

Univerza v Ljubljani



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko

Komunikacije v avtomatiki

Podatkovno linijski sloj

Stanislav Kovačič

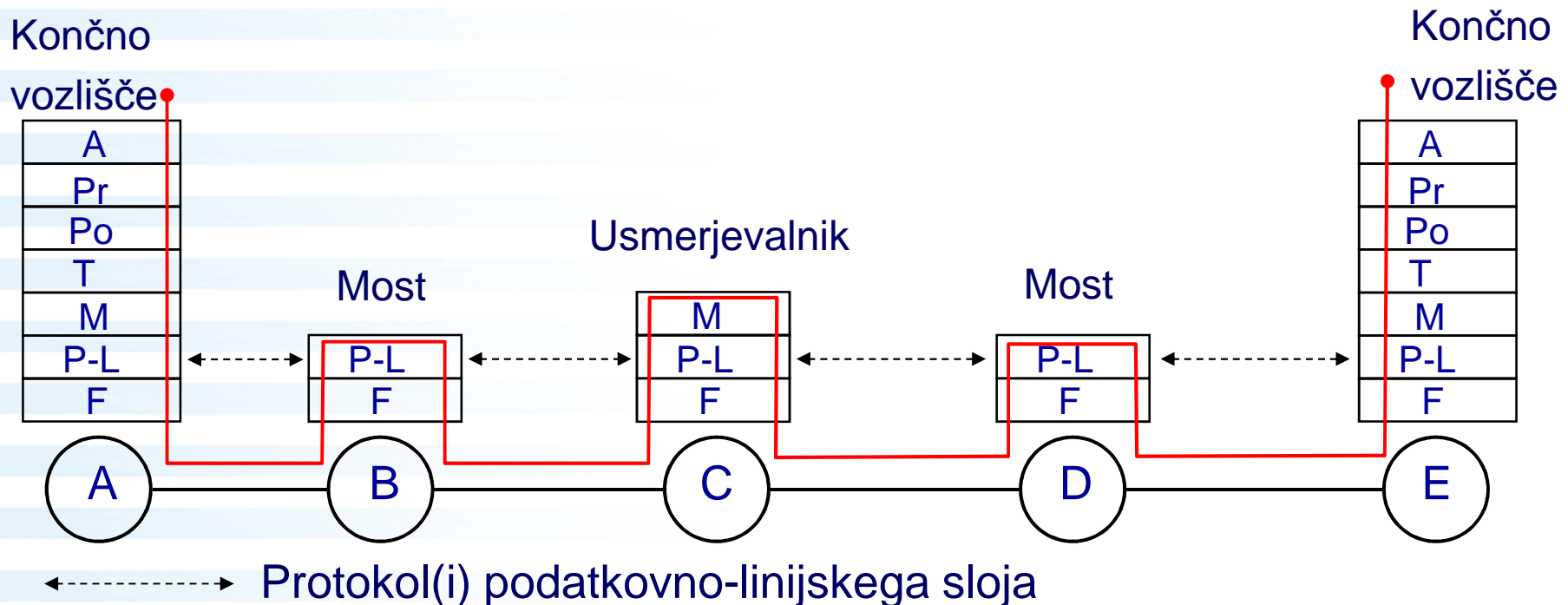


<http://vision.fe.uni-lj.si>

2013/14

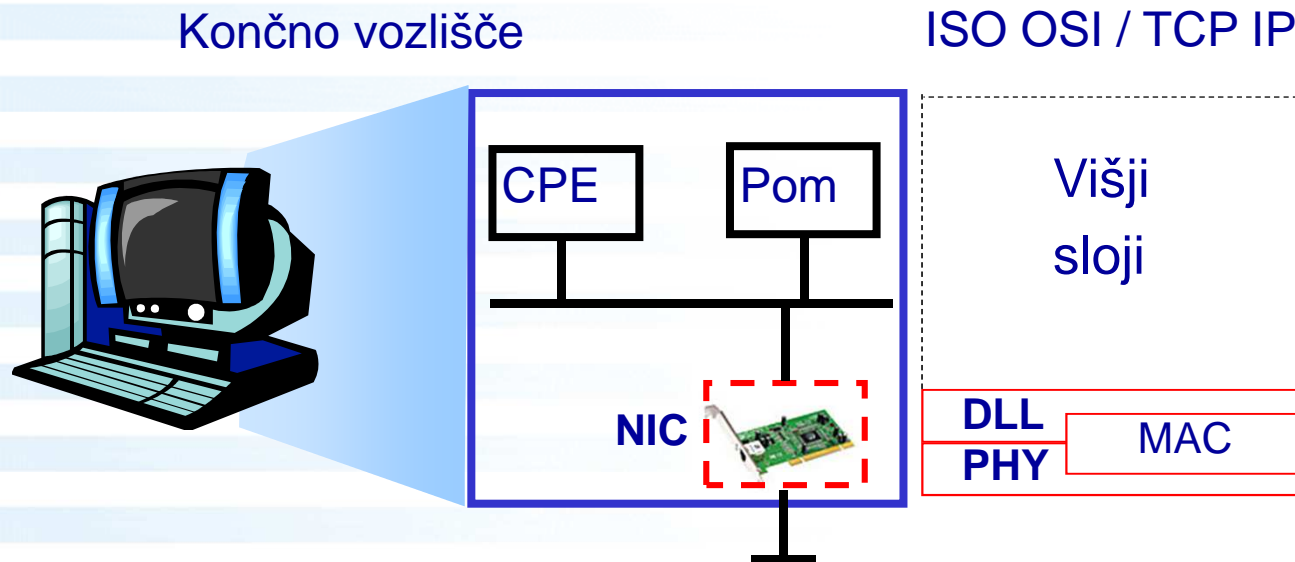
Podatkovno linijski sloj

- Podatkovno linijski sloj (**DLL**) skrbi za zanesljiv prenos podatkov med (sosednjimi) vozlišči.
- Osnovna (protokolovna) podatkovna enota je **okvir**.
- Pri prenosu okvirjev se lahko pojavljajo napake.
- Napake so redke, vendar možne; linijski sloj jih mora obvladovati.



Kje/kako je realiziran

- Podatkovno linijski sloj je realiziran s programsko in strojno opremo
 - Komunikacijski vmesnik, krmilnik, "kartica", "NIC", "Firmware"



Iz vsebine

- Okvirjenje
- Pretok podatkov
 - ABP, GBN, SRP
- Nadzor nad napakami (o tem dugič)
- Vrednotenje protokolov
 - izkoristek, prepustnost
- MAC (o tem smo že govorili)

Podatkovno linijski sloj (DLL)

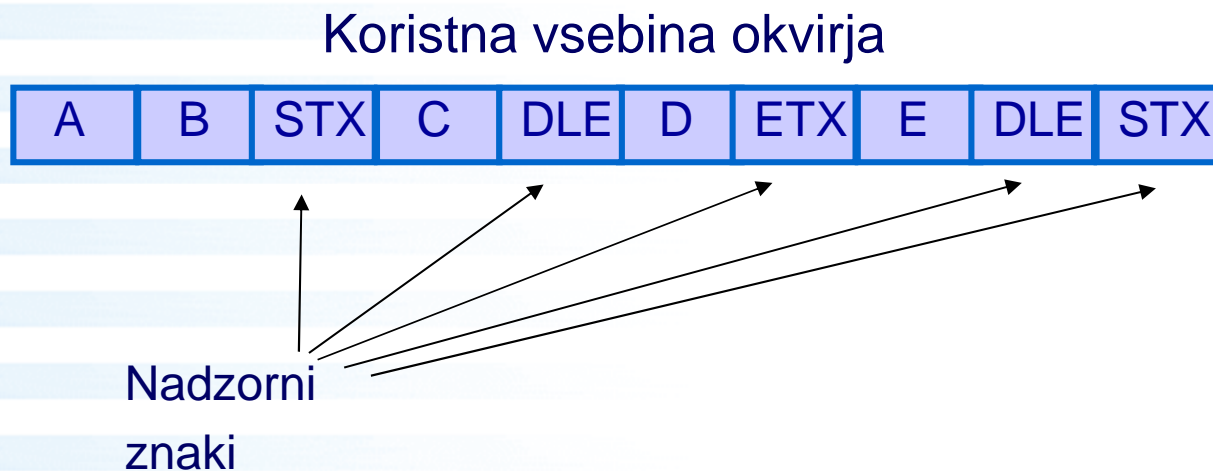
- Osnovna podatkovna enota podatkovno linijskega sloja je **okvir** (angl. **Frame**). Okvir ima svoj:
 - Začetek
 - Vsebino
 - Konec



- Vprašanje:
kako označiti začetek in konec okvirja tako, da se bosta razlikovala od vsebine v vseh okoliščinah?

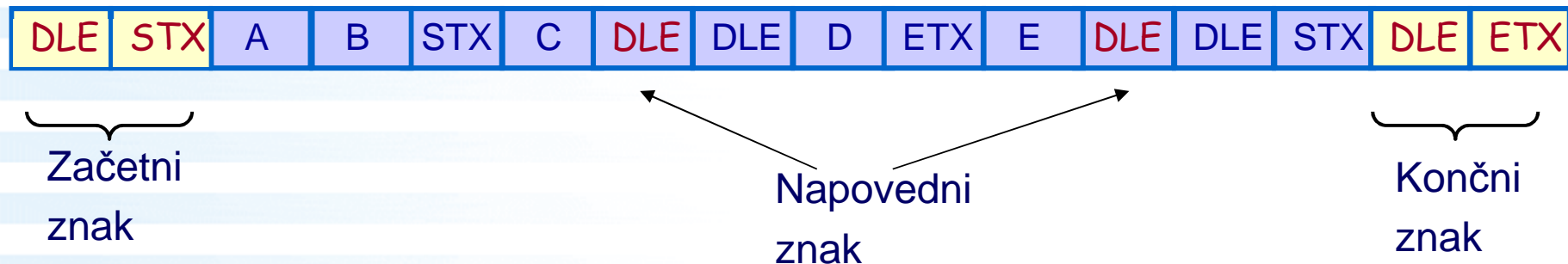
Okvirjenje - znakovni protokoli

- Znakovni protokoli (znakovno – **ASCII** – kodirani podatki)
 - Označevanje začetka in konca z domenjenimi nadzornimi znaki, na primer za začetek **STX** (Start Of Text) in **ETX** (End of Text) za konec.
 - Napovedovanje nadzornih znakov
- Vsebina je poljubna – v njej so zato lahko tudi podatki, ki se ujemajo z nadzornimi znaki (so enaki nadzornim znakom).



