Transport

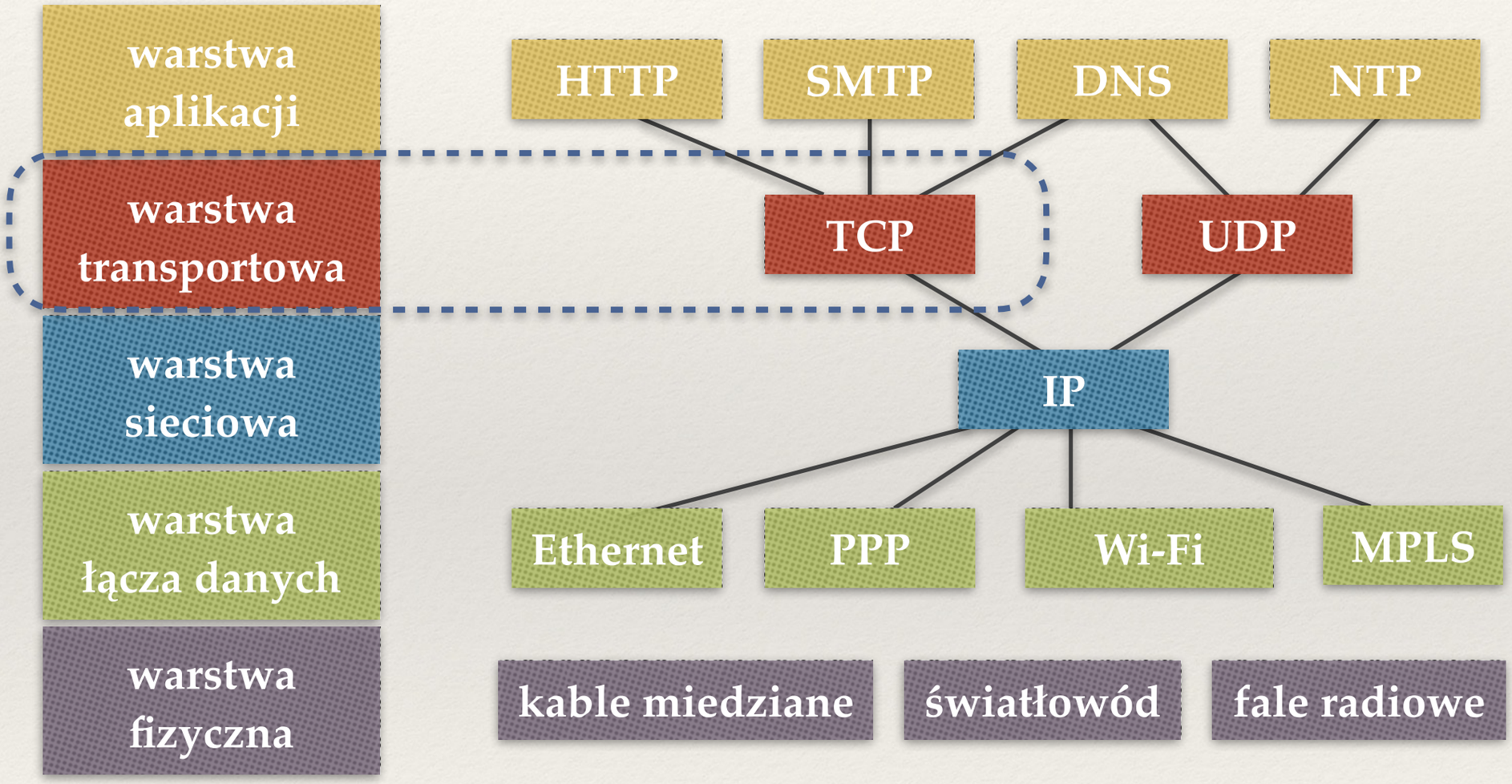
część 1: niezawodny transport

Sieci komputerowe

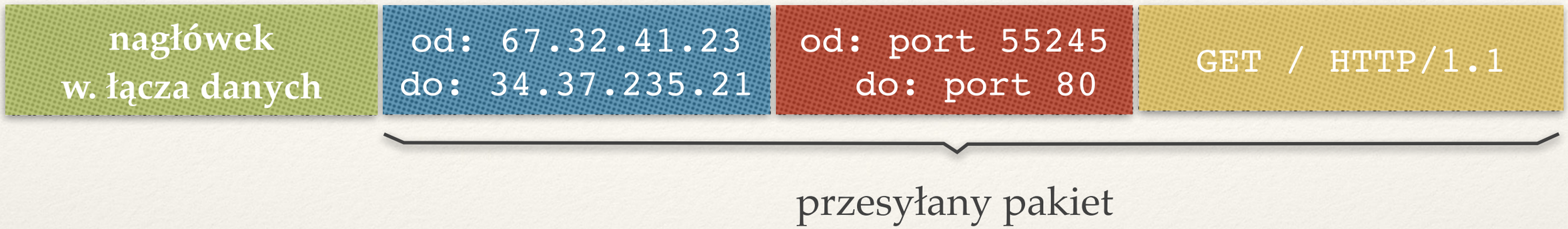
Wykład 6

Marcin Bieńkowski

Protokoły w Internecie



Internetowy model warstwowy



warstwa transportowa — **Globalne** dostarczanie danych pomiędzy **aplikacjami**.

warstwa sieciowa — **Globalne** dostarczanie danych pomiędzy **komputerami**.

warstwa łącza danych — **Lokalne** dostarczanie danych pomiędzy **komputerami**.

Porty

- **Port:**
  - liczba 16-bitowa;
  - identyfikuje aplikację wewnątrz danego komputera
    → multipleksowanie wielu strumieni danych w jednym ciągu pakietów.

- **W nagłówku warstwy transportowej znajduje się m.in.:**
  - port źródłowy;
  - port docelowy.

Zawodny transport

UDP (User Data Protocol)

Najprostszy protokół warstwy transportowej.

0 7 8 15 16 23 24 31	
port źródłowy	port docelowy
długość	suma kontrolna

Gwarancje UDP (1)

- **Takie same jak IP.**
  - Tylko zasada dołożenia wszelkich starań (*best effort*).

