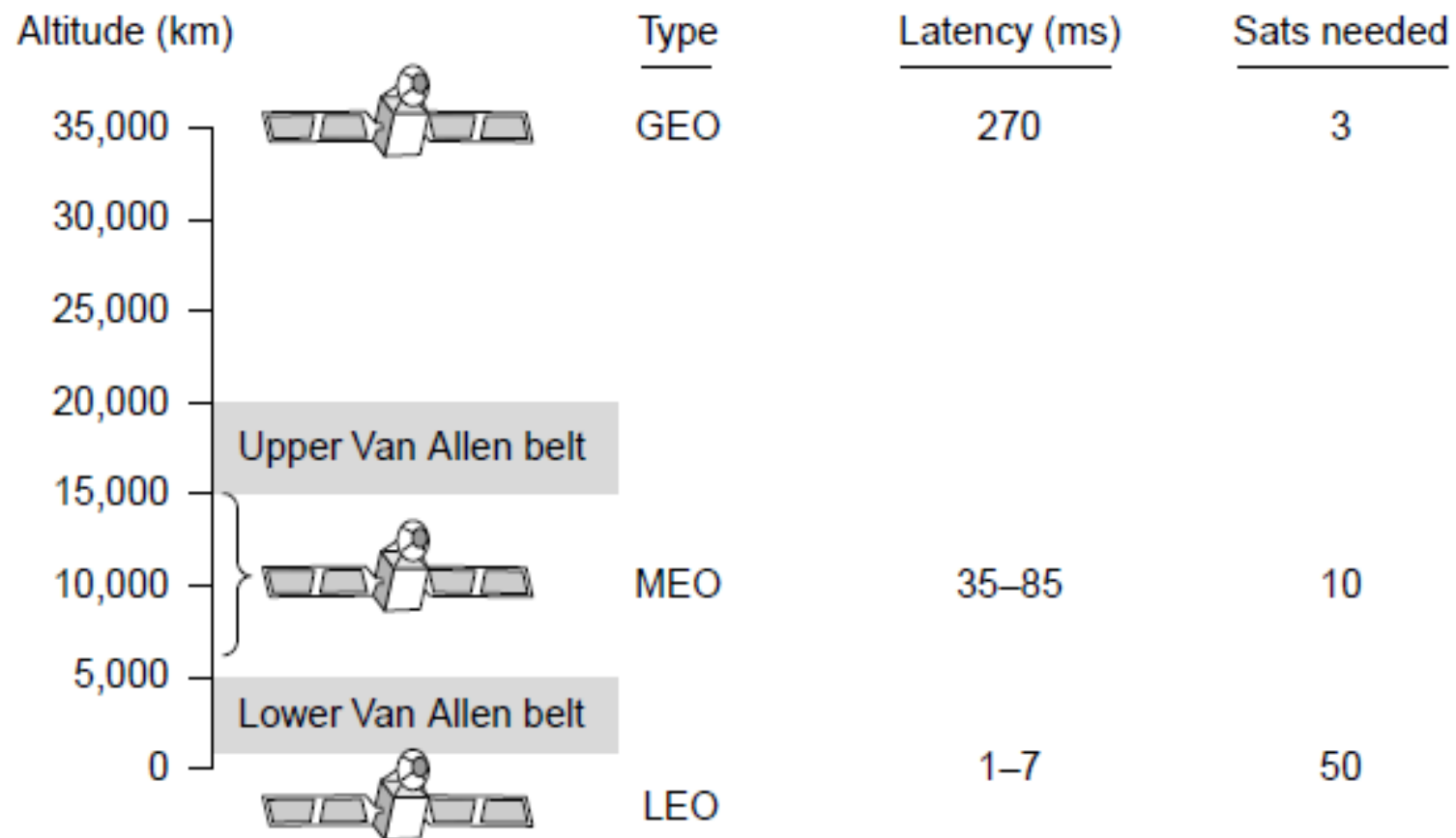
- Жичане/Оптика:

- + Лако се пројектује фиксни проток дуж одабраних рута
 - Скуп за постављање, посебно на већим удаљеностима
 - Није пројектован за мобилности или емитовање

Комуникациони сателити

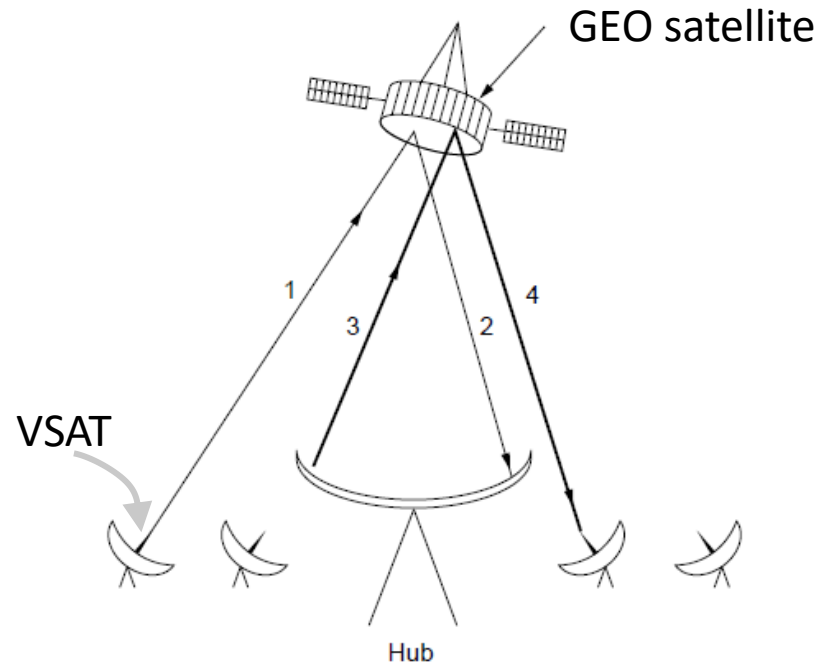
- Сателити су ефикасни за емитовања и комуникацију „било када/било где“
- Типови сателита:
 - Геостационарни (GEO)
 - Средње-орбитни (MEO)
 - Ниско-орбитни (LEO)

Типови сателита



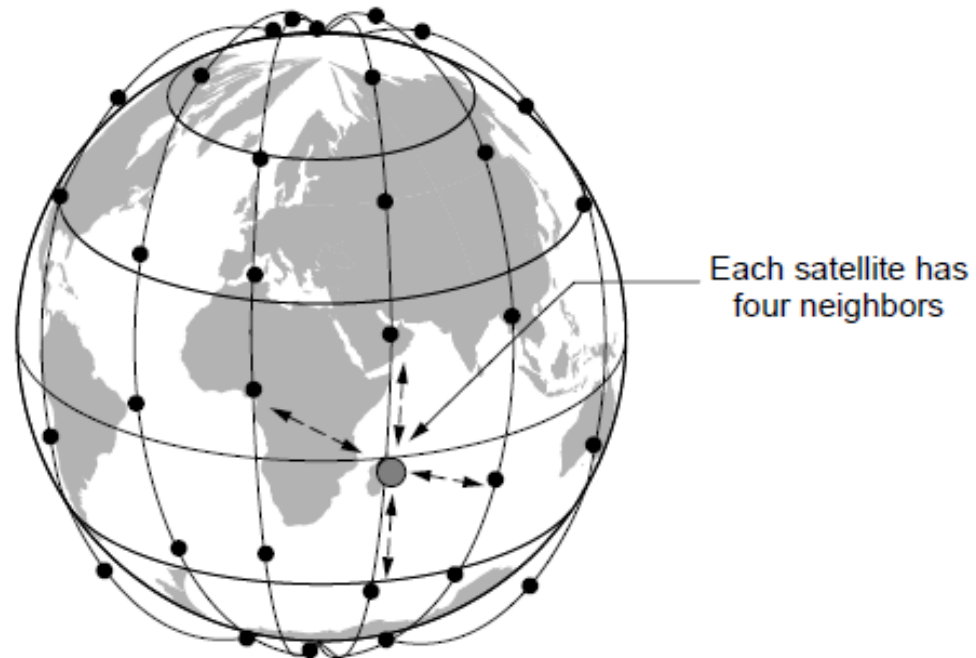
Геостационарни сателити

- GEO орбитирају 35,000 km изнад фиксне локације
 - VSAT добија и шаље сигнал ка централном уређају који се назива хаб
 - Постоје и системи без централизованог уређаја
 - Хаб нпр. одашиља телевизијски програм ка GEO, а овај емитује на делу захваћене Земљине територије, те ка свим припадајућим VSAT уређајима



Ниско-орбитни сателити

- Нису геостационарни, али ако их има више, онда могу да гарантују сталну покривеност на одабраним регијама
- Бржи одзив у односу на GEO, јер су ближи Земљи