Okvirjenje - znakovni protokoli- v1

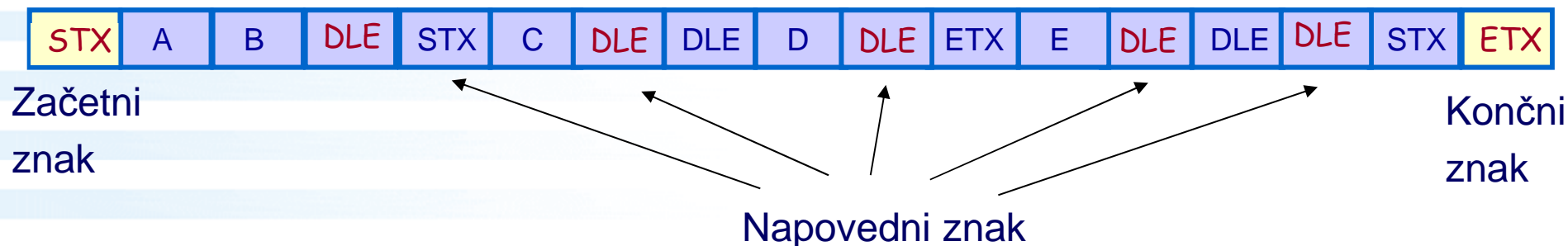
- Napovedni znak napove, da sledi nadzorni znak
- **DLE** (Data Link Escape): napovedni znak
- **DLE STX**: začetek okvirja; **DLE ETX**: konec okvirja



- Če v vsebini okvirja nastopa napovedni znak kot podatek, oddajnik vrine napovedni znak
- Vedno, kadar sprejemnik sprejme napovedni znak (**DLE**), ga enostavno zavrže, naslednji znak pa obravnava kot nadzorni znak
 - **STX**: začetek okvirja
 - **ETX**: konec okvirja
 - **DLE**: podatek

Okvirjenje - znakovni protokoli - v2

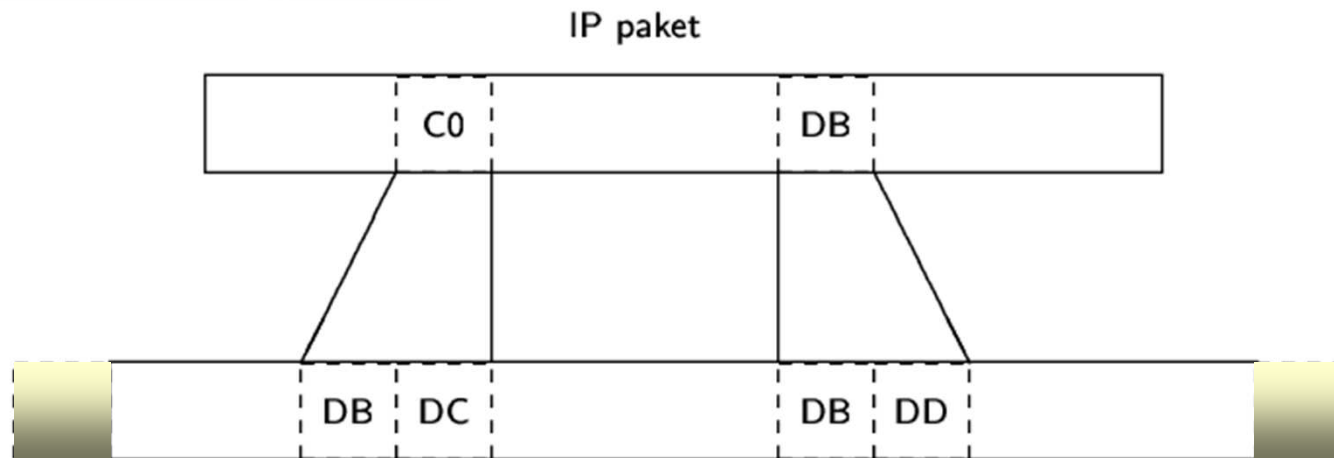
- Napovedni znak napove, da sledi podatek
- **DLE** (Data Link Escape): napovedni znak



- Če v vsebini okvirja nastopa napovedni ali nadzorni znak kot podatek, oddajnik vrine napovedni znak
- Vedno, kadar sprejemnik sprejme napovedni znak (**DLE**), ga enostavno zavrže, naslednji znak pa obravnava kot podatek
 - **STX**: začetek okvirja
 - **ETX**: konec okvirja
 - **DLE**: napovedni znak

Okvirjenje - primer SLIP - V3

SLIP: Serial Line IP, preprost znakovni protokol, ki ga je zamenjal PPP



C0 (hex): začetek in konec okvirja

Če se C0 pojavi v vsebini okvirja, se ga zamenja z DB DC

Če se DB pojavi v vsebini okvirja, se ga zamenja z DB DD

Okvirjenje - bitni protokoli

- Bitni protokoli (brez kakršnegakoli znakovnega kodiranja)
 - Označevanje začetka in konca z domjenim bitnim vzorcem
 - Bitni vzorec – “zastavica” je običajno 01111110
 - Vrivanje “ničel” v primeru, da se mejna zastavica pojavi kot podatek v vsebini okvirja
 - Za vsako zaporedno peto enico oddajnik “vrine” ničlo

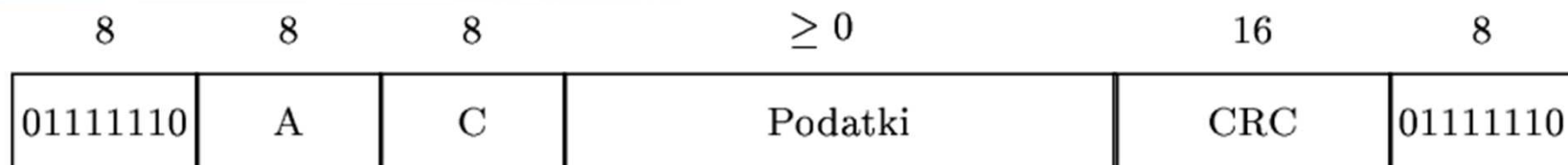
010101010111101111101111110110011111111

01111110 01010101011110111110 01111110 1011001111110111 01111110

Vrinjena (polnilna) ničla

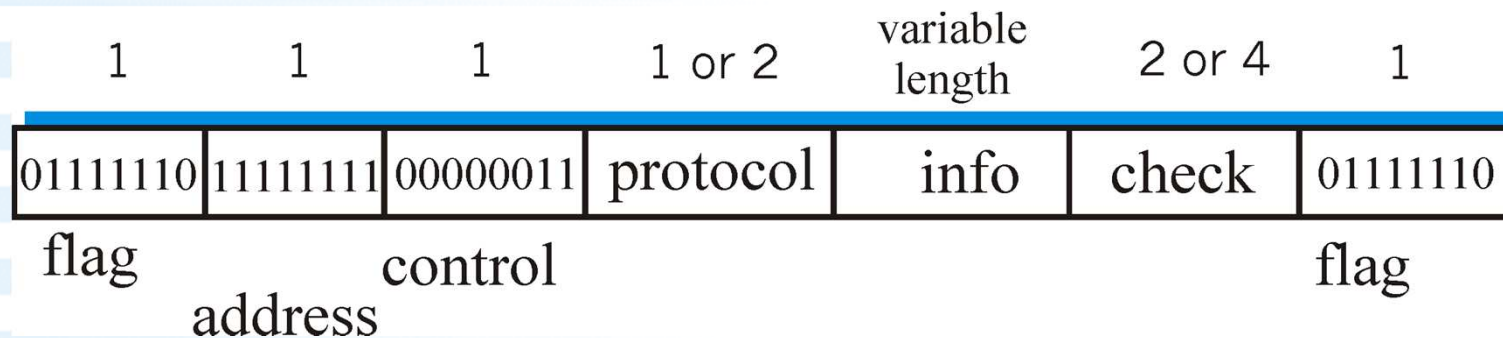
- Sprejemnik vsako ničlo, ki sledi petim enicam, enostavno zavrže

Okvirjenje - primer HDLC, ...



SDLC, HDLC, LABB, PPP, vsi uporabljajo enak način okvirjenja

Okvirjenje - PPP



Oddajnik:

Pred vsak vzorec 01111110 oddajnik vrine 01111101

Sprejemnik:

Vsak enojni 01111110 obravnava kot zastavico

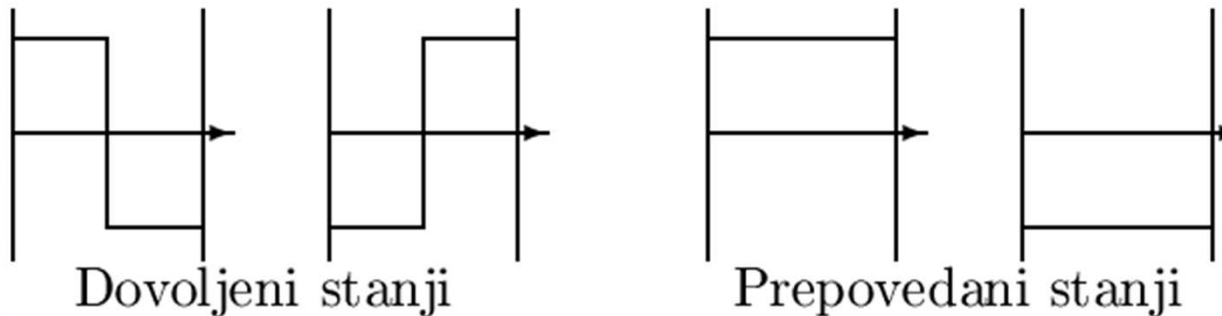
Vsak dvojni 01111101 obravnava kot podatek 01111101

Vsak 01111101 01111110 obravnava kot podatek 01111110

Dejansko gre za znakovni (ne bitni) način vrivanja

Okvirjenje

- Označevanje začetka in konca z drugačno obliko signala, kot za kodiranje podatkov:



- Klasični ethernet uporablja tak način okvirjenja
- Skoraj vedno se skupaj z označevanjem začetka in konca okvirja v glavo okvirja doda še dolžino (število podatkov) okvirja.