- **Pakiety mogą zostać:**
  - uszkodzone,
  - zgubione,
  - opóźnione,
  - zamienione (kolejność),
  - zduplikowane (przez wyższe lub niższe warstwy).

Gwarancje UDP (2)

- Czy te negatywne wydarzenia są częste?
- Czy mogą wydarzyć się również w przypadku lokalnie przesyłanych pakietów?

Gwarancje UDP (2)

- Czy te negatywne wydarzenia są częste?
- Czy mogą wydarzyć się również w przypadku lokalnie przesyłanych pakietów?

`udp_client_flood.c`
kod (z obsługą błędów) na stronie wykładu

demonstracja

Gwarancje UDP (2)

- Czy te negatywne wydarzenia są częste?
- Czy mogą wydarzyć się również w przypadku lokalnie przesyłanych pakietów?

`udp_client_flood.c`
kod (z obsługą błędów) na stronie wykładu

demonstracja

- **Kontrola przepływu:**
  - Nadawca powinien dostosowywać prędkość transmisji do możliwości odbiorcy.
  - Nie wysyłać danych, których odbiorca nie ma gdzie przechować.

Gdzie wykorzystujemy

Zawodny transport:

- Dla małych ilości danych (DNS, DHCP).
- Proste urządzenia (TFTP do aktualizacji firmware).
- Szybka reakcja (gry, interaktywny streaming audio (*voice over IP*), interaktywny streaming video).
- Pełna kontrola nad danymi (NFS).

Niezawodny transport:

- Duże ilości danych (HTTP(S), nieinteraktywny streaming audio/video).

Niezawodny transport: segmentacja

Segmentacja

Niezawodne przesyłanie ciągu bajtów:

- Zadanie warstwy transportowej.
- Wymaga dzielenia ciągu bajtów na **segmenty**.
  - W UDP użytkownik musi to robić sam.

Segmentacja

Niezawodne przesyłanie ciągu bajtów:

- Zadanie warstwy transportowej.
- Wymaga dzielenia ciągu bajtów na **segmenty**.
  - W UDP użytkownik musi to robić sam.

- **Dlaczego nie przesyłamy wszystkiego w jednym segmencie?**

Słowo o nazewnictwie

warstwa transportowa	datagramy (gdy użytkownik sam dzieli na części, np. UDP) segmenty (gdy warstwa dzieli na części, np. TCP)
warstwa sieciowa	pakiety
warstwa łącza danych	ramki

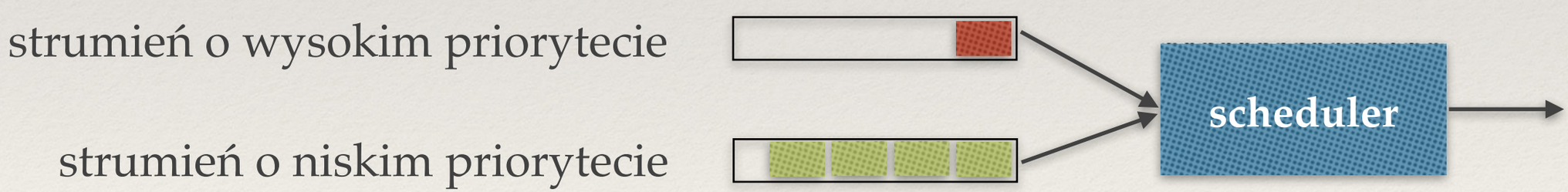
Niekonsekwentnie używane nazwy.

- Powszechnie stosowane „datagramy IP“.
- „Segment TCP“ często oznacza same dane TCP (bez nagłówka TCP), np. w definicji MSS (*maximum segment size*).

Dlaczego segmentacja jest potrzebna?

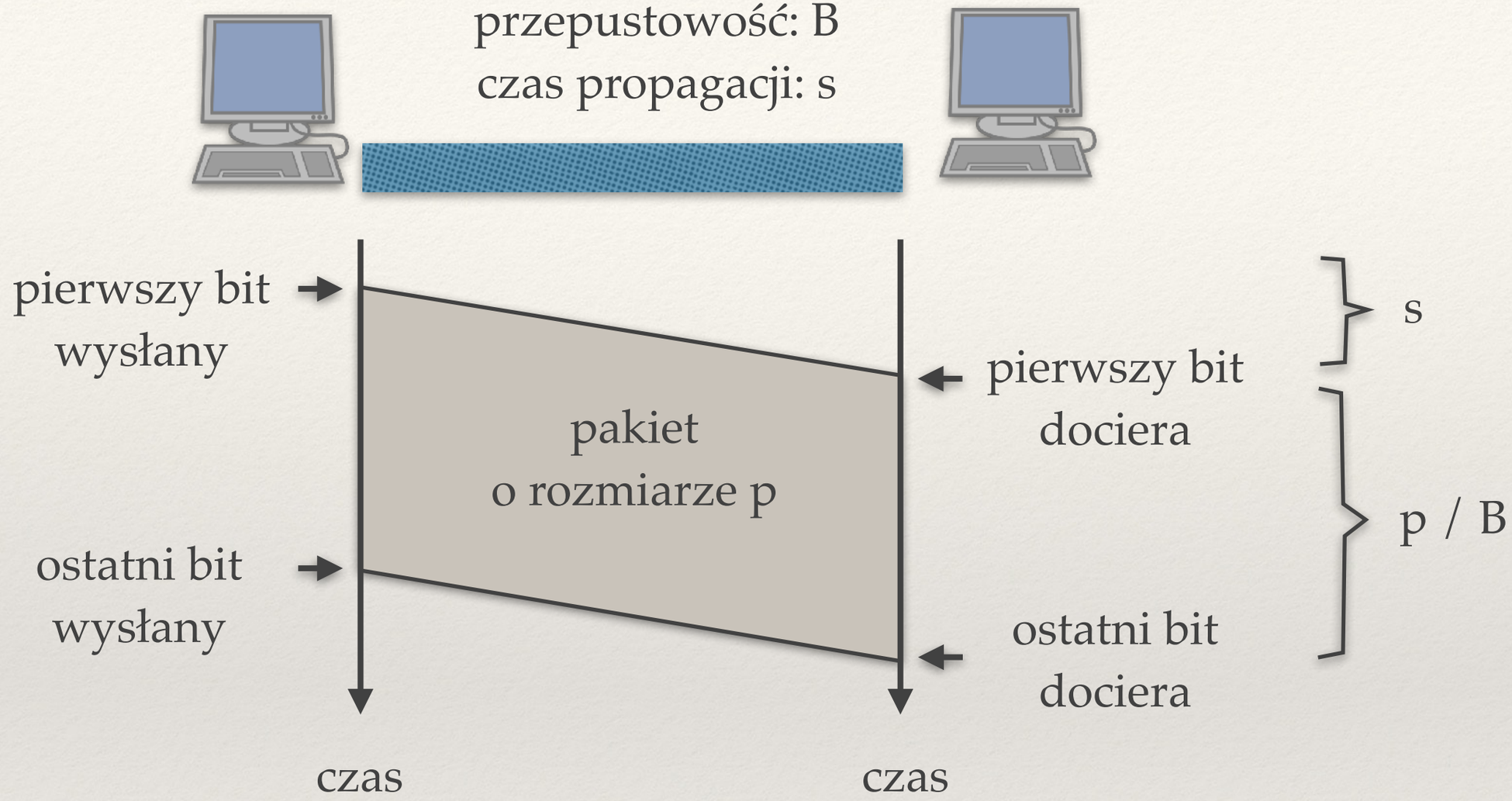
- **Maksymalny rozmiar segmentu (MSS).**
  - MSS = MTU - rozmiar nagłówka IP - rozmiar nagłówka TCP.