Сателит или Оптика

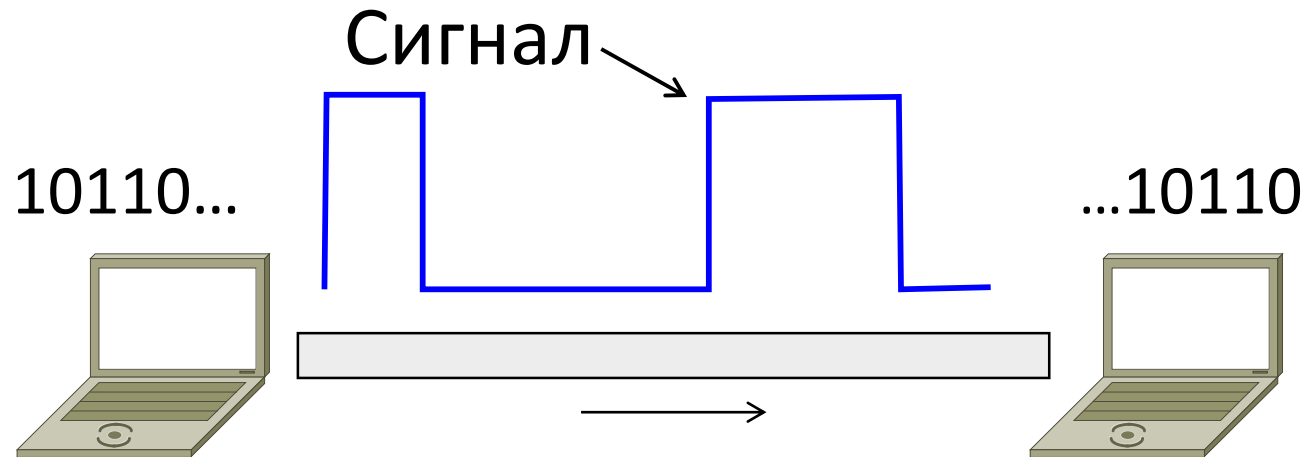
- Сателит:
 - + Након лансирања сателита, комуникација се може брзо успоставити било где и било када
 - + Емитовање на велика подручја
 - Ограничени проток и мешање сигнала
- Оптика:
 - + Огроман проток дуж великих удаљености
 - Инсталација скупа и компликована

Физички слој

Сигнали

Пренос сигнала

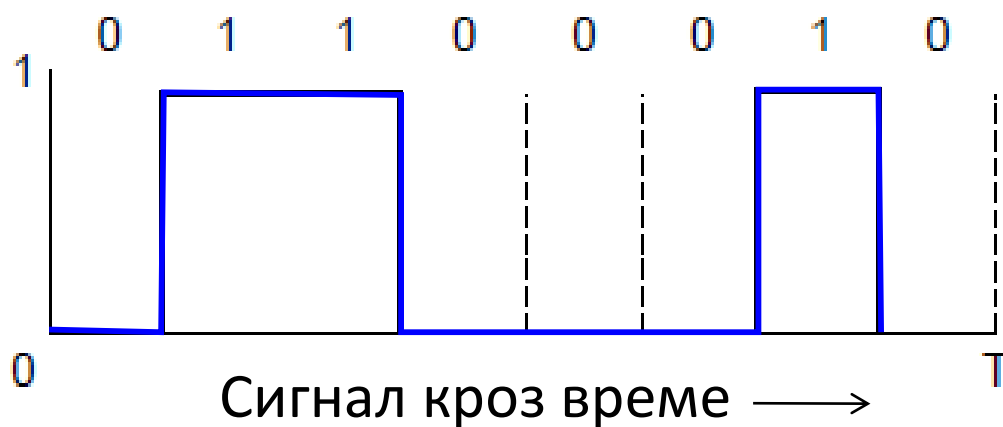
- Аналогни сигнали кодирају дигиталне
- Шта се дешава са сигналом приликом пропагације?



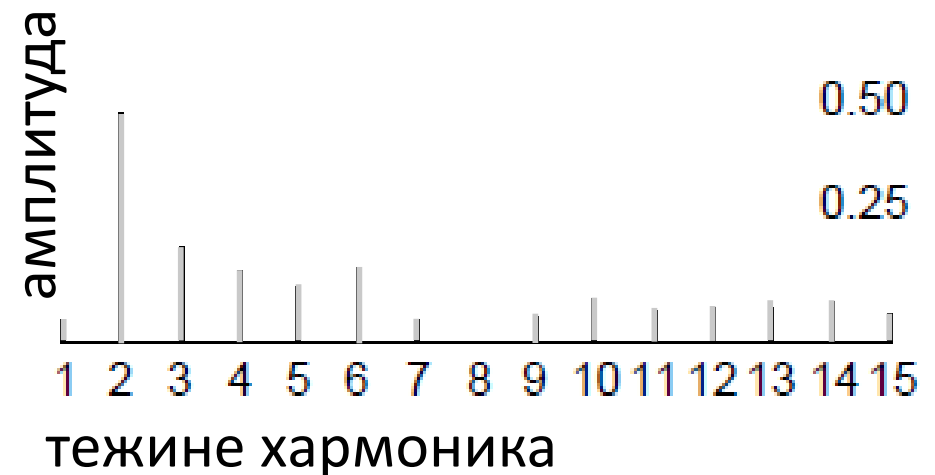
Фреквенциона репрезентација

- Сигнал се кроз време може представити путем својих фреквенцијских делова (Фуријеова анализа)

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

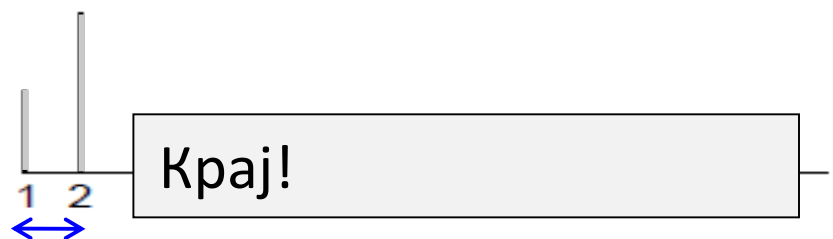
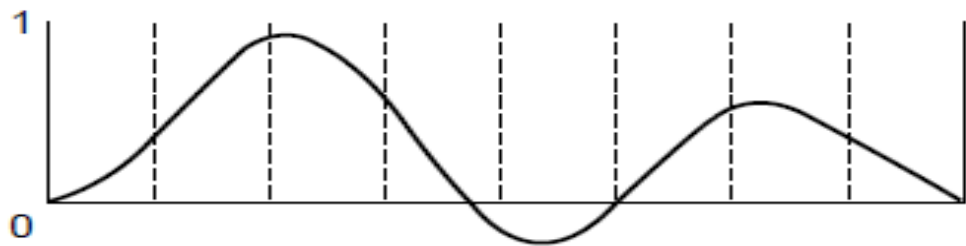
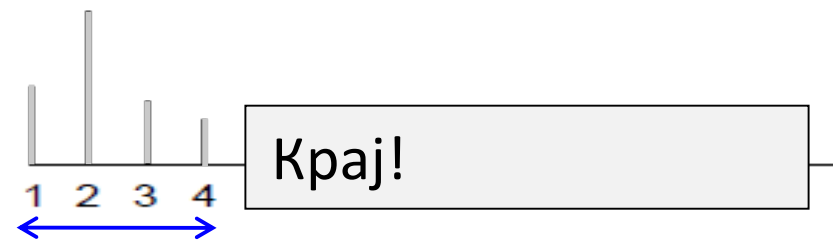
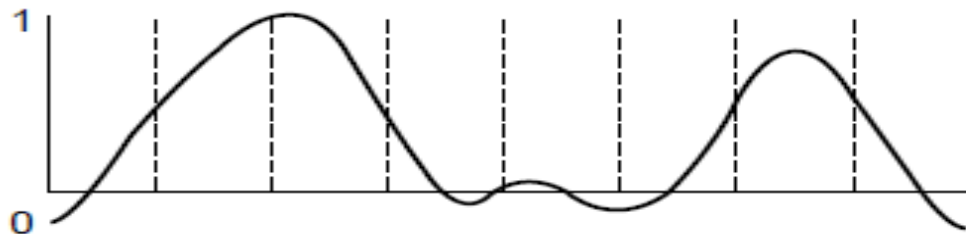
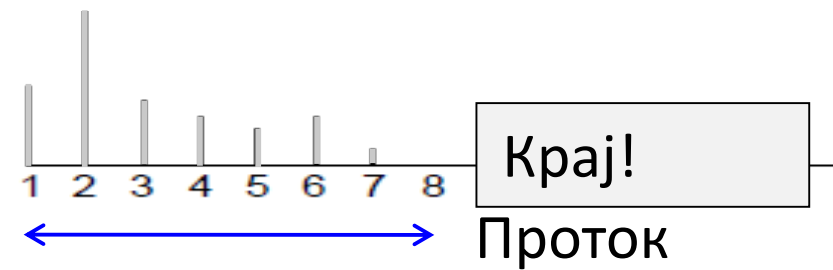
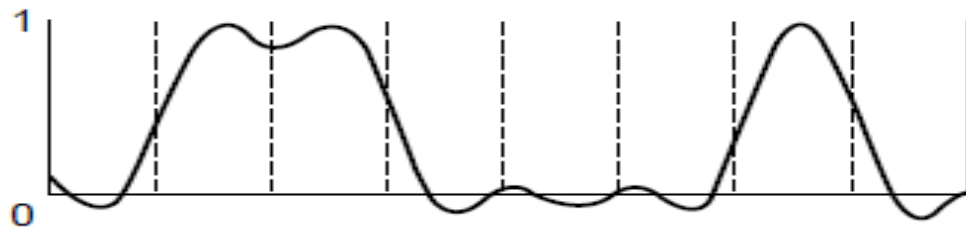


||



Ефекат мањег протока

- Мање скуп фреквенција = мањи проток



Сигнала преко жице

- Шта се дешава са сигналом док пролази кроз жицу?
 1. Сигнал касни (брзина је $\sim \frac{2}{3}c$, а не бесконачна)
 2. Сигнал слаби (са порастом удаљености)
 3. Фреквенције изнад неке границе брже слабе
 4. Дешава се шум (због спољних ефеката)