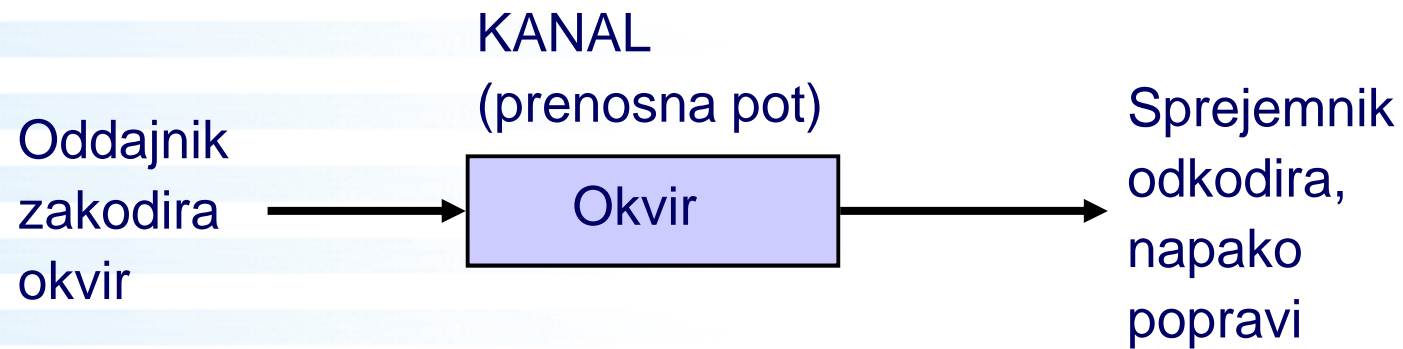
Pretok podatkov - protokoli

- Pri prenosu okvirjev se lahko pojavljajo napake.
- Napake so redke, vendar možne.
- Podatkovno linijski sloj skrbi za zanesljiv prenos okvirjev
 - To vključuje odkrivanje/popravljanje potencialnih napak na okvirjih
 - Za popravljanje napak se uporabljajo ustrezni postopki kodiranja
 - Oddajnik zakodira okvir po izbranem pravilu kodiranja
 - Sprejemnik okvir odkodira, ugotovi, če je do napake prišlo, kje je napaka ter jo popravi.
 - Za odkrivanje napak se uporabljajo ustrezni postopki kodiranja
 - Oddajnik zakodira okvir po izbranem pravilu kodiranja
 - Sprejemnik okvir odkodira, ugotovi, če je do napake prišlo, ker ne ve, kje je napaka, zahteva ponoven prenos istega okvirja.

Pretok podatkov - protokoli

- Popravljanje napak:
Vnaprejšnje popraviljanje napak (FEC: Forward error correction)
To zahteva postopke kodiranja za popraviljanje napak.
Ker se napaka, ki mogoče nastane med prenosom, da popraviti,
ponavljanje okvirja ni potrebno.
- Odkrivanje napak:
Avtomatska zahteva za ponovitev (ARQ: Automatic Repeat Request)
predvideva ponavljanje prenosa pokvarjenih okvirjev.
V tem primeru zadošča kodiranje za odkrivanje napak.

Vnaprejšnje popravljanje napak



- Tak način je primeren
 - Za prenosne poti slabše kakovosti
 - Za prenosne poti z veliko kasnitvijo
 - Za neponovljive prenose (shranjevanje podatkov)

Avtomatska zahteva za ponovitev

KANAL
(prenosna pot)

Oddajnik zakodira
in odda okvir

Okvir_0

Sprejemnik odkodira,
Npr. odkrije napako

Oddajnik
sprejme zahtevo

NAK

Sprejemnik
zahteva ponovitev

Oddajnik
ponovi isti okvir

Okvir_0

Sprejemnik odkodira,
napake ne odkrije

Oddajnik
sprejme zahtevo

ACK

Sprejemnik
zahteva naslednji okvir

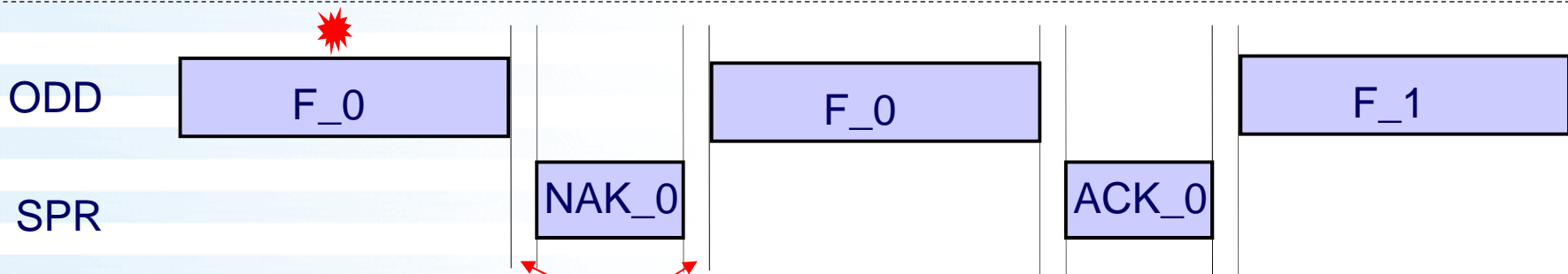
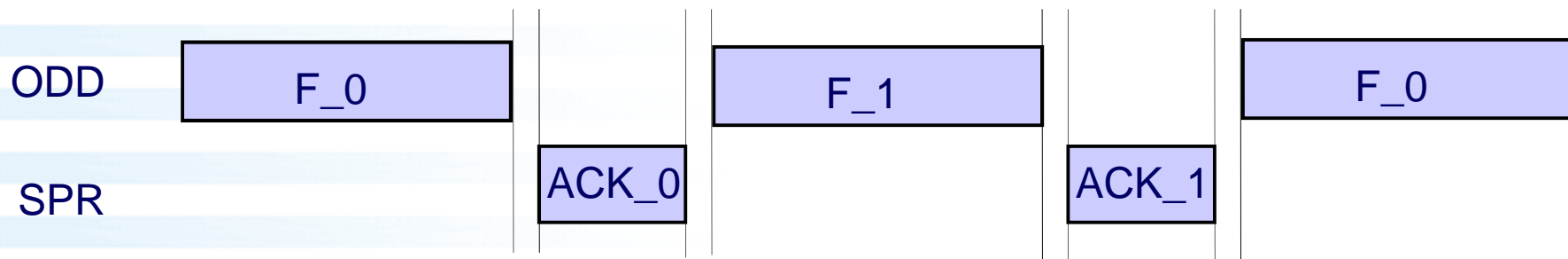
Oddajnik zakodira
odda naslednji
okvir

Okvir_1

Sprejemnik odkodira,
I.T.D

Sprotno potrjevanje - ABP

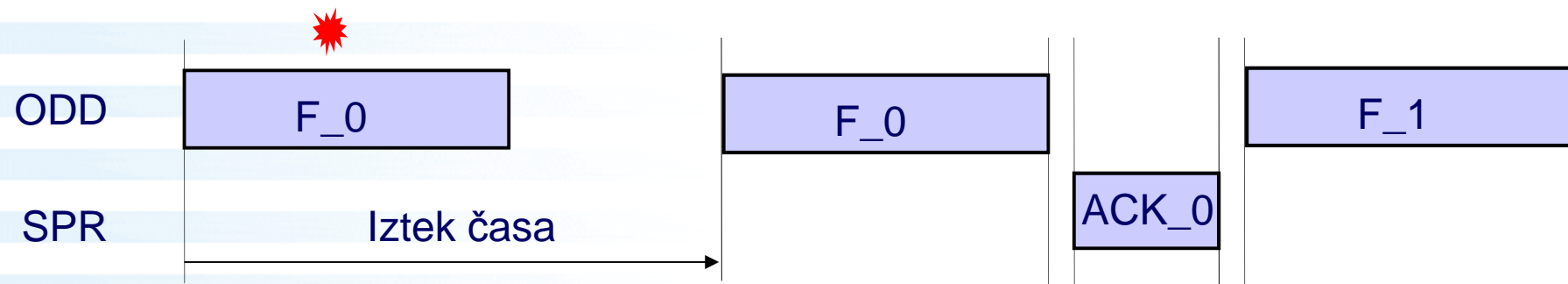
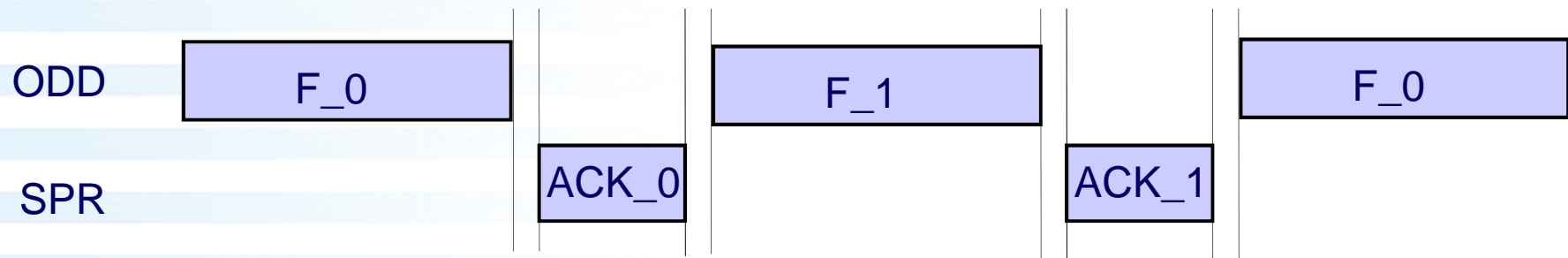
- Obstajata dva načina (sprotnega) potrjevanja:
- Pozitivno in negativno potrjevanje (ACK/NAK)
- (Samo) pozitivno potrjevanje, izostanek potrdila pomeni napako (ACK)