- **Dlaczego nie zwiększymy MTU (i MSS)?**
  - Większa szansa na zakłócenia (sieci bezprzewodowe).
  - Duże pakiety: problem w szeregowaniu w kolejce wyjściowej routera (małe pakiety mają duże opóźnienie).



  - Główna przyczyna: **mniejsze opóźnienie przy długich ścieżkach.**

Opóźnienie pakietu na łączu (przypomnienie)



Opóźnienie na pojedynczym łączu = s + p / B.

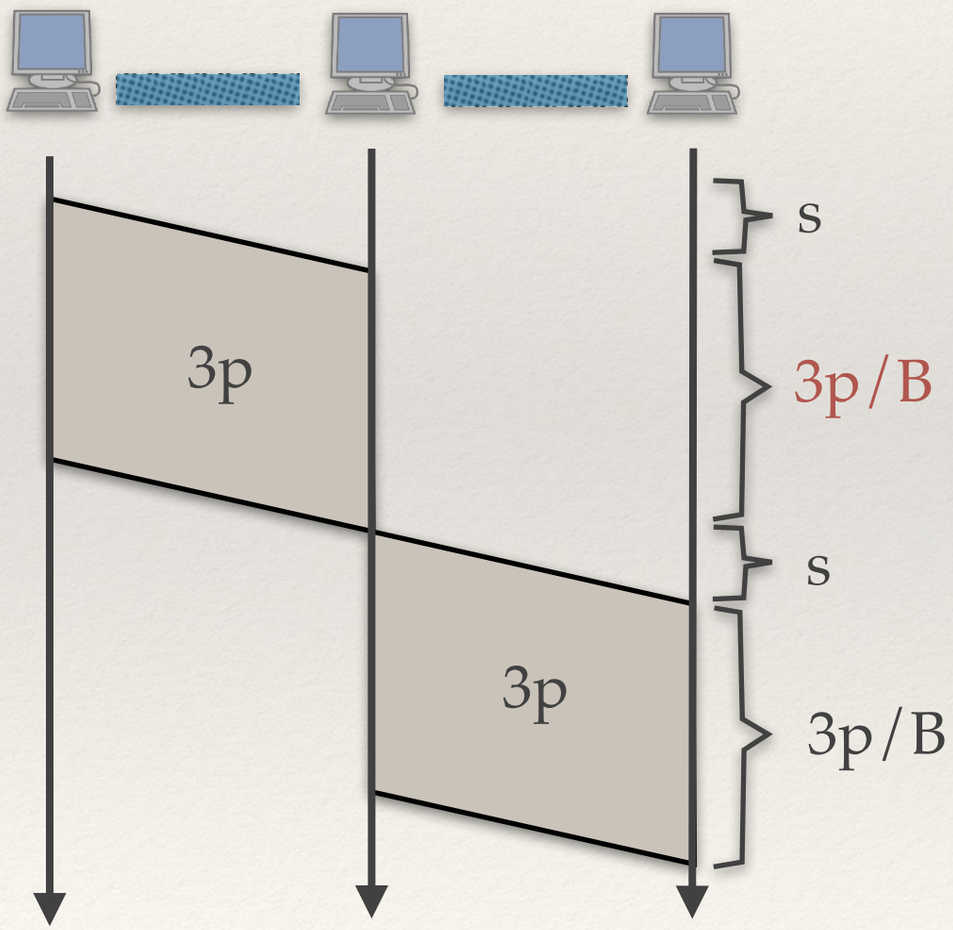
- Ignorujemy czas kolejkowania pakietu w buforze.

Opóźnienie pakietu na ścieżce

Dla dowolnego łącza: przepustowość = B, czas propagacji = s.