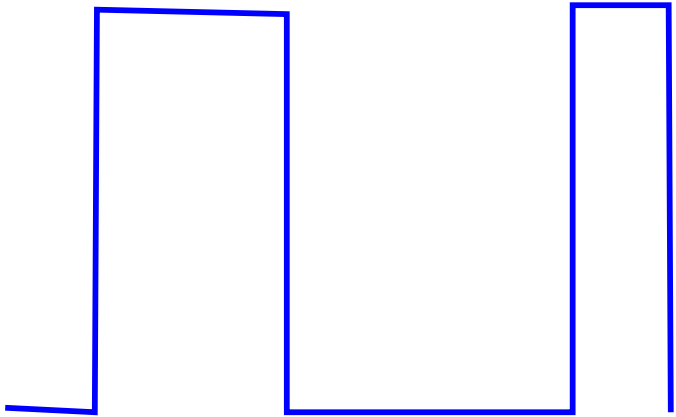
Електроинжењери: Проток = ширина фреквенционог опсега (Hz)

Рачунарци: Проток = капацитет преноса информација (b/s)

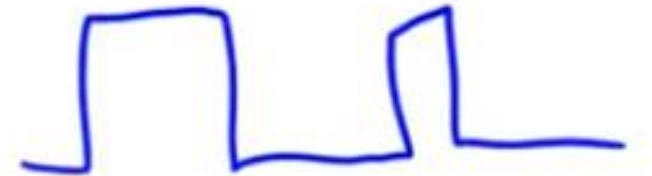
Сигнал преко жице (2)

- Пример:

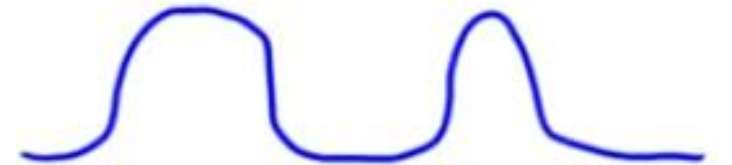
Послати сигнал



2: Слабљење:



3: Проток:

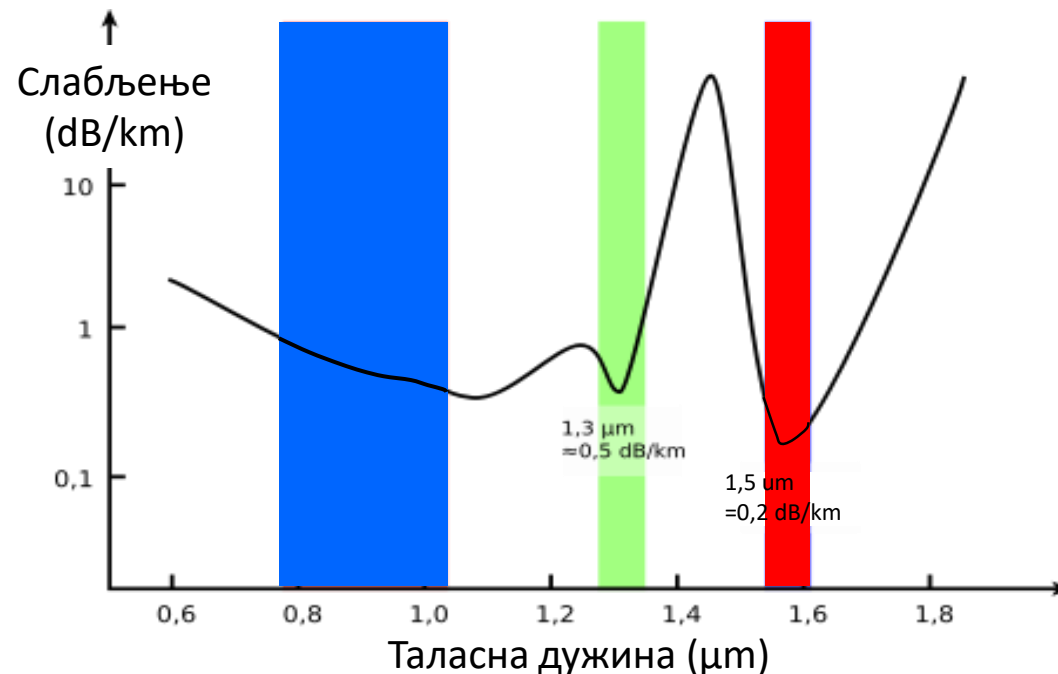


4: Шум:



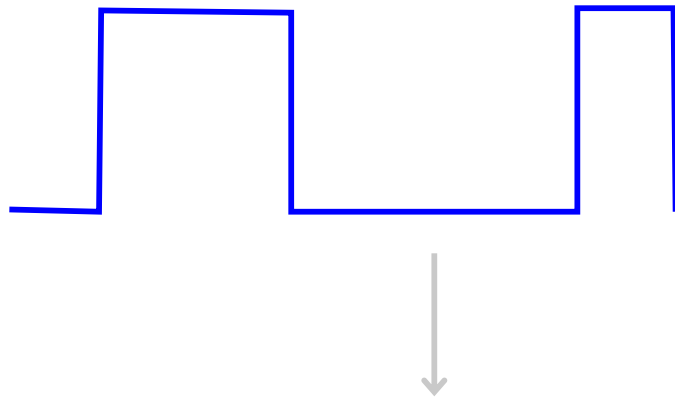
Сингал преко оптике

- Светло се преноси са веома малим губитком у три широка фреквентна опсега
 - Крајњи десни залази у опсег инфрацрвених таласа



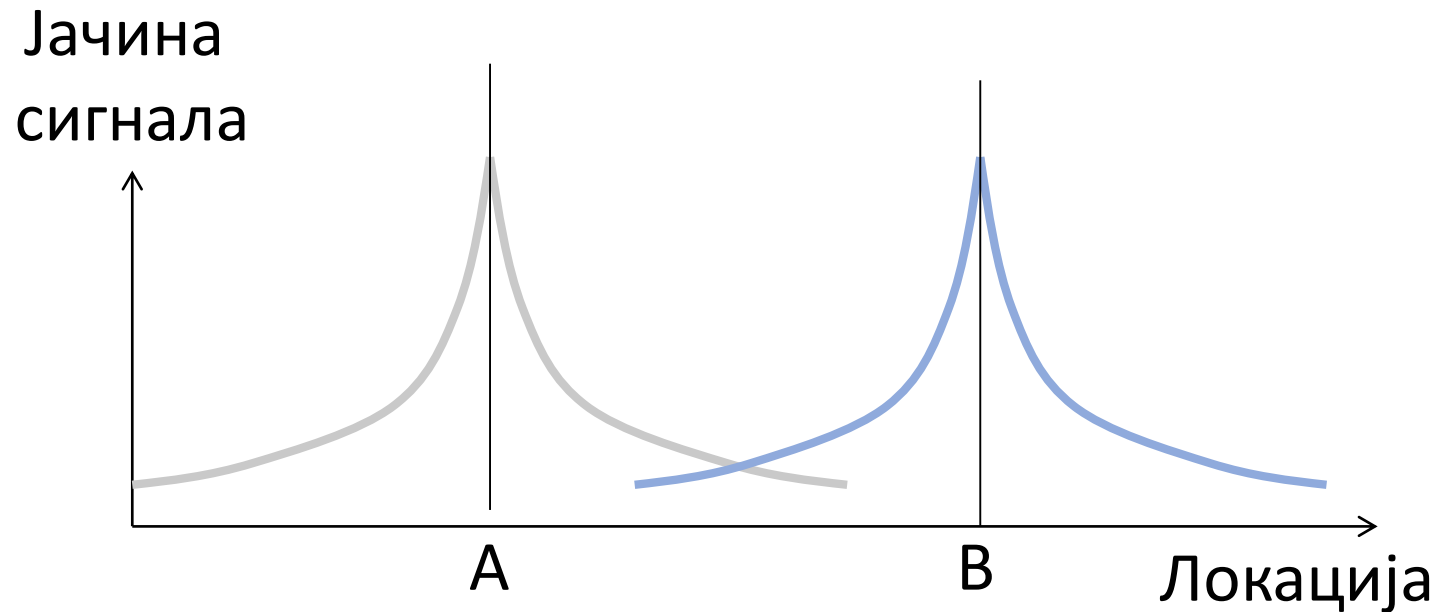
Сигнал у бежичним комуникацијама

- Због високих фреквенција бежичних преноса, није могуће дигитални сигнал директно кодирати у аналогни већ се користи концепт сигнала носача