Kasnitev linije

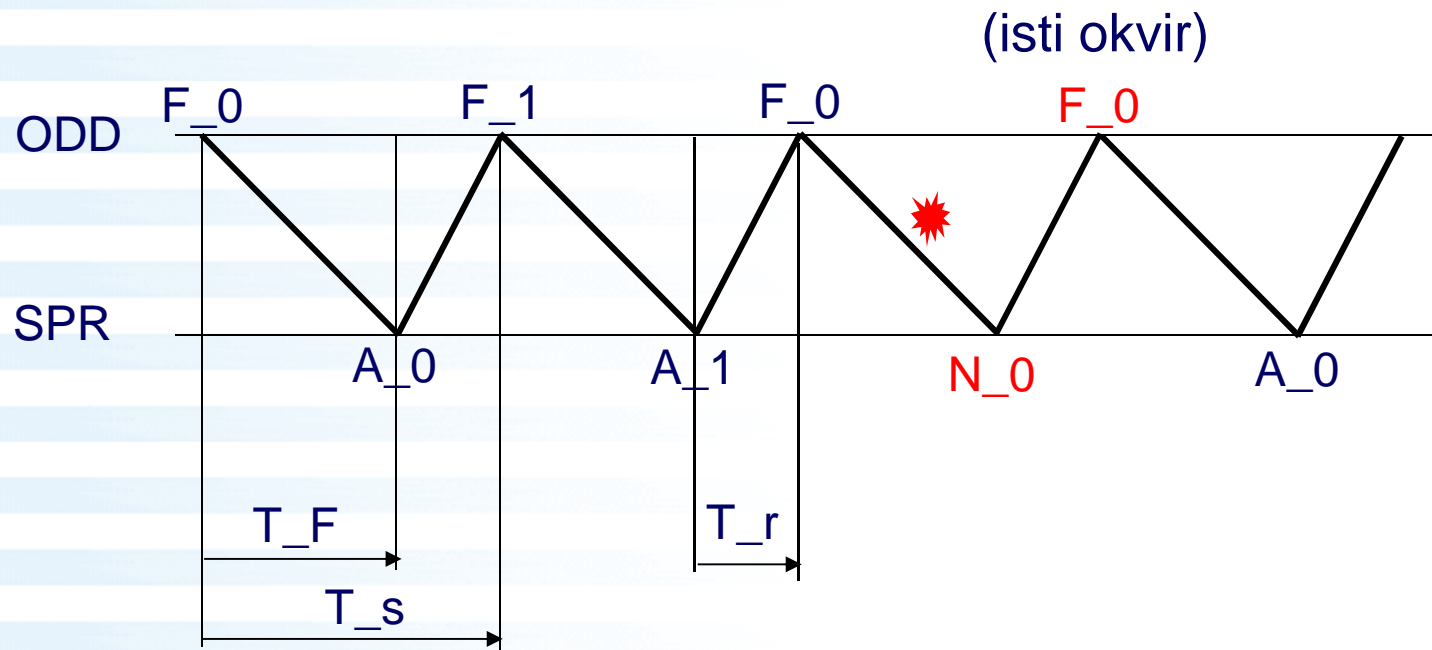
Sprotno potrjevanje - ABP

- Samo pozitivno potrjevanje, izostanek potrdila pomeni napako (ACK)



- ABP (Alternating Bit Protocol) – nič/ena številčenje

Pozitivno/negativno potrjevanje



T_F : Čas trajanja okvirja

T_s : Obhodni čas (Angl. Round trip time)

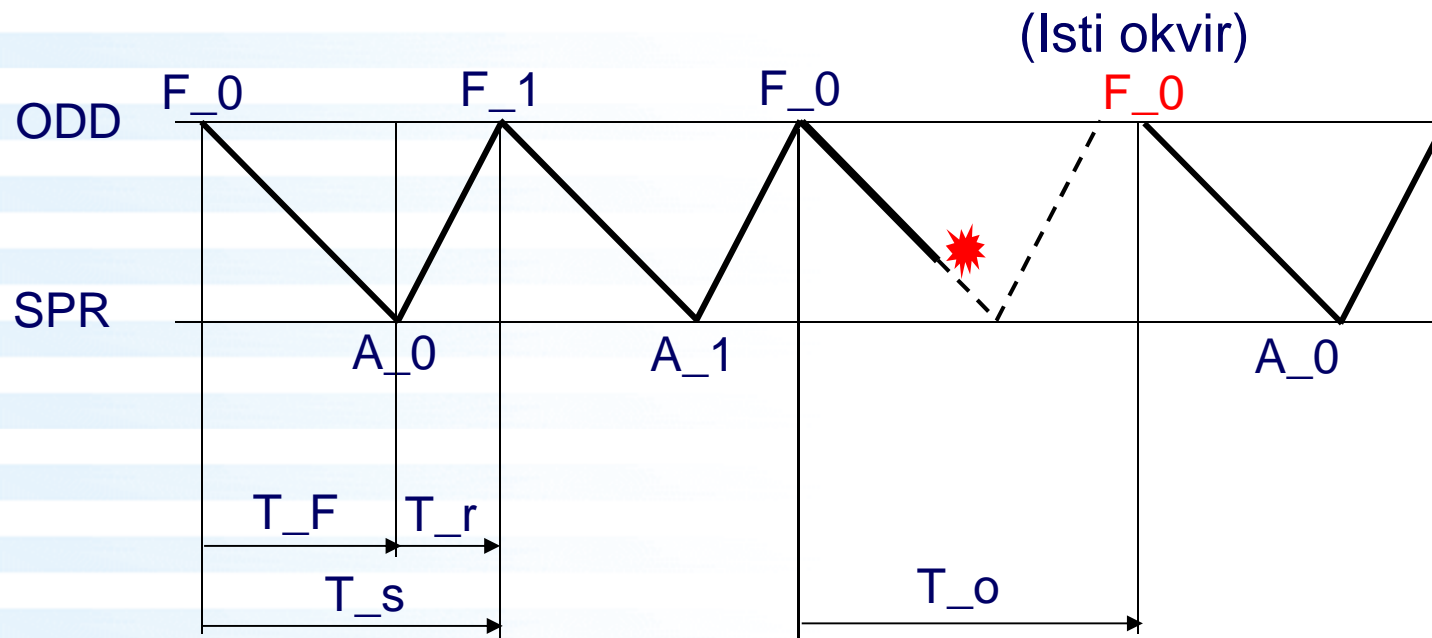
T_r : Čas povratka = $T_z + T_A + T_z$

T_A : Čas trajanja potrdila

T_z : Kasnitev linije

$T_s = T_F + T_r = T_F + T_z + T_A + T_z$

Pozitivno potrjevanje



T_F: Čas trajanja okvirja

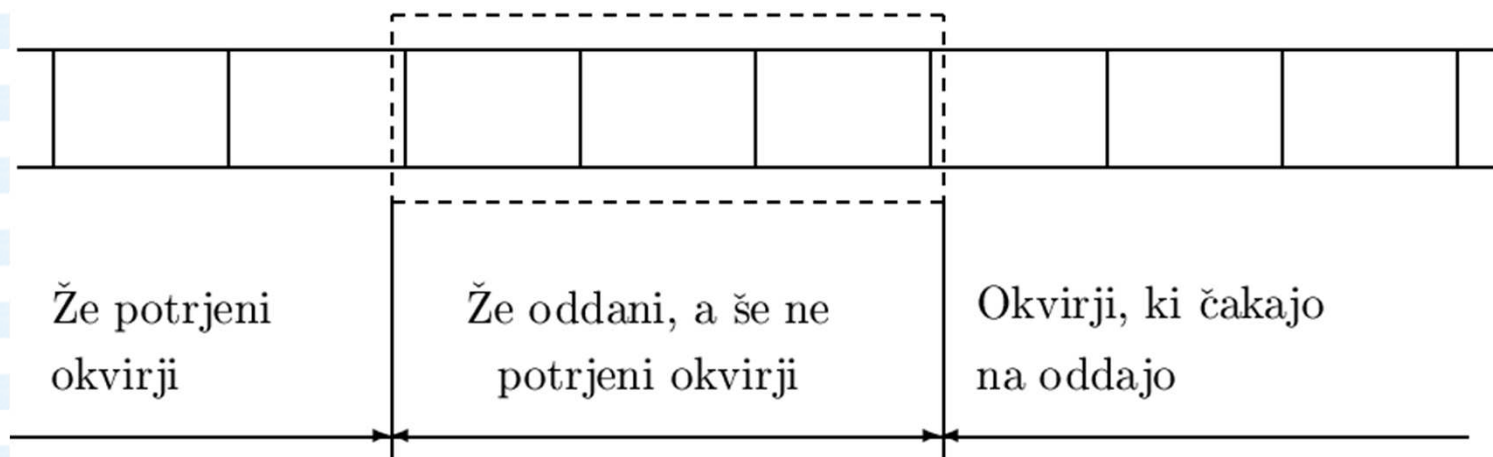
T_s: Obhodni čas (Angl. Round trip time)

T_o: iztek časa (Angl. Time out)

$$T_o = T_s + \Delta \approx T_s$$

Pomembno: V vseh primerih je potrebno številčenje okvirjev in potrdil

Drseče okno (angl. Sliding Window)

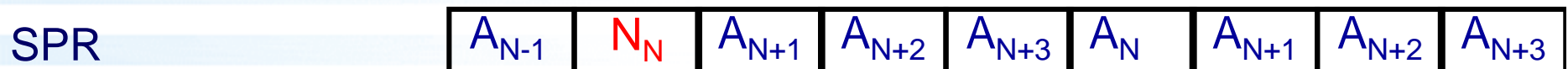
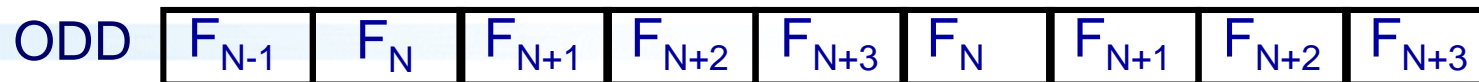


- Oddajnik oddaja okvir za okvirjem in ne čaka na potrdilo zadnje oddanega okvirja
- Koliko okvirjev odda predno dobi potrdilo, določa parameter protokola – velikost okna.
- Velikost okna omeji velikost oddajnega/sprejemnega medpomnilnika
- Velikost okna omeji velikost števil (oznak) okvirjev