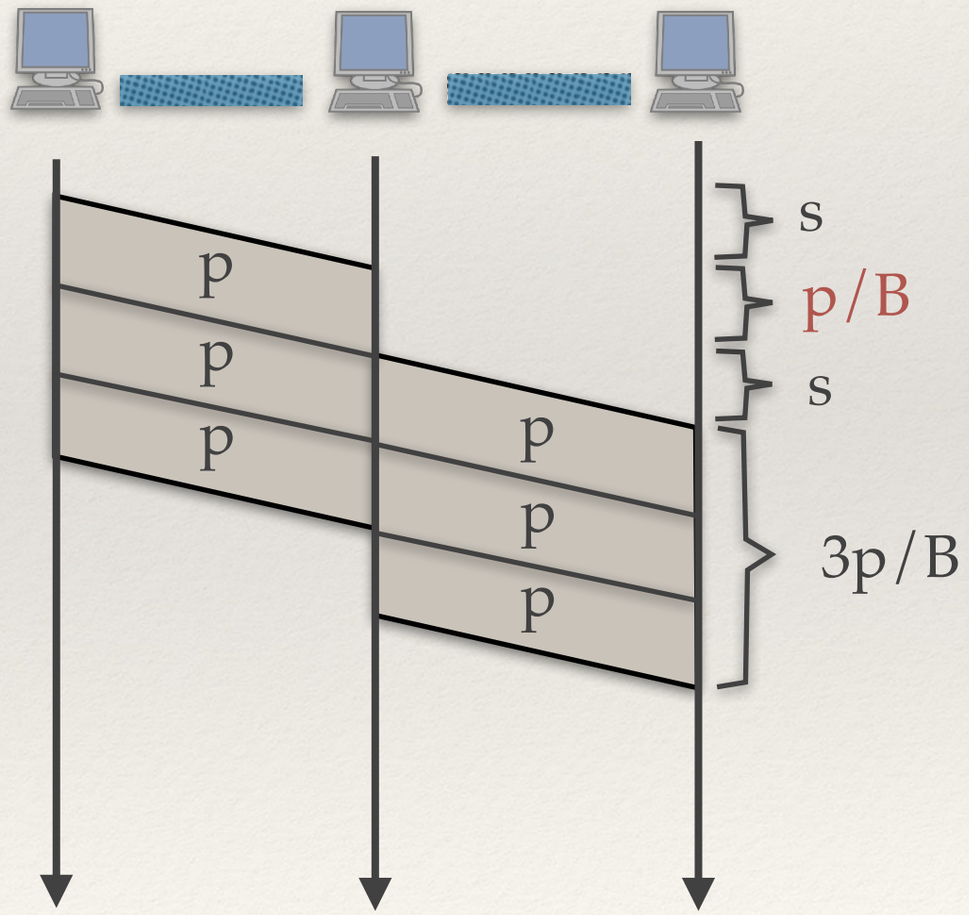
pakiet o rozmiarze 3p

opóźnienie = 2 s + 6 (p/B)



3 pakiety o rozmiarze p

opóźnienie = 2 s + 4 (p/B)



Niezawodny transport: ARQ

ARQ = Automatic Repeat reQuest

- **Zajmiemy się niezawodną transmisją jednokierunkową.**
  - Od nadawcy do odbiorcy.
  - W drugą stronę identyczny mechanizm.

- **ARQ**
  - Wysyłanie „do skutku“ (do otrzymania potwierdzenia).
  - Niezawodny transport na bazie zawodnej usługi przesyłania pakietów.
  - Odbiorca może wysyłać informacje zwrotne (otrzymałem pakiet / zwolnij / przyspiesz / …)

- **Założymy, że strumień bajtów jest już posegmentowany.**

Dostępne mechanizmy

- **Sumy kontrolne:** możemy wykrywać, czy segment został uszkodzony.

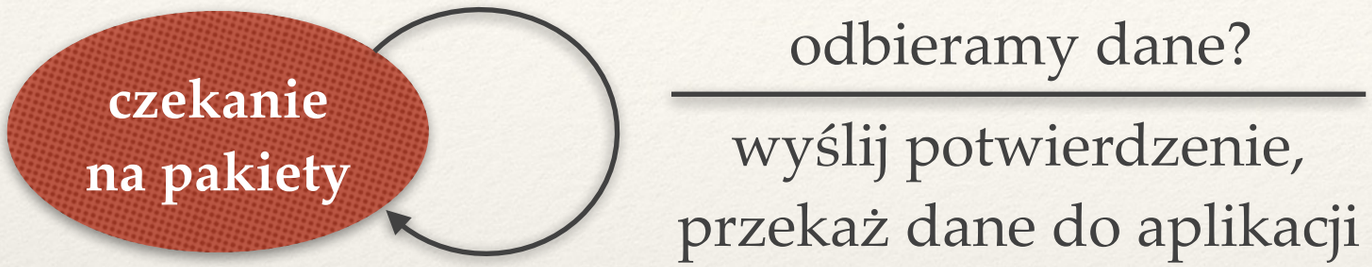
- **Potwierdzenia (ACK):** małe pakiety kontrolne potwierdzające otrzymanie danego segmentu.

- **Timeout (przekroczenie czasu oczekiwania):**
  - jeśli nie otrzymamy potwierdzenia segmentu przez RTO (*retransmission timeout*);
  - RTO to dynamicznie ustalana wartość (funkcja bieżącego RTT).

ARQ: Stop-and-Wait

Protokół Stop-and-Wait

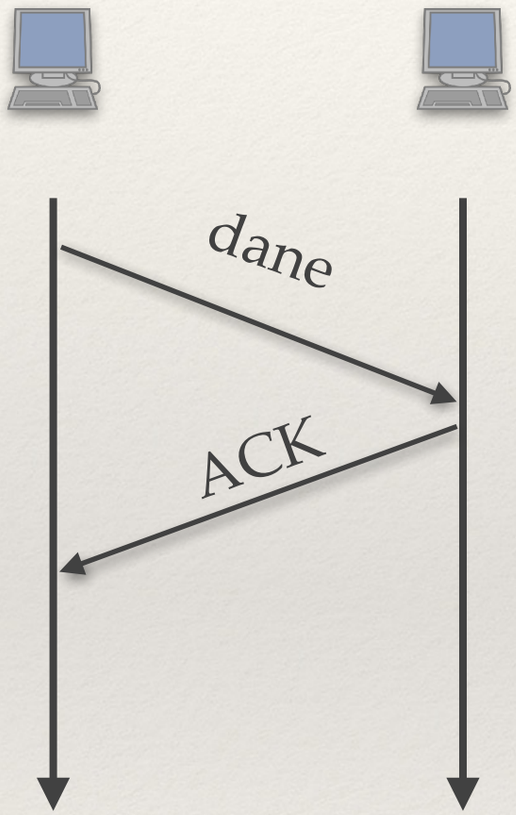
Algorytm odbiorcy:



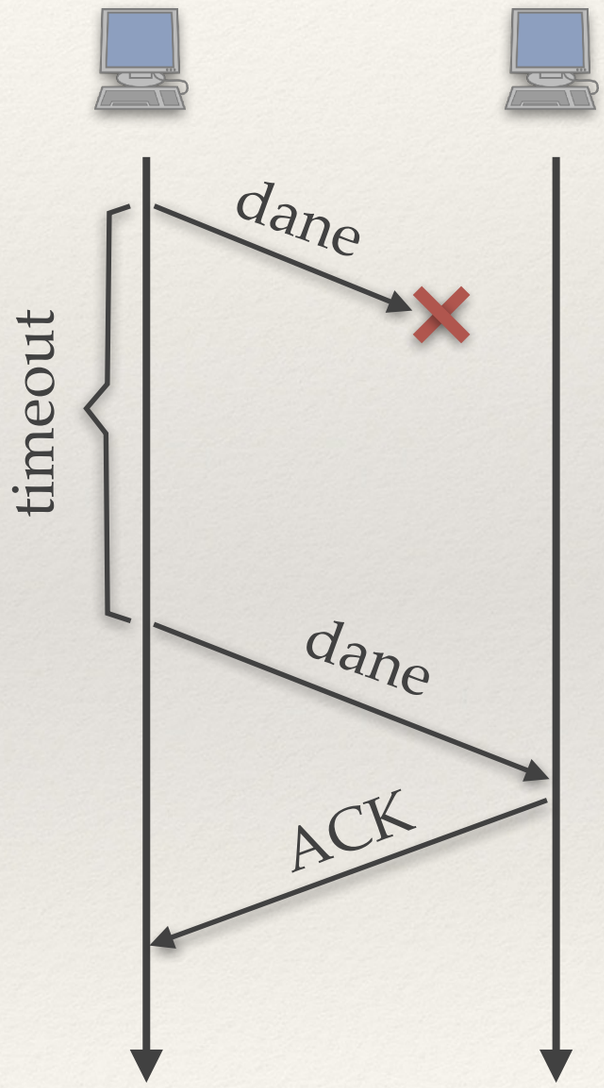
Algorytm nadawcy:

Stop-and-wait: typowe wykonania

1. bez utraty pakietów

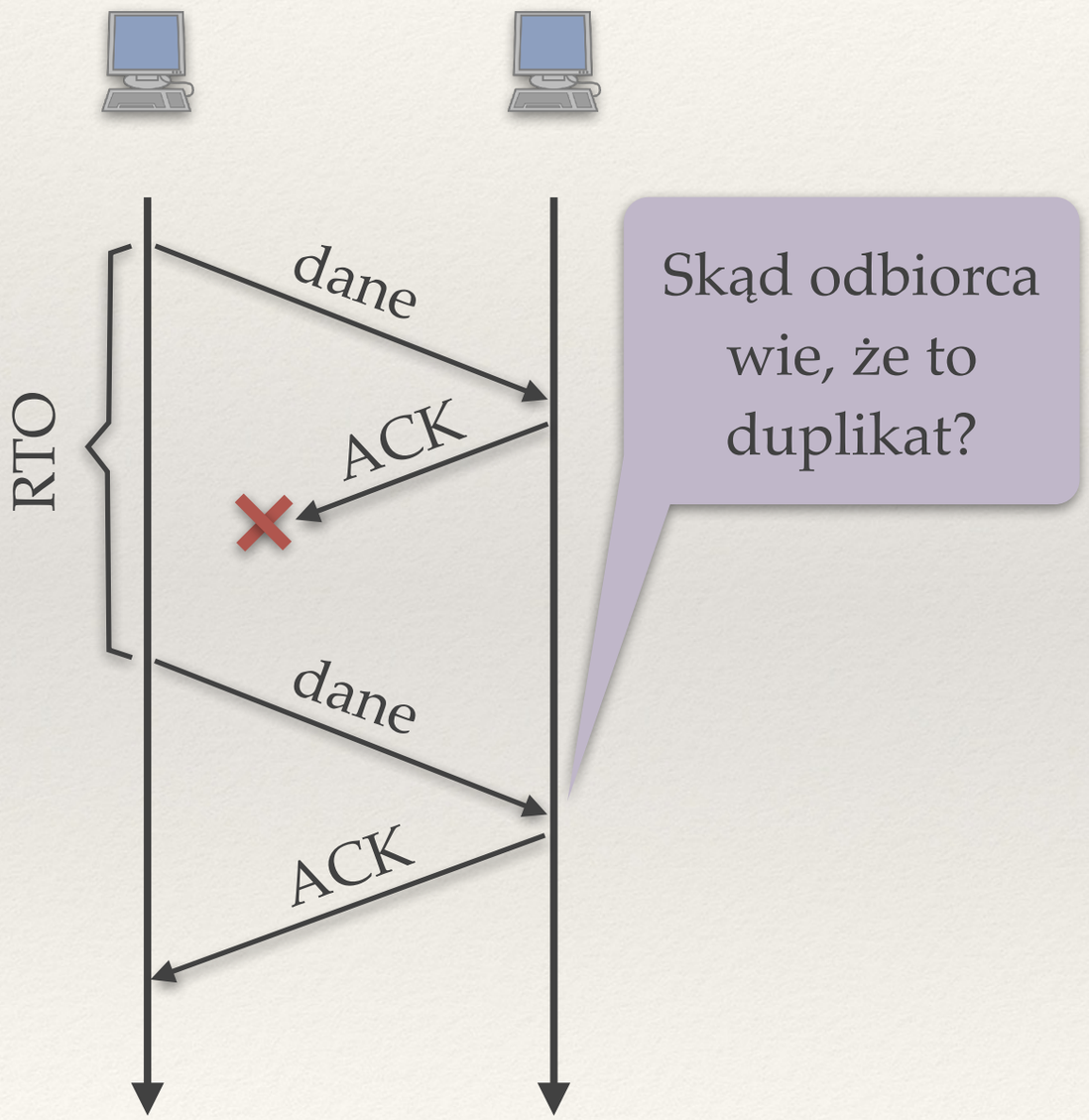


2. utrata danych



Stop-and-wait: problemy

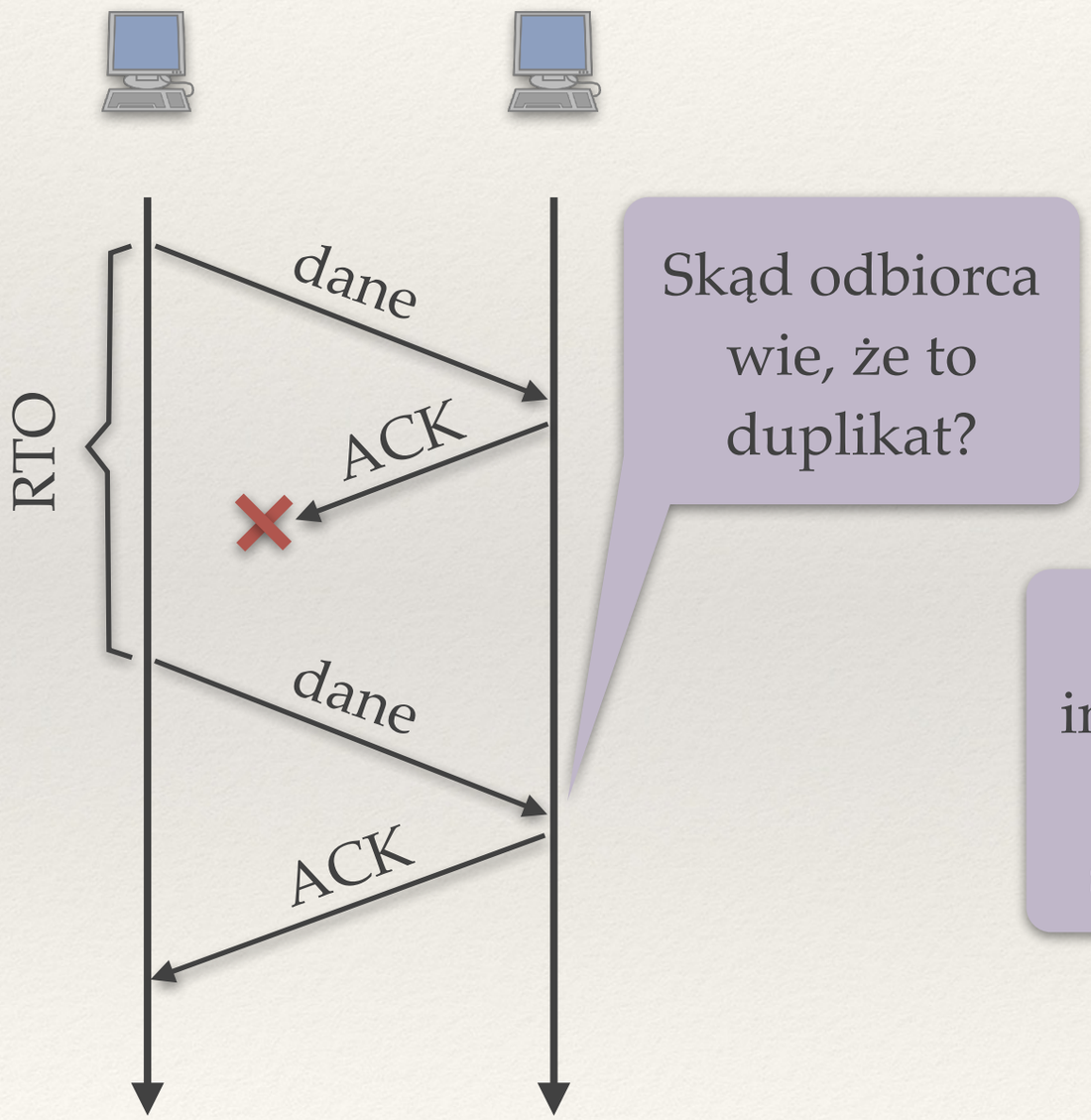
3. utrata ACK



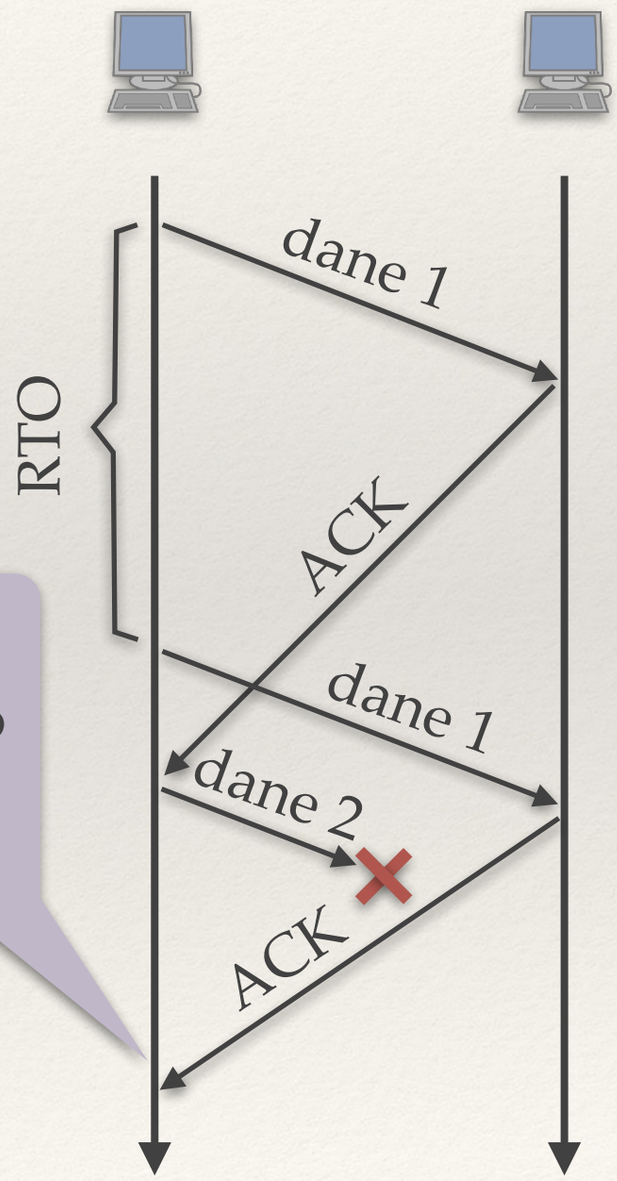
Skąd odbiorca wie, że to duplikat?