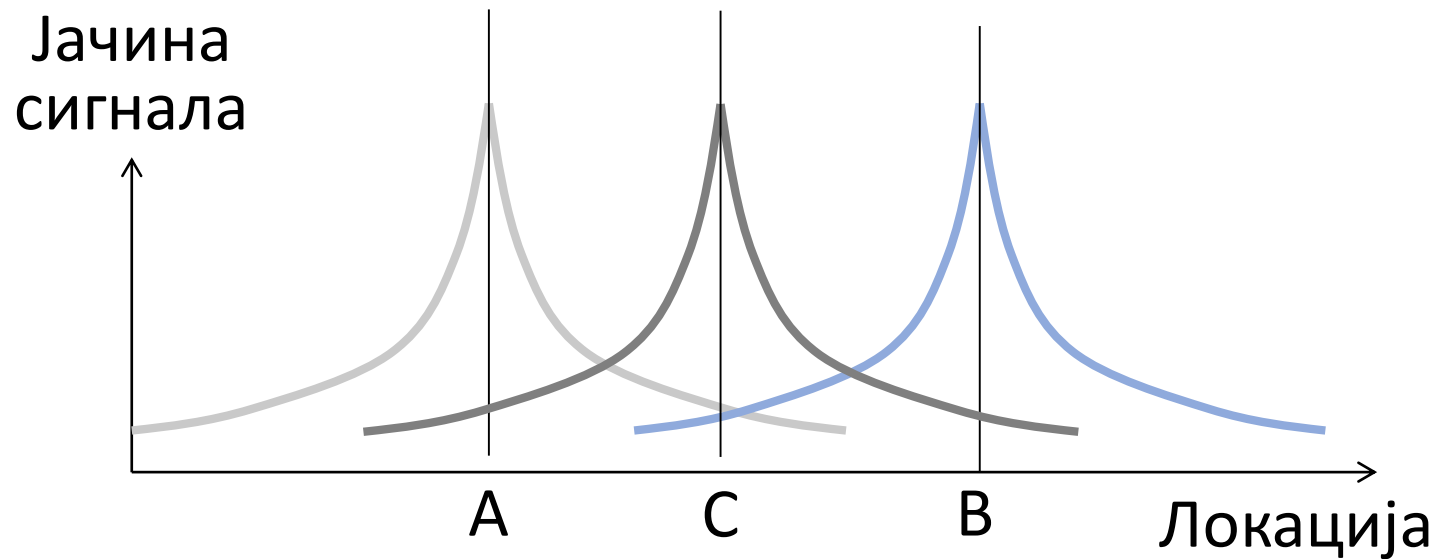
Сигнал у бежичним комуникацијама (2)

- Путује брзином светлости, али јако брзо слаби (са квадратом растојања, зашто?)



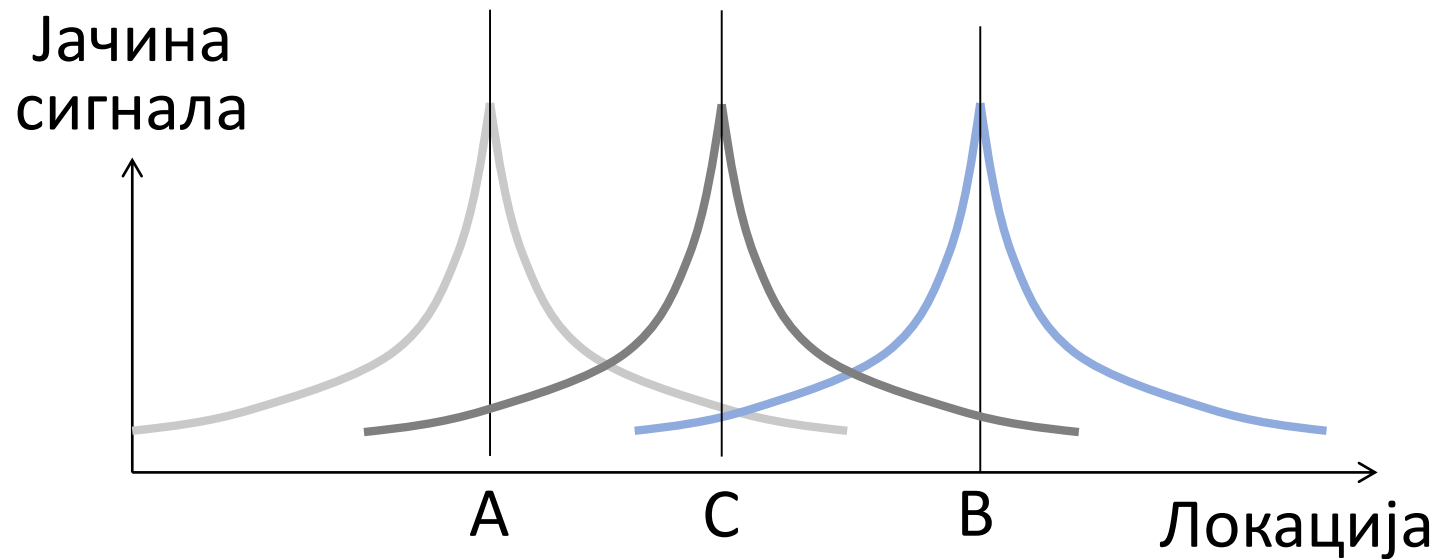
Сигнал у бежичним комуникацијама (3)

- Вишеструки сигнали на истој фреквенцији се мешају код примаоца



Сигнал у бежичним комуникацијама (4)

- Ако су локације довољно удаљене, могуће је користити исту фреквенцију

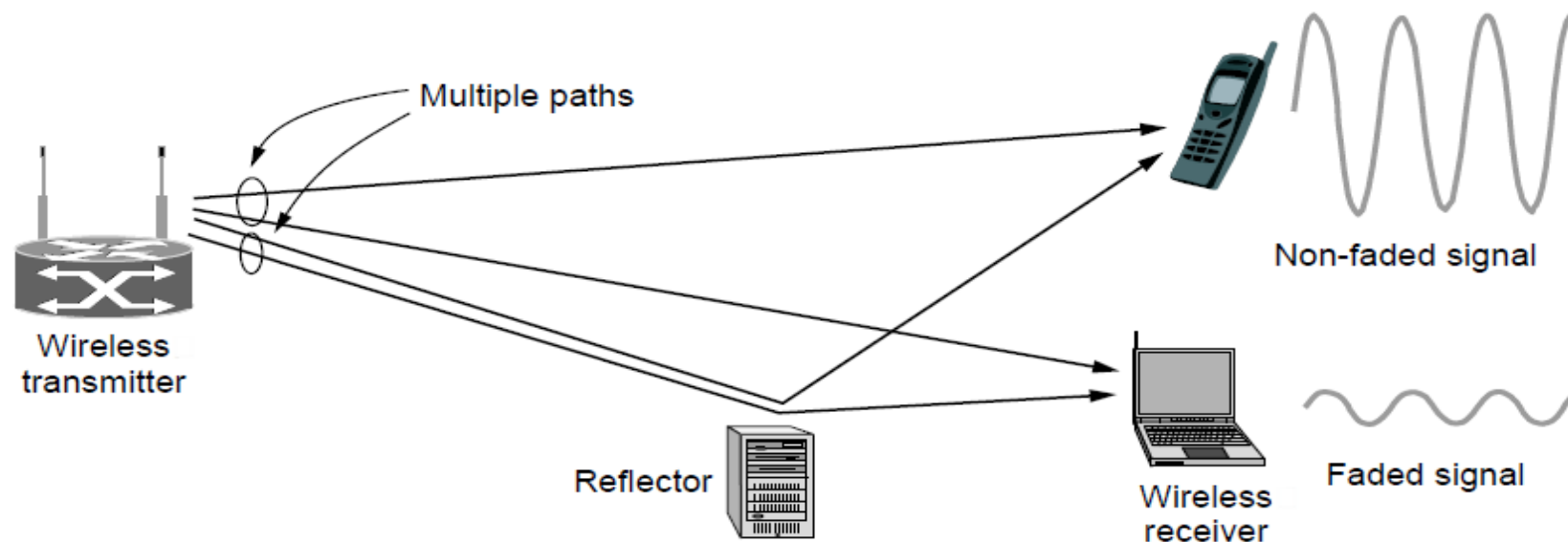


Сигнал у бежичним комуникацијама (5)

- Постоје још неки отежавајући ефекти!
 - Пропагација бежичног сигнала је сложена и зависи од окружења
- Карактеристике зависе и од фреквенције
 - Не преноси се исто звук и светлост, у чему је разлика?
 - Постоји проблем са сабирањем одбијених сигнала код микроталаса

Сабирање одбијених таласа

- Сигнали могу да се одбијају од објеката и путују кроз више независних путања
 - После када стигну вишеструку сигнали код примаоца, они се могу лоше сабрати (доњи пример)