Drseče okno, GBN, SRP

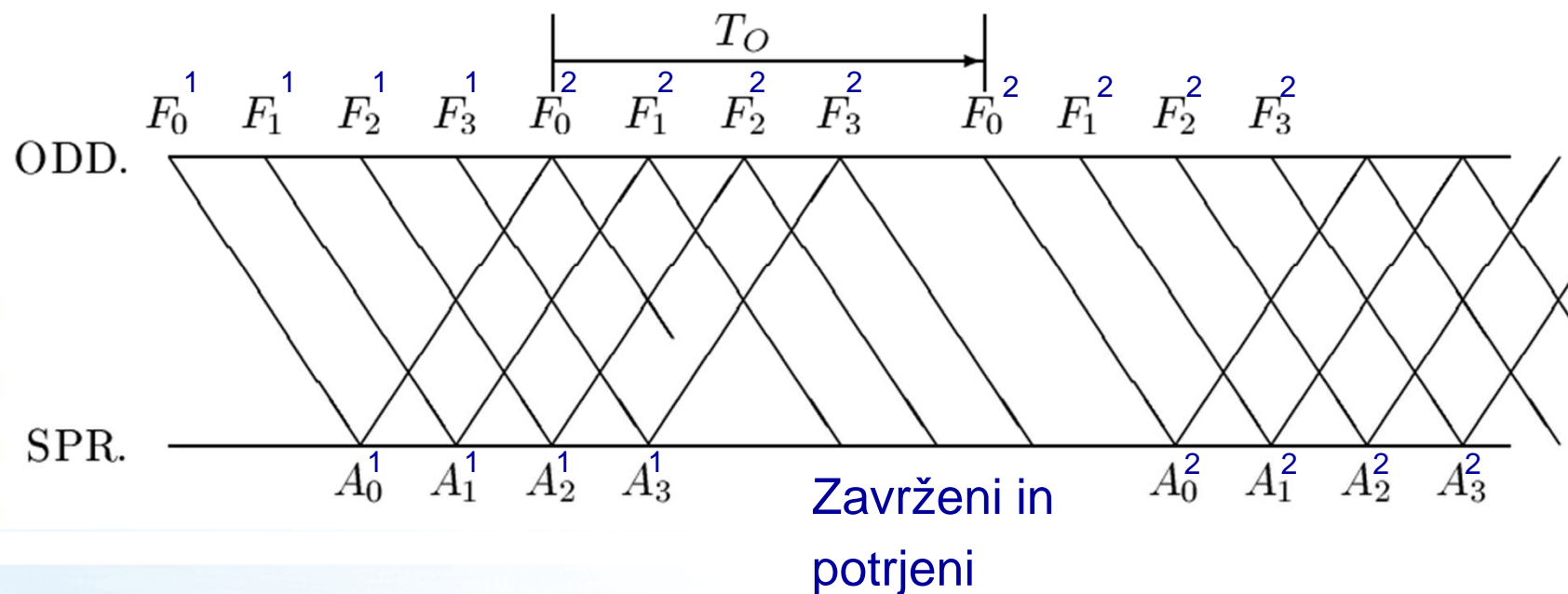
- GBN (angl. Go Back N) – vračanje na N
 - Ponovno se prenašajo vsi okvirji od pokvarjenega naprej
- SRP (angl. Selective Repeat Protocol) – selektivno ponavljanje
 - Ponovno se prenaša samo pokvarjeni okvir

Vračanje na N – GBN (Go-Back-N)



- Oddajnik oddaja okvir za okvirjem
- Sprejemnik potrjuje okvirje
- V primeru napake na N-tem okvirju, oddajnik ponovi N-ti okvir in vse okvirje, ki so bili oddani za njim.
- Kanal je bolj obremenjen (prenašajo se tudi okvirji, ki so bili že prenešeni)
- Sprejemnik pa ima lažje delo

Vračanje na N – GBN (Go-Back-N)



- GBN s pozitivnim potrjevanjem
- Velikost okna = 4
- Opomba: zgornji indeks pomeni, da gre za različne okvirje, čeprav z enako številko (t.j. oznako) znotraj okvirja (spodnji indeks).

Selektivno ponavljanje – SRP

ODD

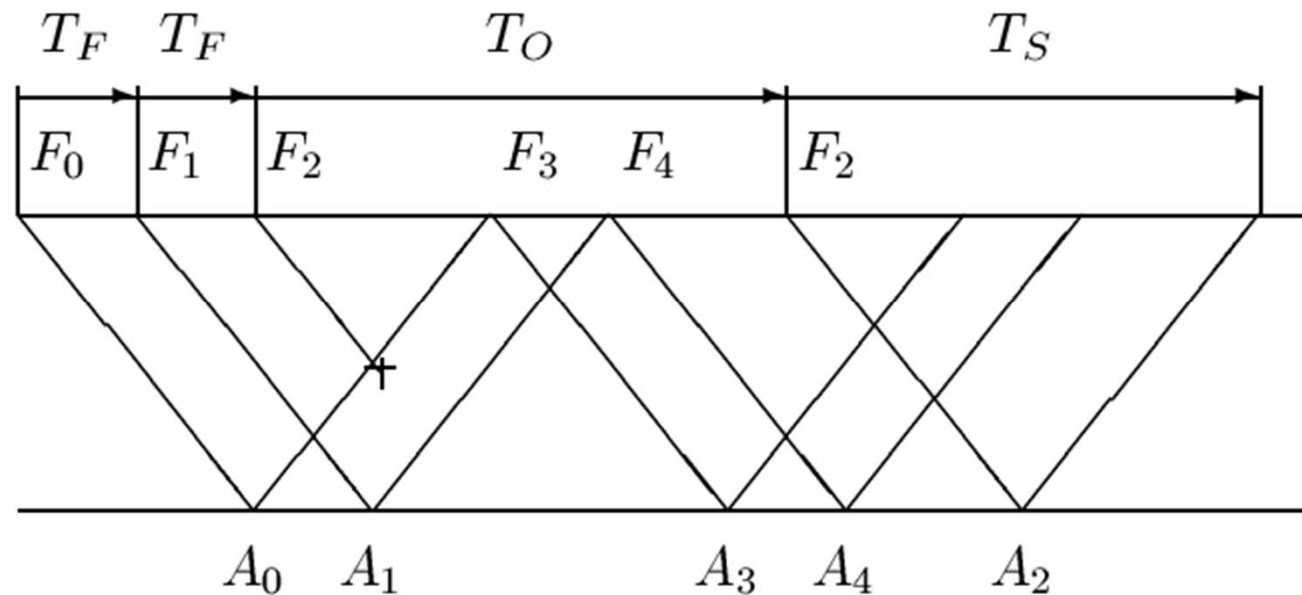
F_{N-1}	F_N	F_{N+1}	F_{N+2}	F_{N+3}	F_N	F_{N+4}	F_{N+5}	F_{N+6}
-----------	-------	-----------	-----------	-----------	-------	-----------	-----------	-----------

SPR

A_{N-1}	N_N	A_{N+1}	A_{N+2}	A_{N+3}	A_N	A_{N+4}	A_{N+5}	A_{N+6}
-----------	-------	-----------	-----------	-----------	-------	-----------	-----------	-----------

- Oddajnik oddaja okvir za okvirjem
- Sprejemnik potrjuje okvirje
- V primeru napake na N-tem okvirju, oddajnik ponovi samo N-ti okvir
- Kanal je manj obremenjen (prenašajo se samo okvirji, ki so bili pokvarjeni)
- Sprejemnik ima težje delo – vzpostaviti mora pravi vrstni red okvirjev

Selektivno ponavljanje - SRP



- SRP s pozitivnim potrjevanjem
- Velikost okna = 3
- Opomba:
 - pri GBN številčimo okvirje mod N
 - Pri SRP številčimo okvirje mod $2N$

Povzetek

- Avtomatska zahteva za ponovitev (ARQ)
 - Pozitivno potrjevanje (ACK)
 - Pozitivno in negativno potrjevanje (ACK/NAK)
- Oboje je možno s:
 - Sprotnim potrjevanjem (ABP)
 - Z vračanjem (GBN) ali selektivnim ponavljanjem (SRP)
 - Oboje z drsečim oknom
- Današnji protokoli:
 - ABP: kjer pretočnost ni problematična, npr. IEC 60870-5
 - GBN/SRP način (eno ali drugo) z nastavljenim oknom
- Spričo vse bolj kakovostnih prenosnih poti se pomen podatkovno linijskih protokolov manjša.
- Koncept ponavljanja pa je prisoten tudi na drugih slojih – prenosnega tipa, na primer protokol TCP.

Izkoristek, prepustnost

- **Izkoristek (E):**

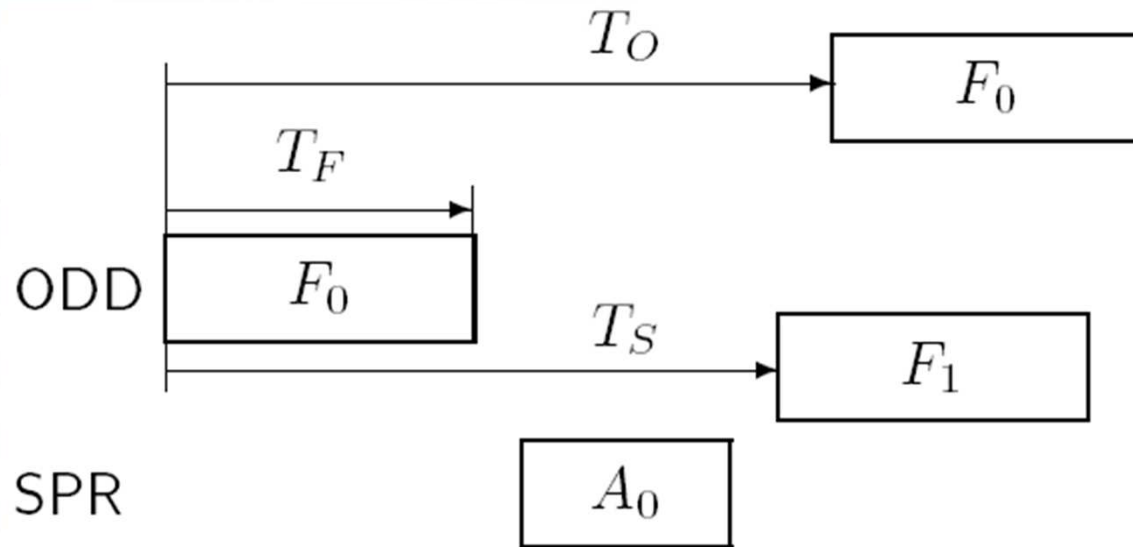
razmerje med (povprečnim) časom, ko prenašamo koristne podatke in časom, ki je (v povprečju) potreben za to.