Stop-and-wait: problemy

3. utrata ACK

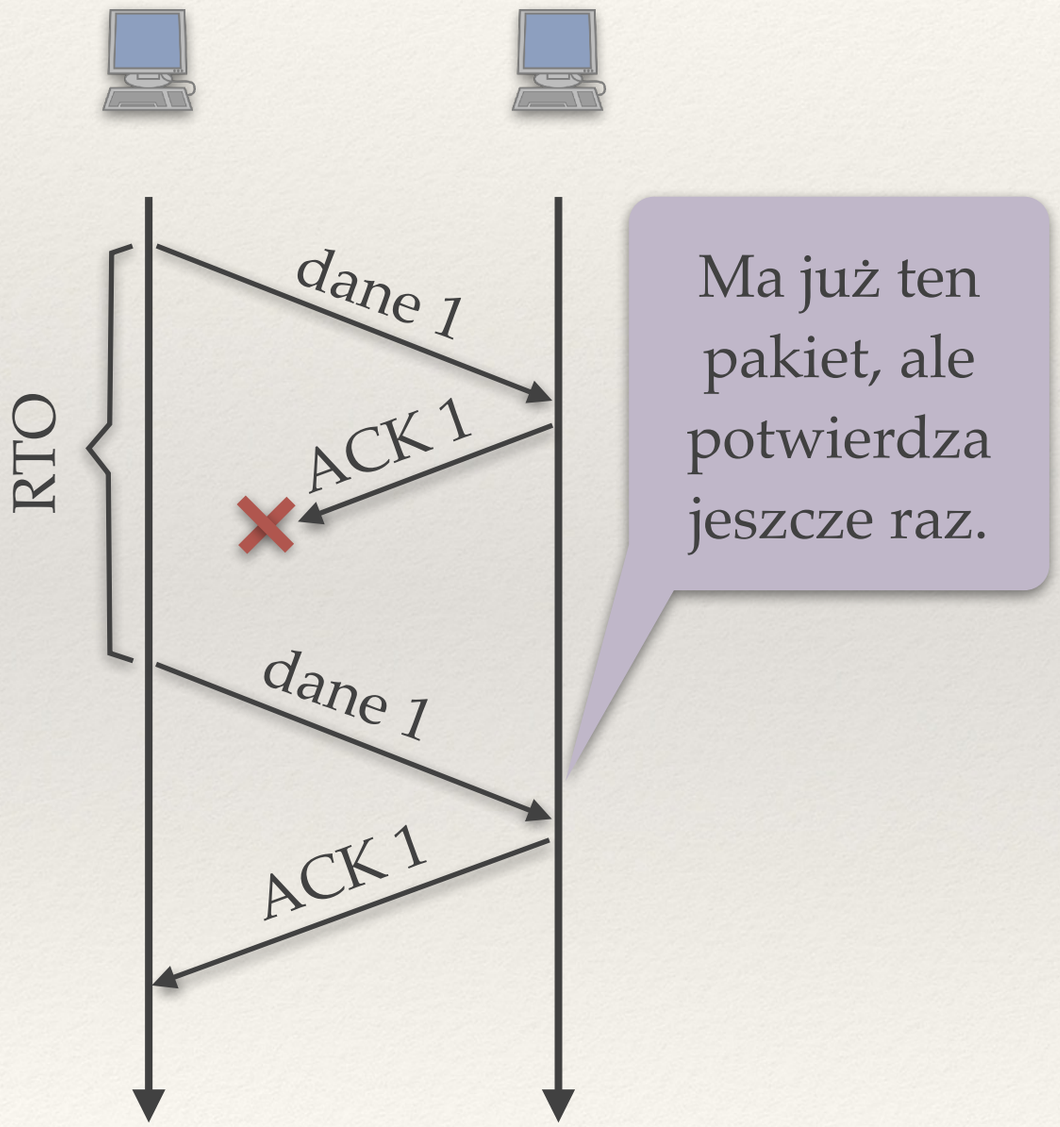


4. opóźnienie ACK + utrata danych



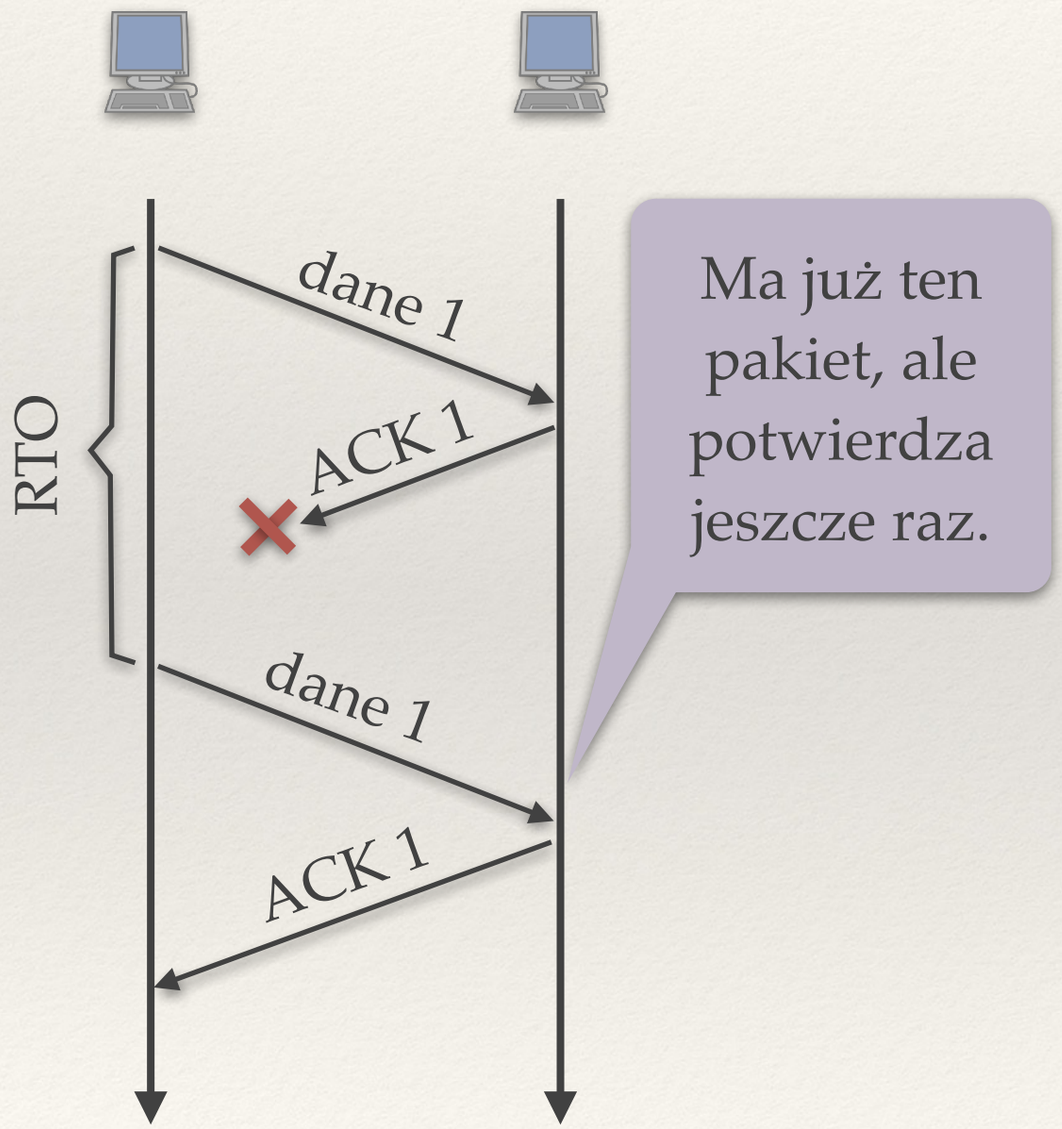
Dodajemy numery sekwencyjne

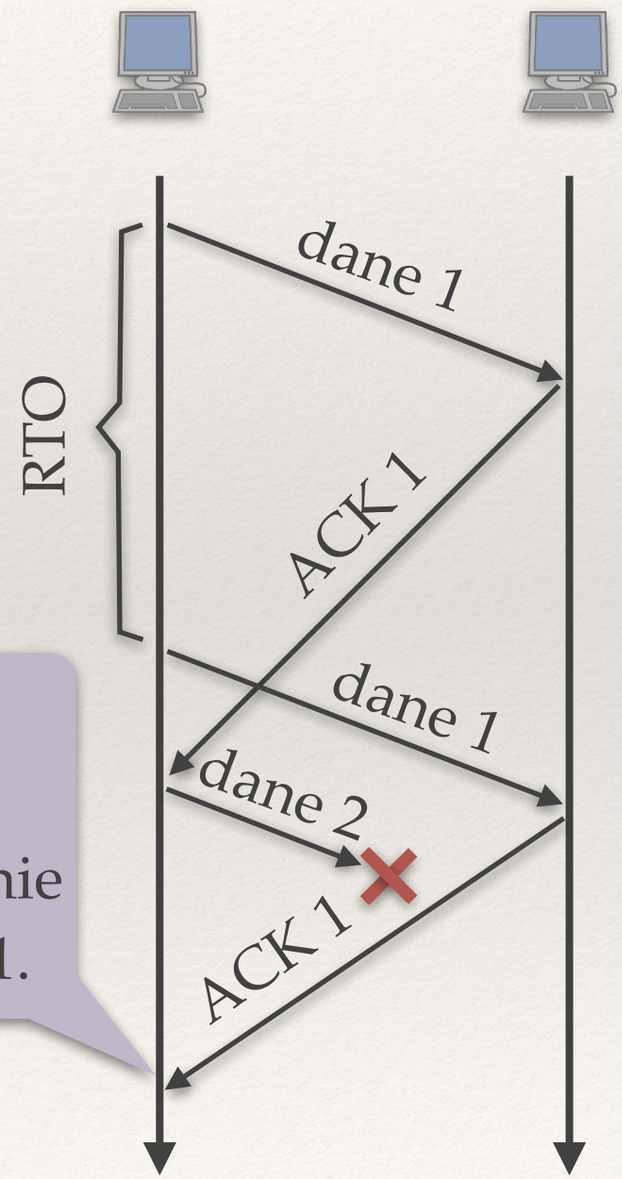