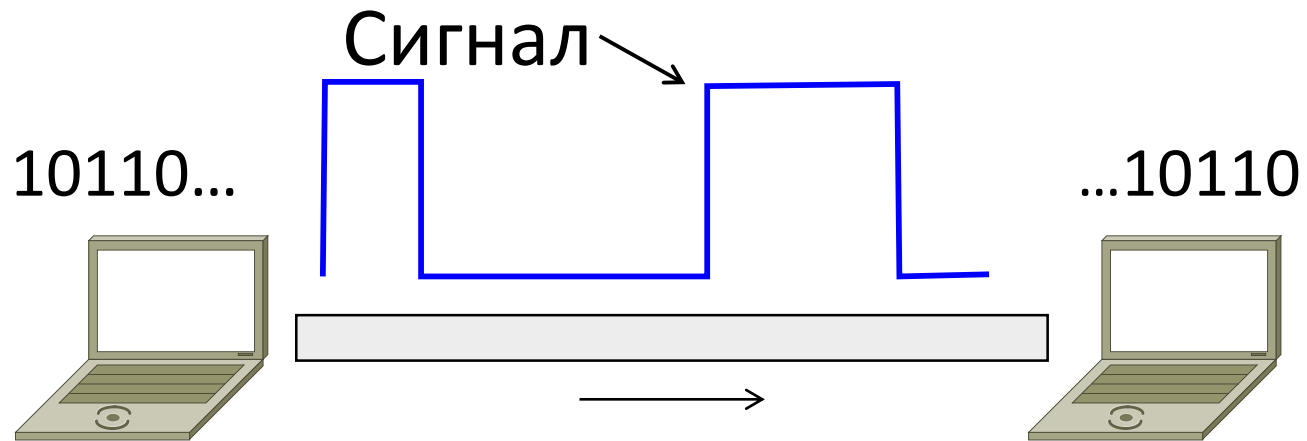


Физички слој

Модулација и мултиплексирање сигнала

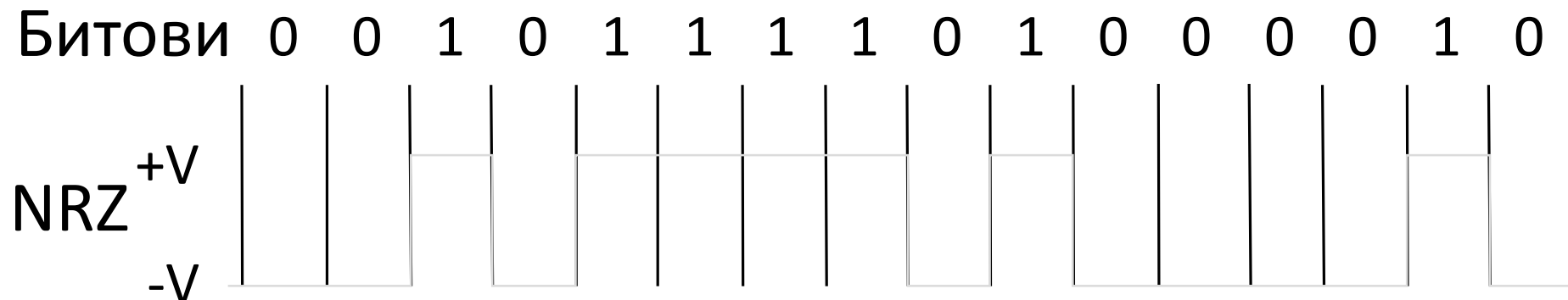
Модулација

- Начин представљања дигиталних информација у оквиру физичког медијума?



Једноставна модулација

- Високи напон (+V) представља 1, ниски (-V) представља 0
 - Ово се зове NRZ кодна шема (Non-Return to Zero)



Многе друге шеме кодирања

- Може се користити и више од два нивоа односно симбола, нпр. 4 нивоа = 2 бита
- Ово зависи од технолошких карактеристика медијума и могућности декодирања

(Де)кодираније сигнала

- Дилема око броја нула?
 - Шта ако имамо дуг низ нула (или јединица)?
 - Може се десити да прималац није сигуран колико их је
 - Како се ово може решити?



- Неколико могућих решења:
 - Нпр. Синхронизација сатова, Манчестерско кодирање и др.

(Де)кодирање сигнала– шема 4В/5В

- Свака 4 бита на 5 битова без дугачких низова нула
 - 0000 → 11110, 0001 → 01001, 1110 → 11100, ... 1111 → 11101
 - Највише 3 узастопне нуле
 - Инверзија сигнала на јединици како би се избегли дугачки низови јединица

(Де)кодирање сигнала – шема 4В/5В (2)

- 4В/5В кодирање:

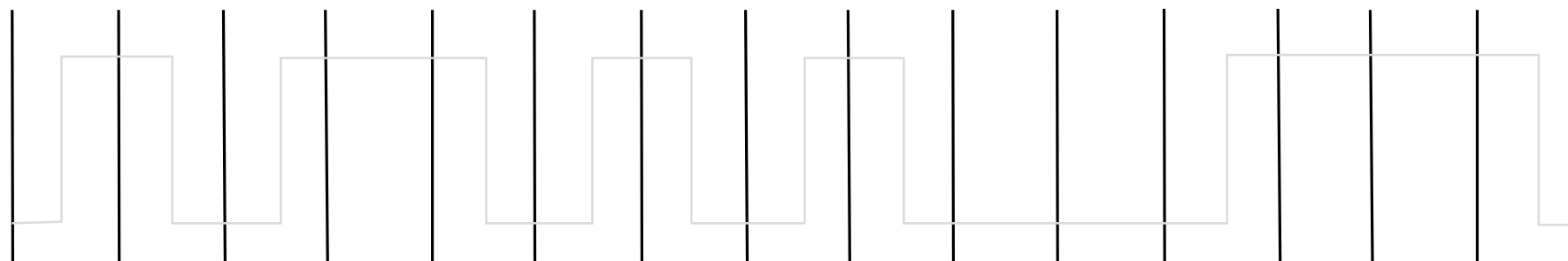
- 0000 → 11110, 0001 → 01001, 1110 → 11100, ...
1111 → 11101

- Не постоји низ узастопних нула дужи од 3!

Порука: 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1

Код: 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 0 1

Сигнал:

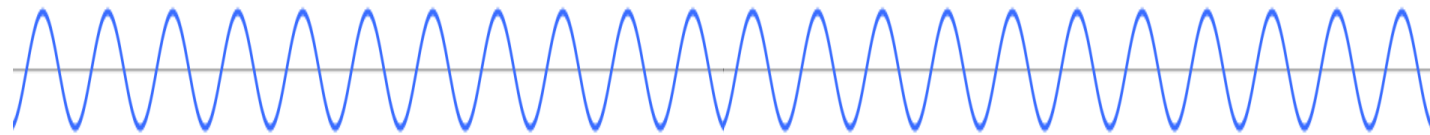


Модулација преко носача (passband)

- Претходни типови модулације су били директни (baseband)
 - Сигнал се на жицу шаље директно
 - Фреквенције дигиталног и аналогног сигнала су исте
- Ово није могуће код оптике и бежичних сигнала
 - Због тога што раде на много високим фреквенцијама
- Модулација преко носача користи другачију (индиректну) репрезентацију сигнала

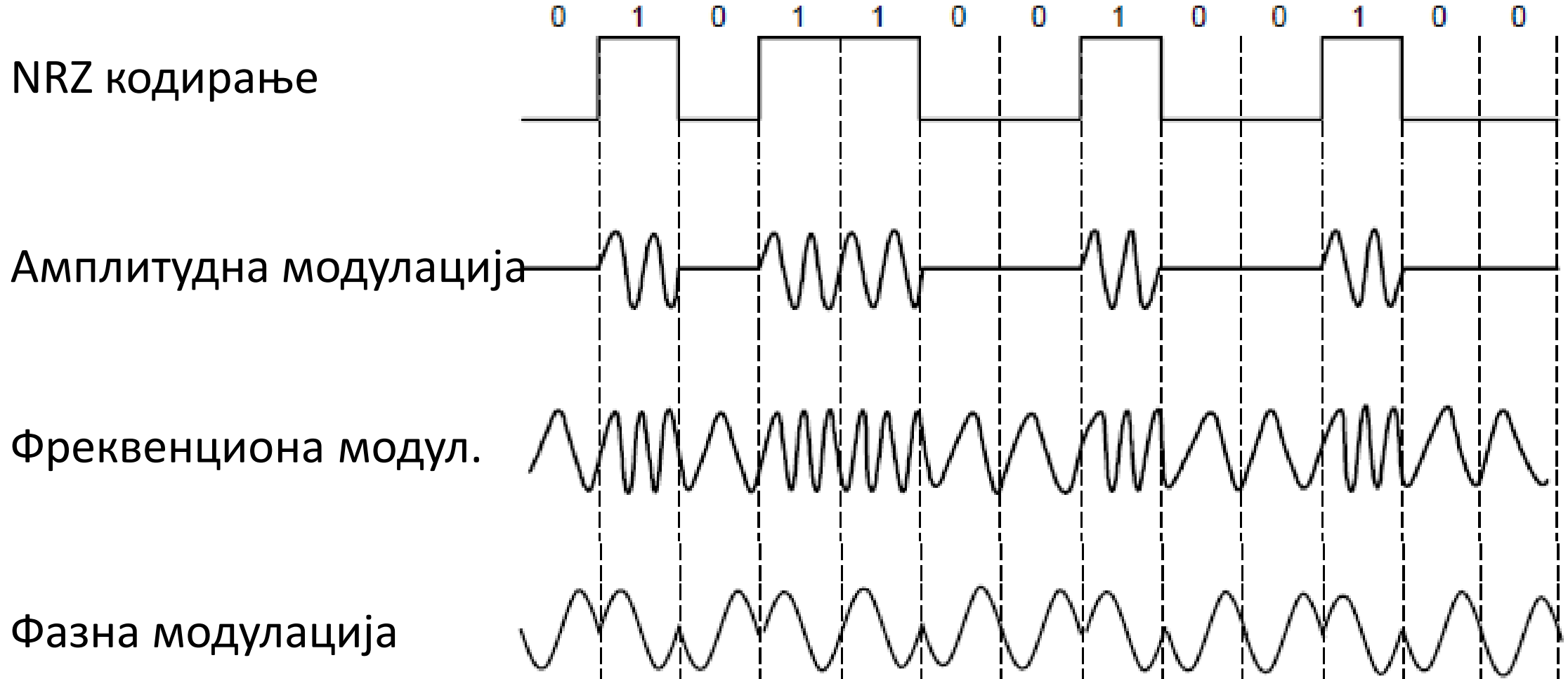
Модулација преко носача (passband) (2)