- T_F : čas trajanja okvirja
- T_S : čas prenašanja okvirja
- $E = T_F/T_S$

- Opomba: kaj so “koristni” podatki, je odvisno od dotičnega primera.

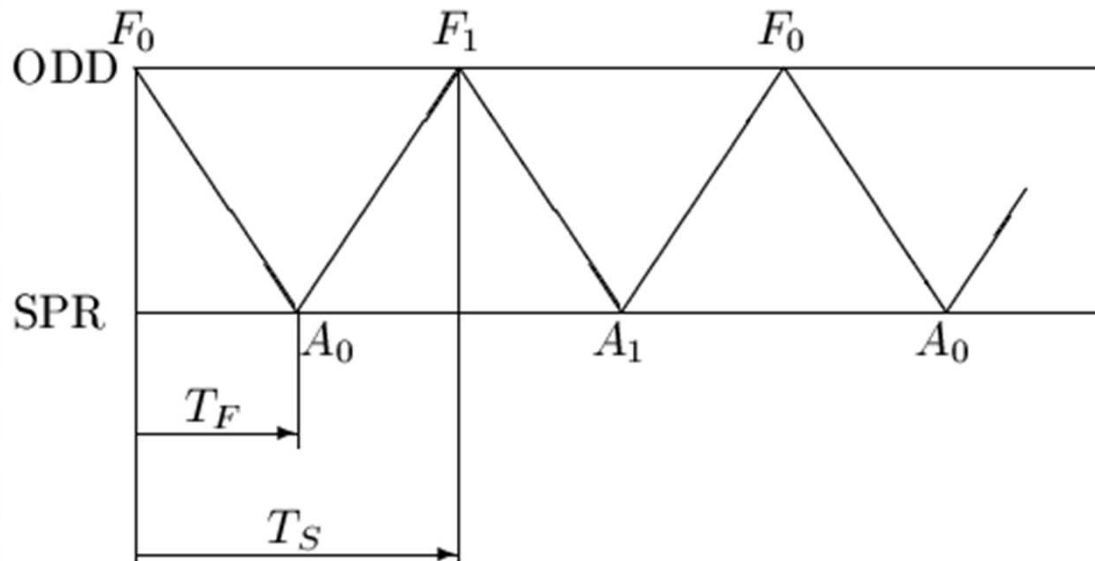
- **Prepustnost = Izkoristek x hitrost prenašanja**

ABP 1/8



- ABP (Alternating Bit Protokol)
- Številčenje okvirjev in potrdil izmenično z nič in ena

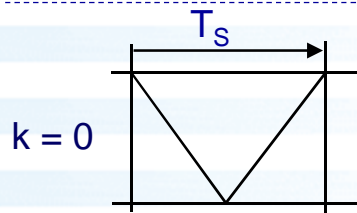
ABP 2/8



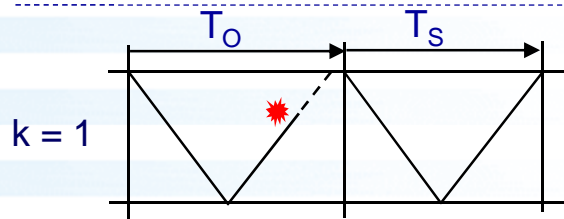
- Dokler ni napak: $E_{ABP}(p=0)=T_F/T_S$
- V primeru napake je potrebna ponovitev istega okvirja
- Pravzaprav se iti okvir lahko pokvari tudi večkrat

ABP 3/8

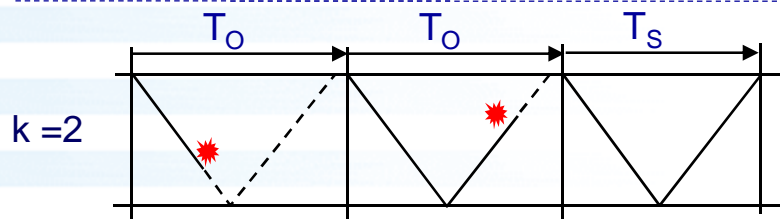
- Ponavljamo, dokler prenos okvirja ne uspe



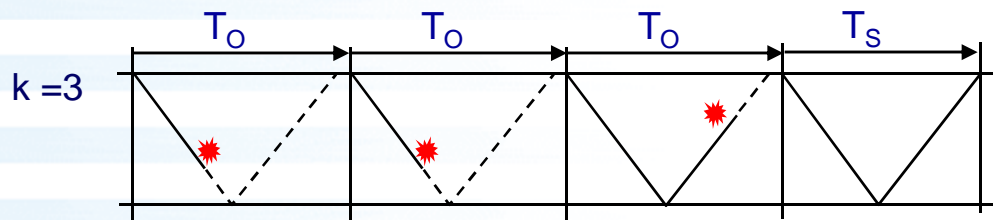
Ni napake



Enkrat napaka



Dvakrat napaka



Trikrat napaka

$k = 4$ in tako dalje

ABP 4 / 8

Naj bo verjetnost, da se okvir (ali potrdilo) pokvari, enaka p
($0 < p < 1$, je parameter prenosne poti)

Verjetnost, da se ne pokvari, je potem $(1-p)$

Čas prenašanja obravnavamo kot naključno spremenljivko

$$T = \left\{ \begin{array}{cccc} t_0, & t_1, & \dots, & t_k, & \dots \\ p_0, & p_1, & \dots, & p_k, & \dots \end{array} \right\}$$

ponovitev	Verjetnost	Trajanje
$k = 0$	$p_0 = (1 - p)$	$t_0 = T_S$
$k = 1$	$p_1 = p \cdot (1 - p)$	$t_1 = T_o + T_S$
$k = 2$	$p_2 = p \cdot p \cdot (1 - p)$	$t_2 = T_o + T_o + T_S$
$k = 3$	$p_3 = p^3 \cdot (1 - p)$	$t_3 = 3 \cdot T_o + T_S$
\dots	\dots	
k	$p_k = p^k \cdot (1 - p)$	$t_k = k \cdot T_o + T_S$

ABP 5/8

$$\begin{aligned}\bar{T} &= \sum_{k=0}^{\infty} t_k \cdot p_k \quad \leftarrow \text{Povprečni čas prenašanja okvirja} \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} (k \cdot T_o + T_S) \cdot p_k \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} (k \cdot T_o + T_S) \cdot p^k \cdot (1 - p) \\ &= T_o \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p^{k-1} \cdot p \cdot (1 - p) + T_S \sum_{k=0}^{\infty} p^k \cdot (1 - p) \\ &= T_o \cdot p \cdot (1 - p) \frac{d}{dp} \left(\sum_{k=1}^{\infty} p^k \right) + T_S \cdot (1 - p) \sum_{k=0}^{\infty} p^k \\ &= T_o \cdot p \cdot (1 - p) \frac{d}{dp} \left(\frac{1}{1 - p} - 1 \right) + T_S \cdot (1 - p) \frac{1}{1 - p} \\ &= T_o \cdot p \cdot (1 - p) \frac{1}{(1 - p)^2} + T_S = \boxed{T_o \frac{p}{1 - p} + T_S}\end{aligned}$$

ABP 6 / 8

$$E_{ABP}(p) = \frac{T_F}{\bar{T}} = \frac{T_F}{T_S + T_o \frac{p}{1-p}}$$

$$T_o \approx T_S$$

$$E_{ABP}(p) \approx \frac{T_F}{T_S(1 + \frac{p}{1-p})} = (1 - p) \frac{T_F}{T_S}$$



Število vseh prenašanih okvirjev: 16

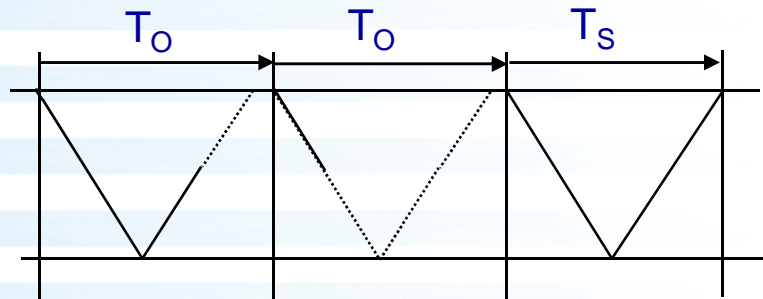
Število pokvarjenih okvirjev: 4

Delež pokvarjenih okvirjev, relativna frekvenca

oziroma pogostost napake je $4/16 = 0,25$ (ocena verjetnosti napake p)