- Сигнал носач осцилира на жељеној фреквенцији



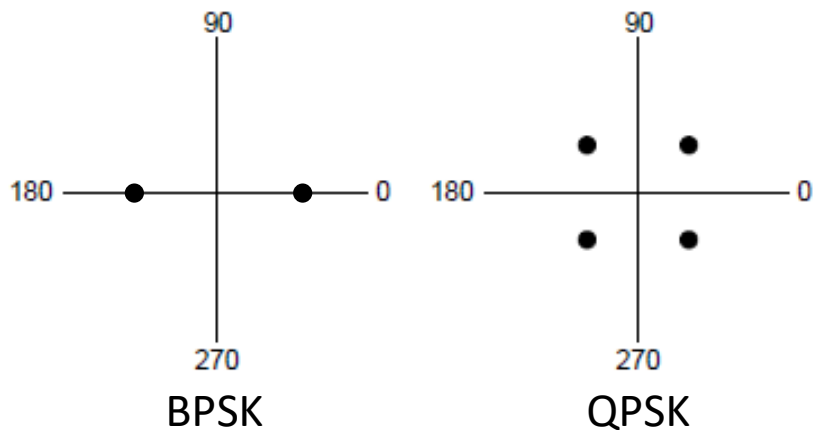
- А потом се модулира променом:
 - Амплитуде, фреквенције или фазе

Модулација преко носача (passband) (3)



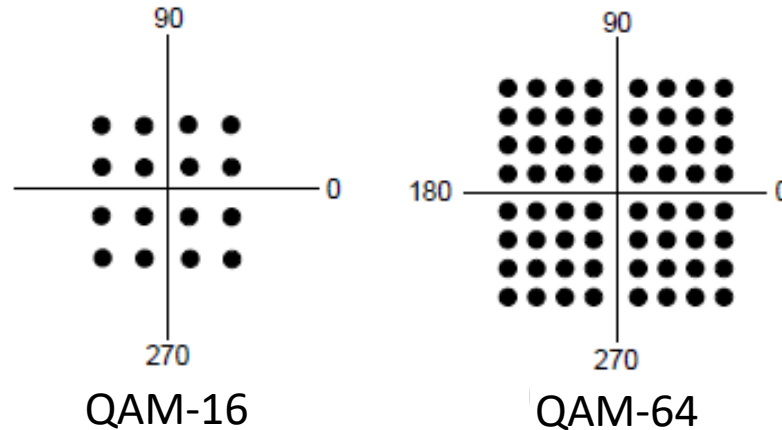
Модулација преко носача (passband) (4)

- Шеме за фазну модулацију и комбиновану амплитудно-фазну модулацију:



BPSK
2 симбола
1 бит

QPSK
4 симбола
2 бита

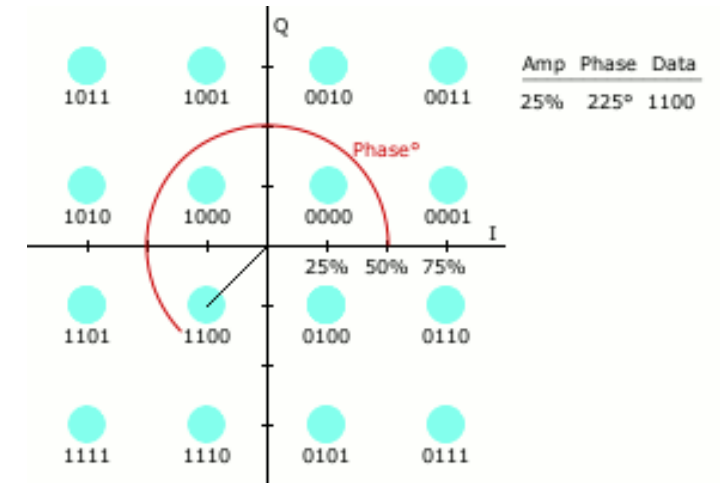


QAM-16
16 симбола
4 бита

QAM-64
64 симбола
6 бита

BPSK/QPSK варирање фазе

QAM варира фазу и амплитуду

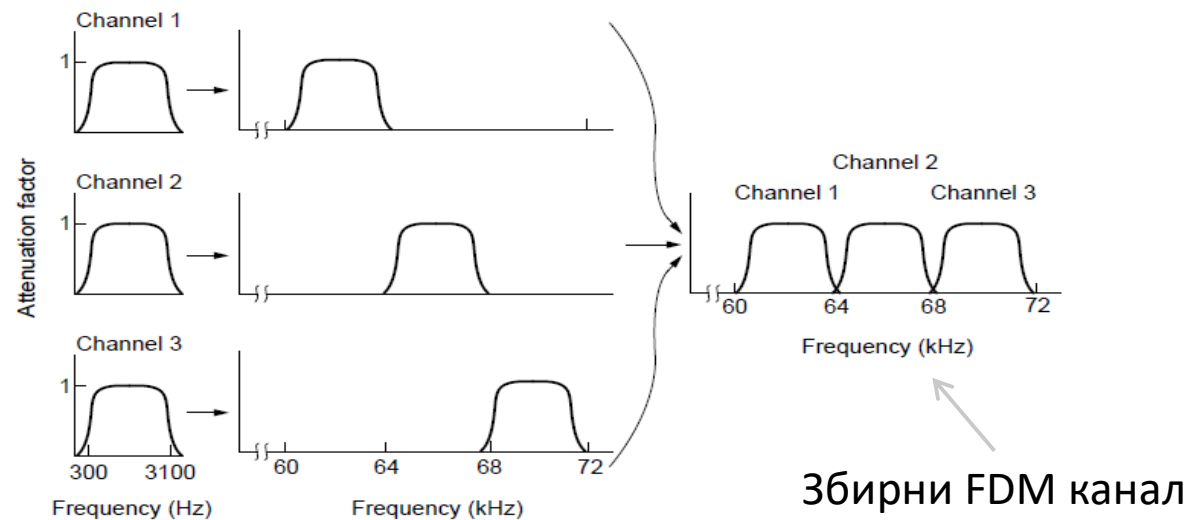


Мултиплексирање сигнала

- Мултиплексирање се бави дељењем канала између више корисника
 - Споменули смо га раније, али нисмо објаснили како се реализује
 - Као аналогон проблема, замислите собу у којој има пуно људи, и неки међу њима треба да комуницирају?
- Постоје три стандардна приступа:
 - Фреквенционо мултиплексирање
 - Временско мултиплексирање
 - Мултиплексирање засновано на кодовима (CDMA)

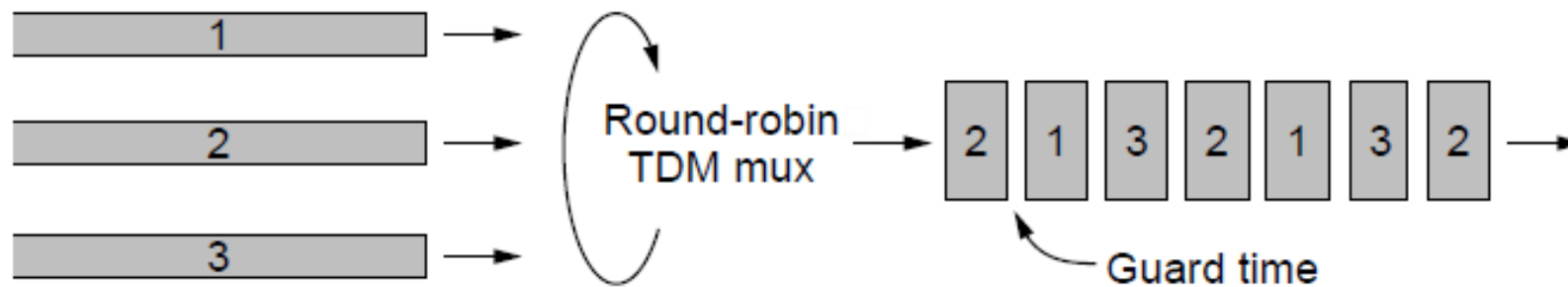
Фреквенцијоно мултиплексирање (FDM)

- Дели канал тако што различите кориснике поставља на различите фреквенционе опсеге:
- У соби пуној људи, ово би значило да се фокусирасте на слушање оних који причају јако брзо, јако споро, средње, ...



Временско мултиплексирање (TDM)

- Дели канал временски (као *timesharing* концепт у OS):
 - Корисници се држе фиксног распореда
 - Употребљава се у системима фиксне и мобилне телефоније
- У соби пуној људи би ово значило да сви ћуте док прича нека подгрупа, па онда прича следећа група, ...



Кодно мултиплексирање (CDMA)

- CDMA (code division multiple access), корисницима се додељују кључеви
 - Кључеви су међу собом ортогонални
 - На оригинални сигнал се примењује кључ (скаларни производ)
- У соби би ово значило да неки људи причају различитим језицима

Кључеви пошиљалаца

$$A = \begin{array}{c} \boxed{+1} \quad \boxed{+1} \\ \hline \boxed{-1} \quad \boxed{-1} \end{array} \rightarrow$$

$$B = \begin{array}{c} \boxed{+1} \quad \boxed{+1} \\ \hline \boxed{-1} \quad \boxed{-1} \end{array} \rightarrow$$

$$C = \begin{array}{c} \boxed{+1} \quad \boxed{+1} \\ \hline \boxed{-1} \quad \boxed{-1} \end{array} \rightarrow$$

Јединствени
сигнал
података

$$\begin{array}{c} \boxed{+2} \\ \hline \boxed{-2} \end{array} \rightarrow$$

$$S = +A - B$$

Декодирање код прималаца

$$S \times A = \begin{array}{c} \boxed{+2} \quad \boxed{+2} \\ \hline \boxed{-0} \quad \boxed{-0} \end{array} \rightarrow$$

Сума = 4
А је послао "1"

$$S \times B = \begin{array}{c} \boxed{-0} \quad \boxed{-0} \\ \hline \boxed{-2} \quad \boxed{-2} \end{array} \rightarrow$$

Сума = -4
В послао "0"

$$S \times C = \begin{array}{c} \boxed{+2} \\ \hline \boxed{-0} \quad \boxed{-2} \end{array} \rightarrow$$

Sum = 0
С није послао ништа

Физички слој

Природна ограничења

Ограничења у слању информација

- Колико често се може слати податак кроз канал?
 - Најквистов лимит (~1924)
 - Шенонов капацитет (1948)
- Реални системи су добро реализовани ако нису много далеко од ових ограничења
- Ограничења нам говоре колико смо релативно добри у нечему

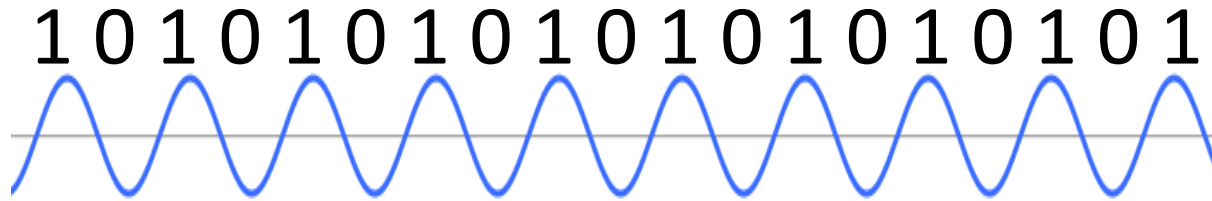
Кључне концепти за пренос сигнала

- Проток (B), јачина сигнала (S), и јачина шума (N)
 - B ограничава брзину промена – фреквенцију
 - Карактеристика канала
 - S и N огранича број разлучивих нивоа сигнала
 - Карактеристика примаоца



Најквистов лимит

- Максималан број промена симбола је $2B$

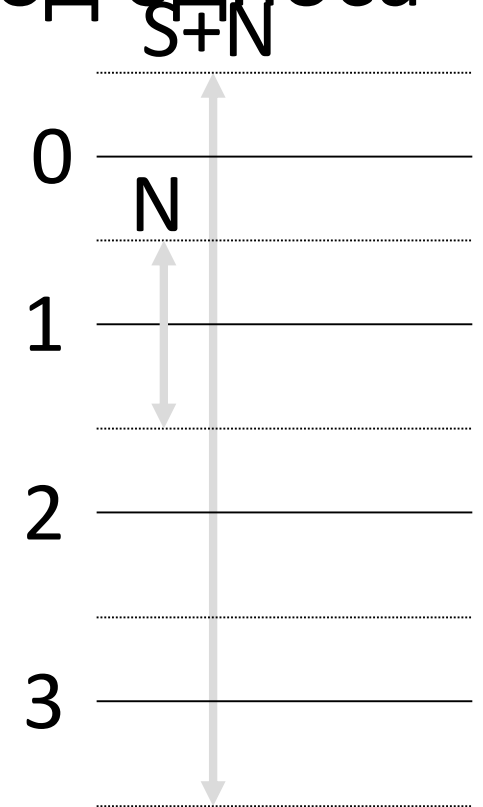


- Ако постоји V нивоа сигнала (игноришемо грешке, тј. шум), онда је максималан проток у битима:

$$R = 2B \log_2 V \quad \text{b/s}$$

Шенонов капацитет

- Број разлучивих нивоа сигнала зависи од односа јачине сигнала и јачине шума S/N
 - SNR, сигнал-шум однос
 - Шум је случајан сигнал
- SNR се мери у децибелима:
 - $SNR_{dB} = 10\log_{10}(S/N)$
 - Логаритамска скала, јер S/N може јако много да варира



Шенонов капацитет (2)

- Формула за Шенонов капацитет:

$$C = B \log_2(1 + S/N) \text{ b/s}$$

- Број разлучивих сигнала се добија из односа: $(S+N)/N = 1+S/N$

Жичане/Бежичне комуникације

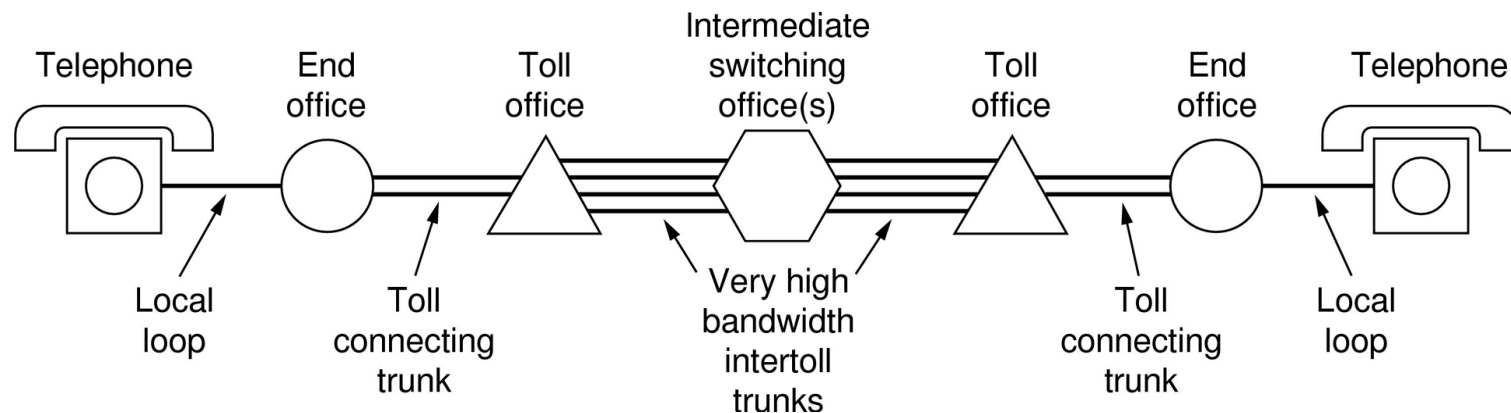
- Жице и оптика
 - Могу се пројектовати циљни SNR и B
 - Самим тим и циљни пренос у b/s
- Бежични канали
 - За дато B , SNR драстично варира, чак и до 60 dB!
 - Није исплативо пројектовати за најгори случај, мора се „живети“ са високим варијацијама преноса

Физички слој

Неки релевантнији системи комуникација

Систем фиксне телефоније

- Хијерархијски систем за пренос говора:
 - Локалне конекције (унутар места) најчешће упредене парице (постојећа инфраструктура)
 - Међумесне конекције, оптички каблови (новијег датума)
 - Централне, преусмеравање и одржавање конекција
- Путем овог система се реализује и DSL (односно ADSL)