Izkoristek = $0,75 \times T_F/T_S$

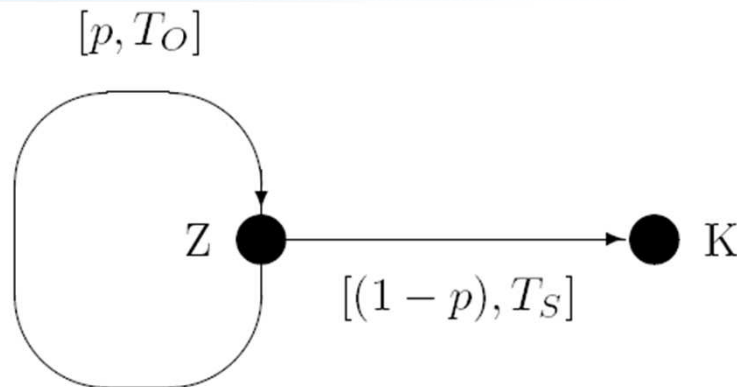
ABP 7/8



Povprečni čas prenašanja okvirja

$$E_{ABP}(p) = \frac{T_F}{\bar{T}}$$

$$\bar{T} = p \cdot (T_O + \bar{T}) + (1 - p) \cdot T_S$$



$$\bar{T} = T_S + \frac{p}{1-p} T_O$$

$$E_{ABP}(p) = \frac{T_F}{T_S + \frac{p}{1-p} T_O}$$

p ... Verjetnost napake na okvirju ali potrdilu

ABP 8 / 8

$$T_O \approx T_S, \bar{T} = \frac{1}{1-p} T_S$$

$$E_{ABP}(p) = (1-p) \frac{T_F}{T_S}$$

$$E_{ABP}(p) = (1-p) \frac{F}{F + A + 2 \cdot T_z \cdot C}$$

$$T_S = T_F + T_A + 2 \times T_z$$

Število bitov za okvir

$$T_F = F / C \rightarrow F = T_F \times C$$

Število bitov za potrdilo

$$T_A = A / C \rightarrow A = T_A \times C$$

p ... Verjetnost napake linearno zmanjšuje izkoristek

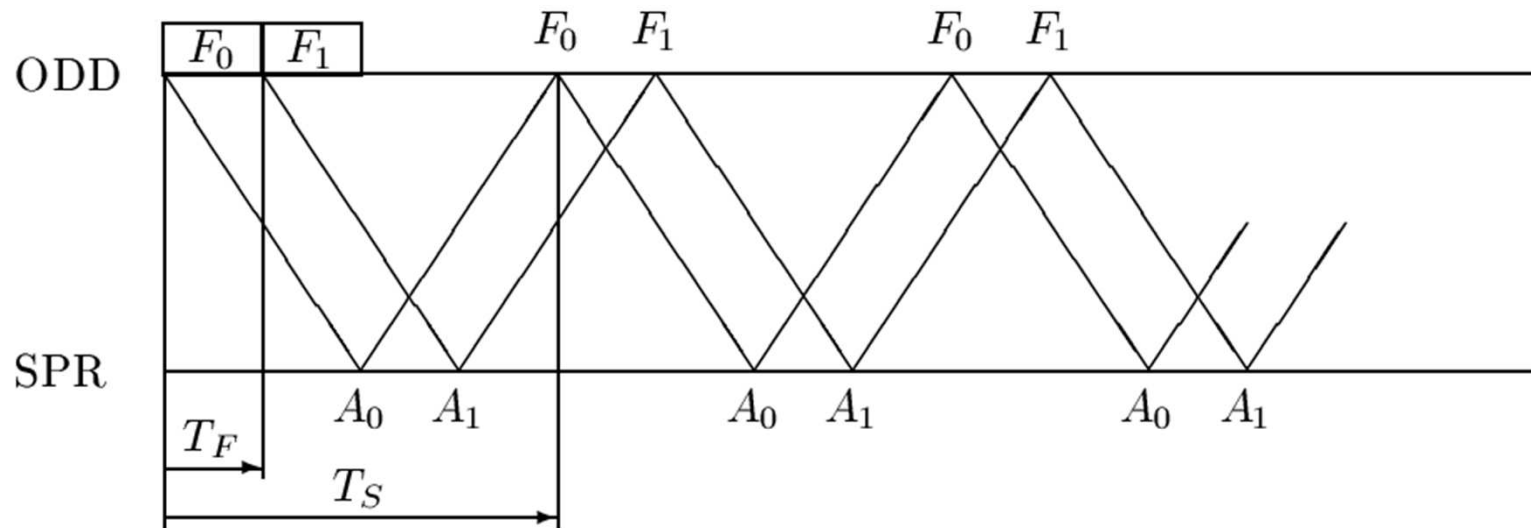
T_z ... Kasnitev zmanjšuje izkoristek

C ... Pri visokih hitrostih pride to še bolj do izraza

Op.: ABP izkorišča polni duplex za poldupleksni prenos.

GBN 1/4

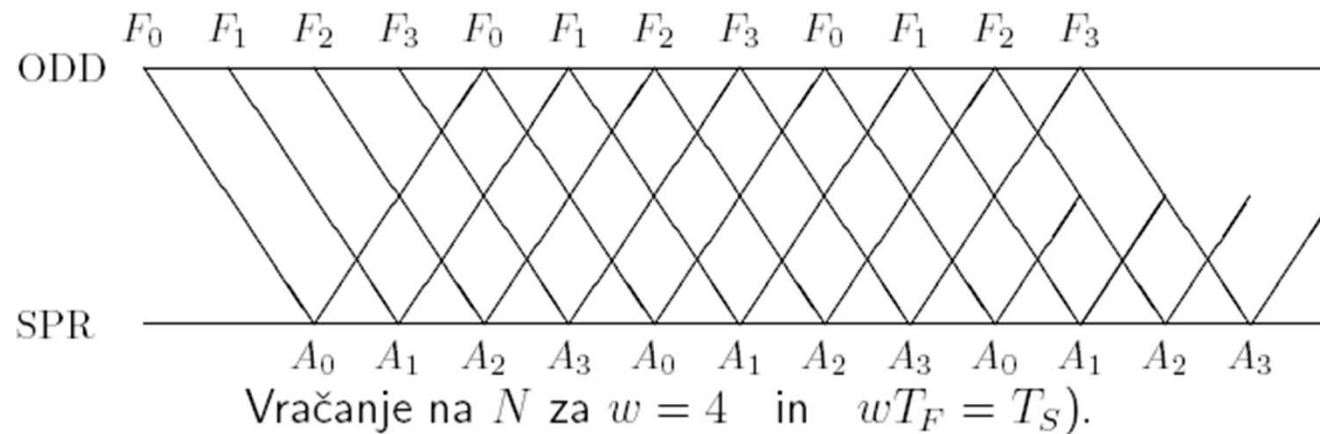
GBN za primer, ko ni napak



Vračanje na N za $w = 2$.

$$E_{GBP}(p = 0) = \frac{w \cdot T_F}{T_S}$$

GBN 2/4

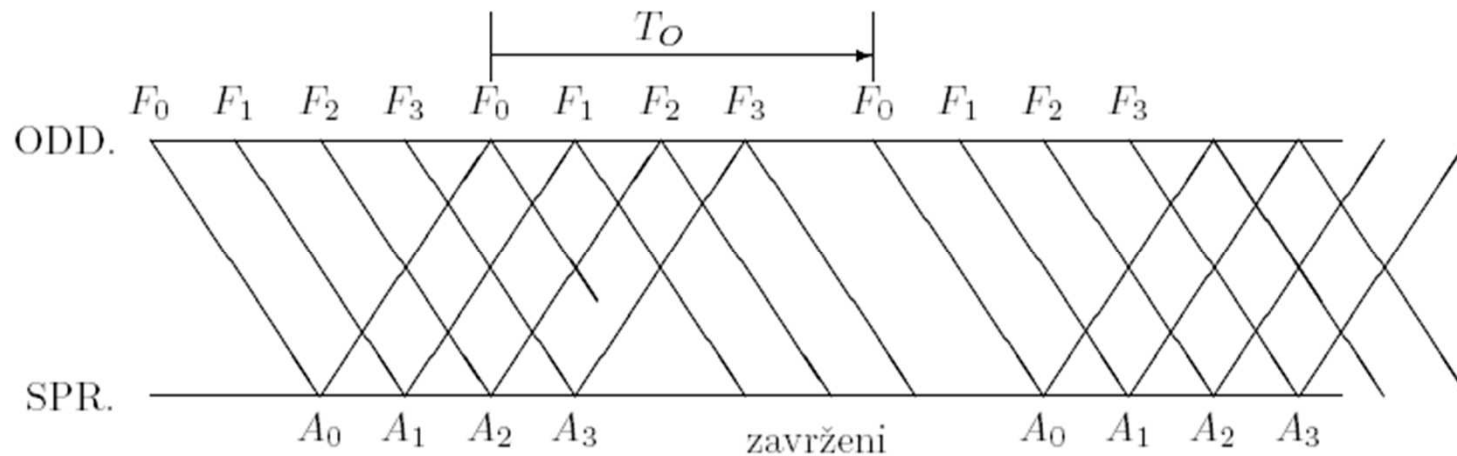


$$E_{GBN}(p = 0) = \min\left\{1, w \frac{T_F}{T_S}\right\},$$

$$E_{ABP}(p = 0) = \frac{T_F}{T_S}.$$

Okvirje številčimo po modulu w , $0, 1, 2, \dots, (w-1)$

GBN 3/4



Za GBN je podobno kot za ABP, le da v primeru, ko ni napak, prenesemo v istem času w okvirjev (w ... velikost okna)

GBN 4 / 4

$$\bar{T} = (1 - p)T_F + p(T_O + \bar{T})$$

$$\bar{T} = T_F + \frac{p}{1 - p}T_O.$$

$$T_O \approx T_S \quad \text{in} \quad wT_F = T_S$$

$$E_{GBN}(p) = \frac{T_F}{T_F + \frac{p}{1-p}wT_F} = \frac{1}{1 + \frac{p}{1-p}w}$$

Ilustrativen primer:

$$p = 0.001$$

$$w = 8 \text{ (tudi razmerje } T_S/T_F)$$

$$E_{GBN} = 1 - 0,001 \times 8 = 0,992$$

$$E_{ABP} = 0,999 \times 1/8 = 0,125$$

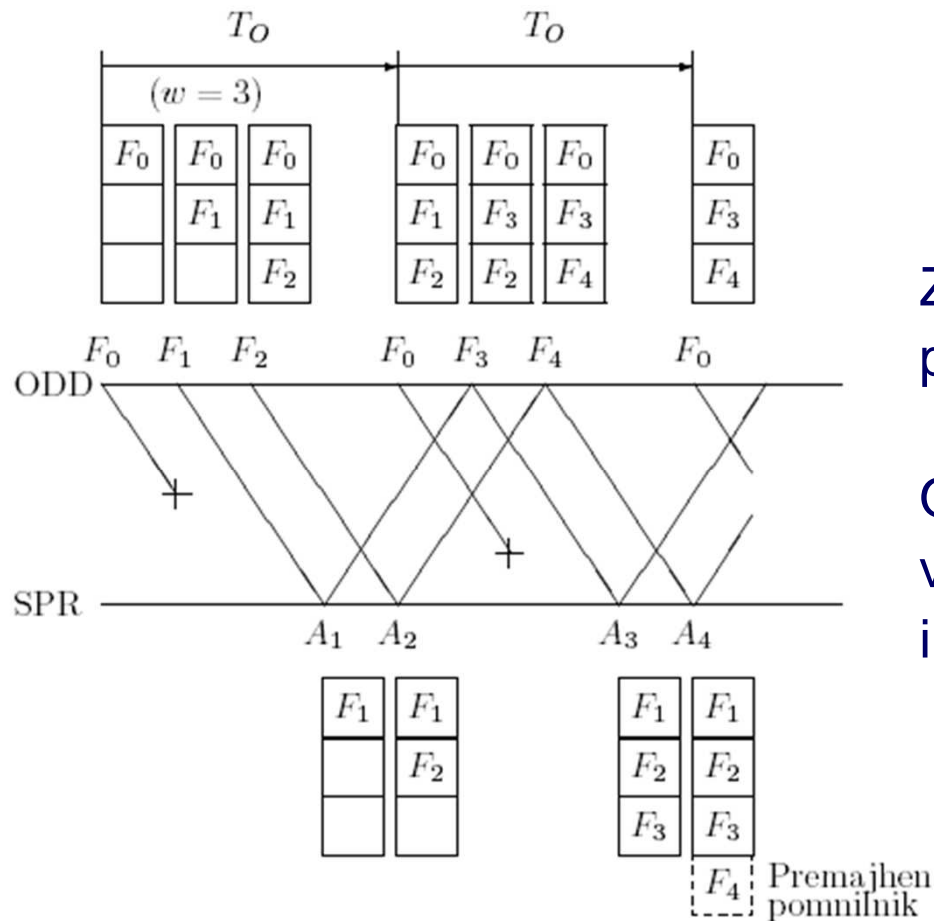
p majhen in $(1 - p)$ približno ena

$$E_{GBN}(p) = \frac{1}{1 + pw}$$

Ker je pw tudi majhen, je

$$E_{GBN}(p) \approx 1 - wp = 1 - p \frac{T_S}{T_F}.$$

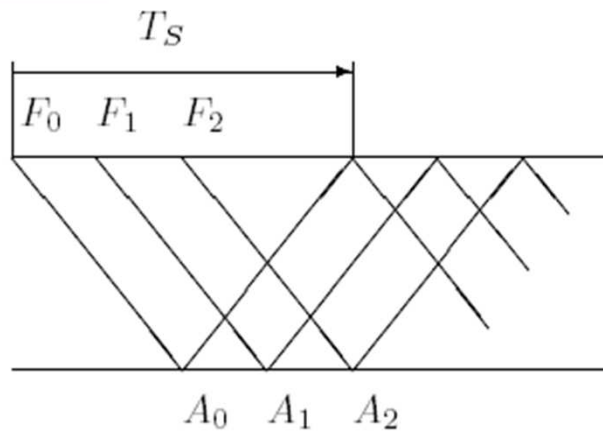
SRP 1/7



Za okno w številčimo po modulu $2w$.

Okno je definirano z razliko v številki že oddanega okvirja in že potrjenjenega okvirja

SRP 2/7, izkoristek



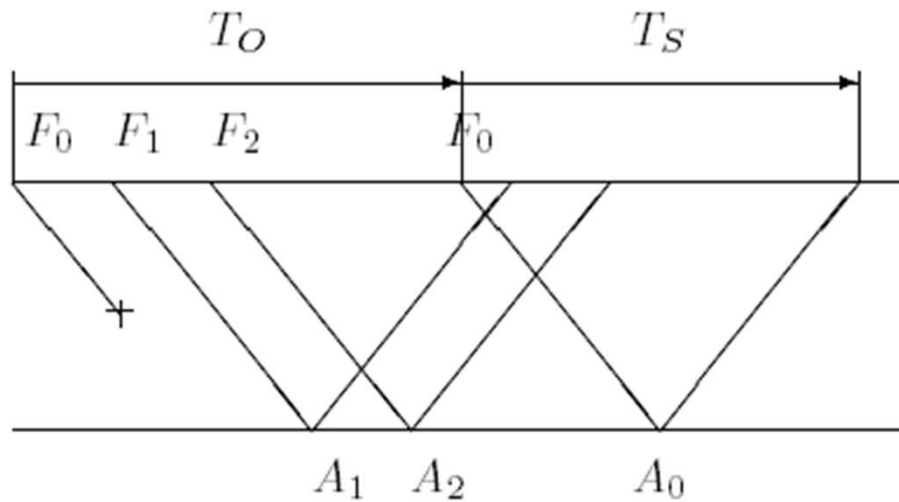
$$E_{SRP}(p = 0) = \min\left\{1, w \cdot \frac{T_F}{T_S}\right\},$$

$$E_{SRP, w=\infty}(p) = \frac{T_F}{\frac{1}{1-p} T_S} = 1 - p.$$

Za $p = 0$, enako kot GBN

Za neskončno okno

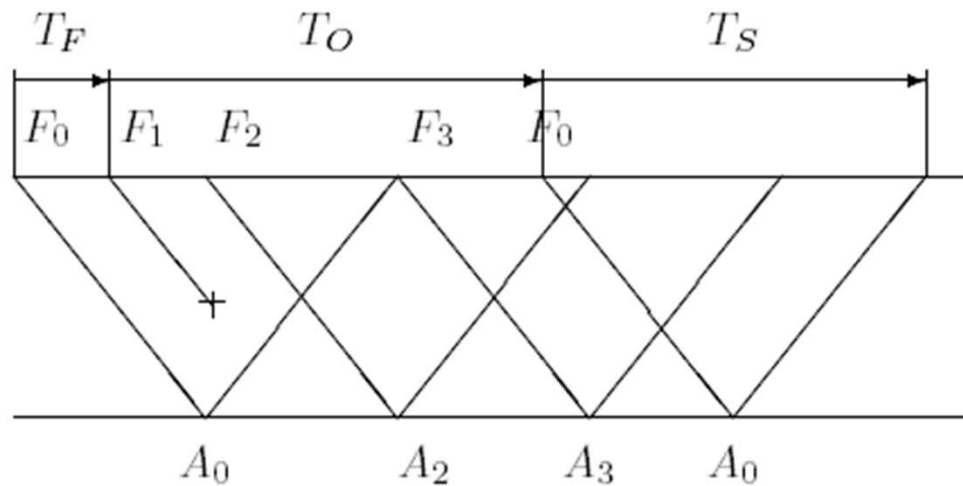
SRP 3/7, napaka na okviru 0



$$T_0 = T_O + T_S$$

$$n_0 = w$$

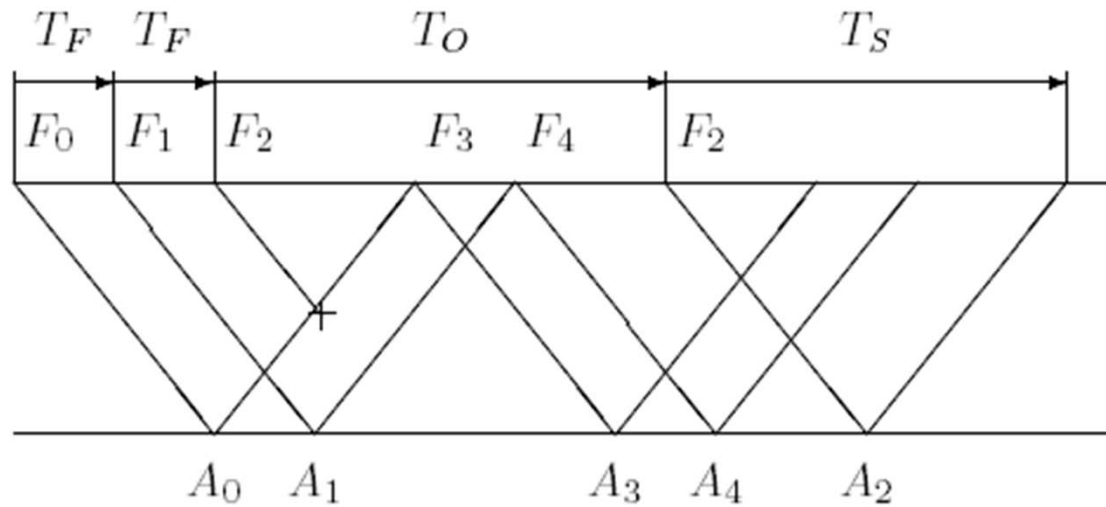
SRP 4/7, napaka na okviru 1



$$T_1 = T_O + T_S + T_F$$

$$n_1 = w + 1$$

SRP 5/7, napaka na okviru 2



$$T_i = T_O + T_S + 2 \times T_F$$

$$n_i = w + 2$$

SRP 6 / 7

$$n_i = w + i, \quad t_i = T_O + T_S + i \cdot T_F \quad (i = 0, 1, 2, \dots, w - 1),$$

Pri pogoju $T_S \approx T_O$ in $T_S = w \cdot T_F$ je

$$t_i = 2 \cdot w \cdot T_F + i \cdot T_F = T_F \cdot (2 \cdot w + i).$$

Verjetnost napake na enem izmed treh okvirjev je

$$p_i = p \cdot (1 - p)^2 \approx p$$

Verjetnost, da ni napake, je $p_n(1 - p)^3 \approx 1 - 3p(1 - wp)$. V tem primeru prenesemo v času $t_w = T_S$ tri okvirje, $n_w = 3$. Možnost večkratnih napak zanemarimo.

$$T = \begin{pmatrix} t_0 & t_1 & t_2 & \dots & t_w \\ p & p & p & \dots & 1 - wp \end{pmatrix}.$$

$$N = \begin{pmatrix} n_0 & n_1 & n_2 & \dots & n_w \\ p & p & p & \dots & 1 - wp \end{pmatrix}.$$

SRP 7/7

$$\begin{aligned}\bar{T} &= \sum_{i=0}^{i=w} p_i \cdot t_i \\ &= T_F \left[\sum_{i=0}^{i=w-1} p \cdot (2 \cdot w + i) + (1 - wp) \cdot w \right] \\ &= T_F \left[p \cdot 2w^2 + p \frac{(w-1) \cdot w}{2} + w - p \cdot w^2 \right] \\ &= w \cdot T_F \left[1 + \frac{p}{2} (3w - 1) \right].\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{N} &= \sum_{i=0}^{i=w} p_i \cdot n_i \\ &= \sum_{i=0}^{i=w-1} p \cdot (w + i) + (1 - wp)w \\ &= p \cdot w^2 + p \frac{w(w-1)}{2} + w - p \cdot w^2 \\ &= w + p \frac{w(w-1)}{2}.\end{aligned}$$

$$E_{SRP}(p) = \frac{T_F \bar{N}}{\bar{T}} = \frac{2 + p(w-1)}{2 + p(3w-1)}.$$