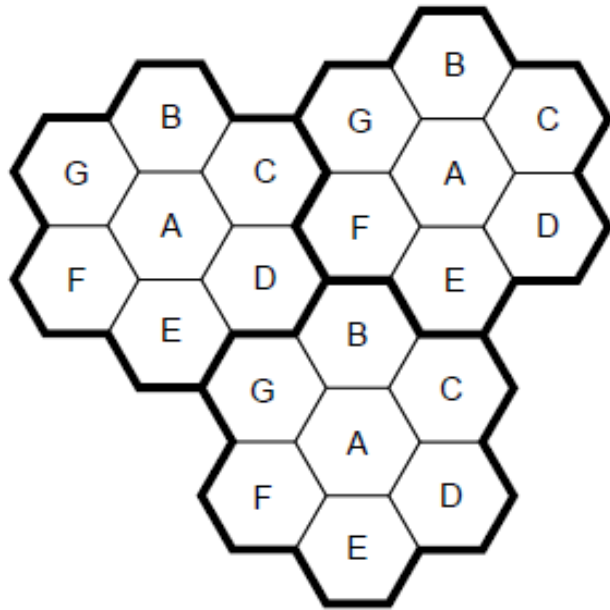


Систем мобилне телефоније - генерације

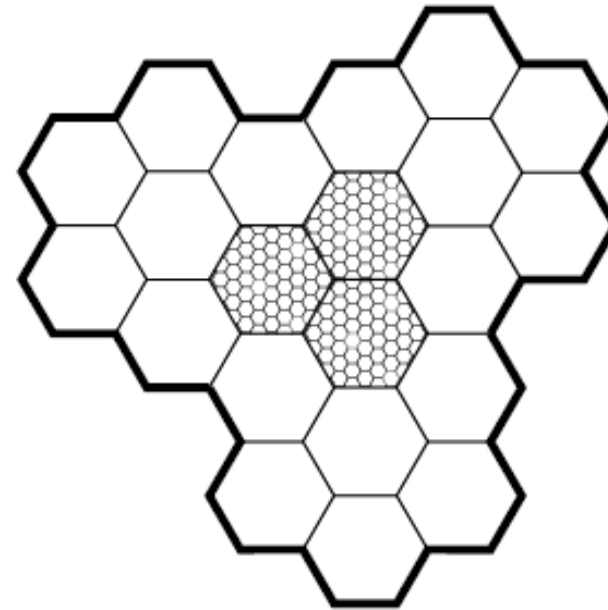
- 1G, аналогни глас
 - FM модулација (као код радија)
 - Одвојене фреквенције за слање и примање говора
- 2G, дигитални глас
 - GSM (Global System for Mobile communications)
 - QPSK модулација
- 3G, дигитални глас и подаци
 - UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)
 - Користи CDMA
- 4G, дигитални глас и подаци
 - LTE (Long Term Evolution)
 - OFDM модулација – напредна варијанта FDM

Организација базних станица

- Географске јединице које се називају ћелије односно базне станице
 - Сваки мобилни корисник користи ћелијску фреквенцију
 - При напуштању једне ћелије, прелази у другу (концепт под називом handoff)
 - Исте фреквенције се користе на несуседним ћелијама
 - За подржавање већег броја корисника, обично се ограничава географски простор ћелије



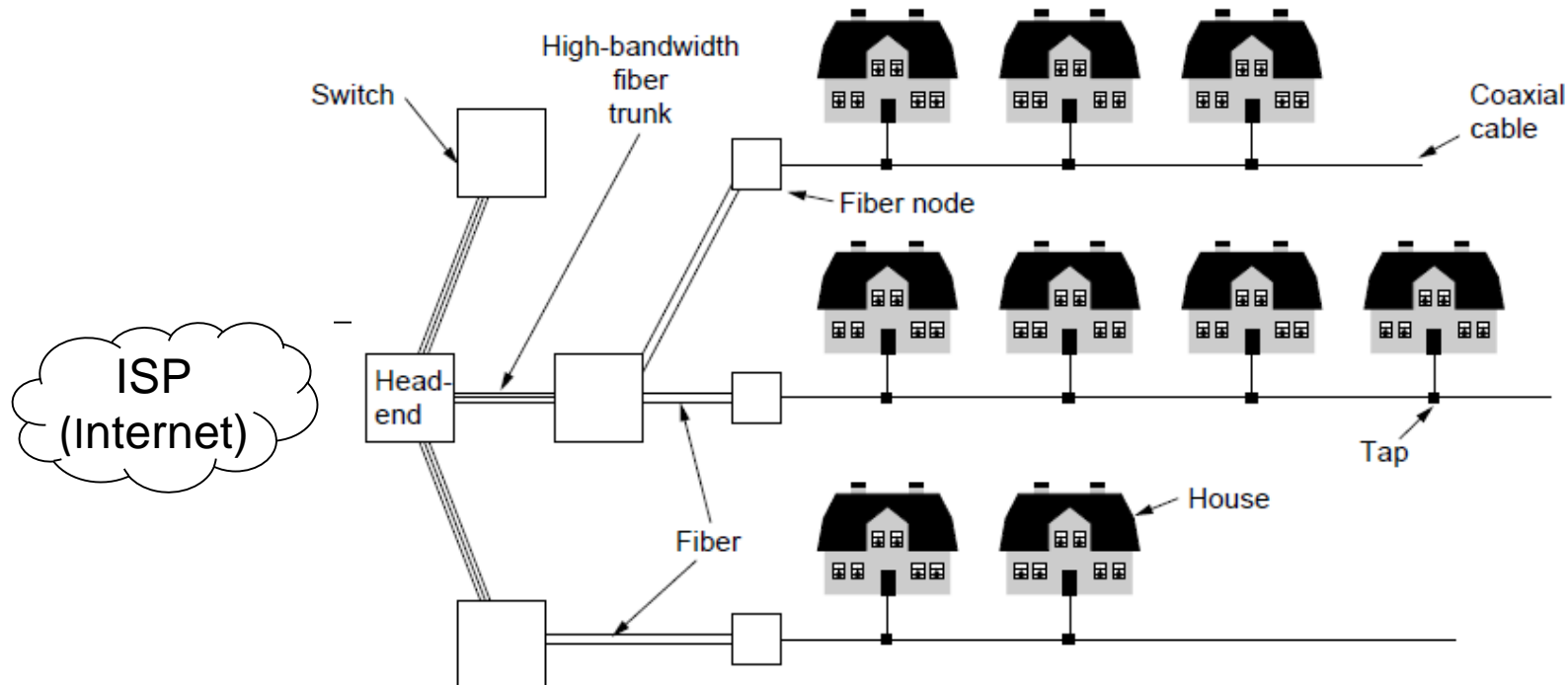
Расподела фреквенција



Мање ћелије за гушће насељене области

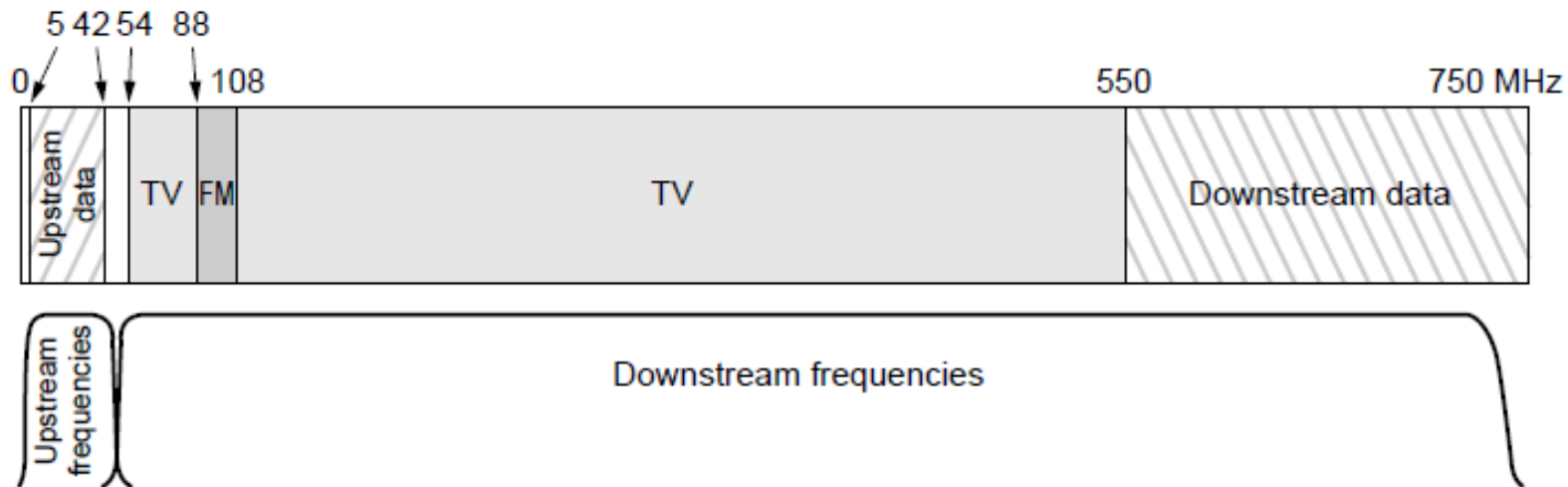
Интернет преко кабловске

- Интернет кабл може да користи постојећу инфраструктуру за кабловску телевизију
 - Другачија је топологија у односу на телефонски систем
 - Овде организација подсећа на топологију магистрале (дељеног канала)



Подела спектра фреквенција

- Преузимање и постављање података (download и upload) користе фреквенционе опсеге који се не користе за гледање TV програма



Кабловска или (A)DSL

- Кабловска:
 - + Користи коаксијалне каблове ка корисницима (добар проток)
 - Подаци се шаљу свима, јер је магистрала (мања сигурност)
 - Проток је дељен међу корисницима, па може варирати
- ADSL (асиметрична варијанта DSL-а):
 - + Проток је посвећен сваком кориснику
 - + Нема могућност емитовања као кабловска
 - Користи упредене парице на корисницима (нижи проток)