- Każdy segment jest numerowany.
- ACK zawiera numer potwierdzanego segmentu.



Dodajemy numery sekwencyjne

- Każdy segment jest numerowany.
- ACK zawiera numer potwierdzanego segmentu.

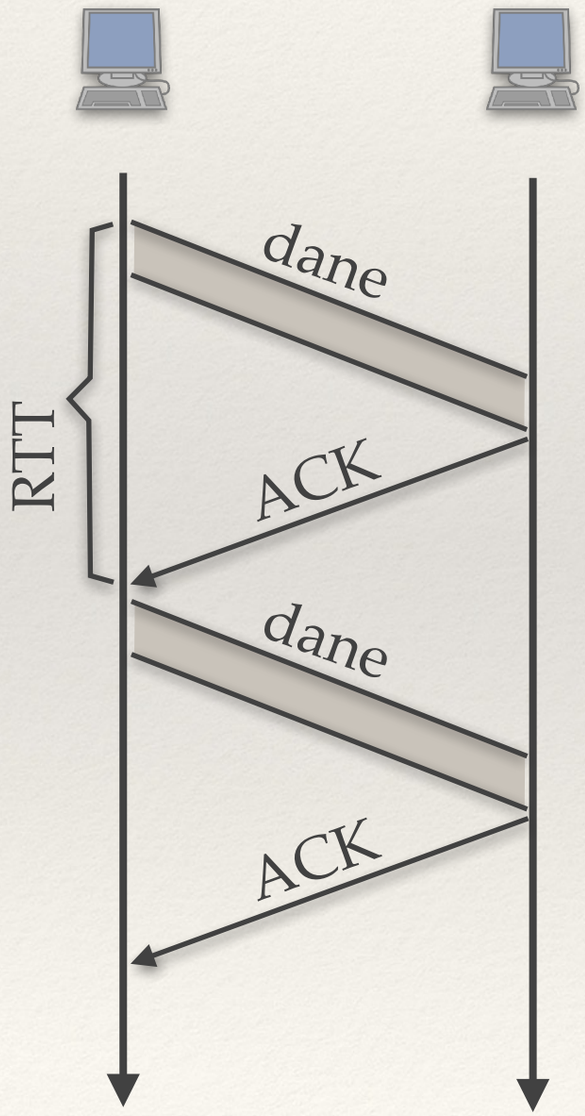




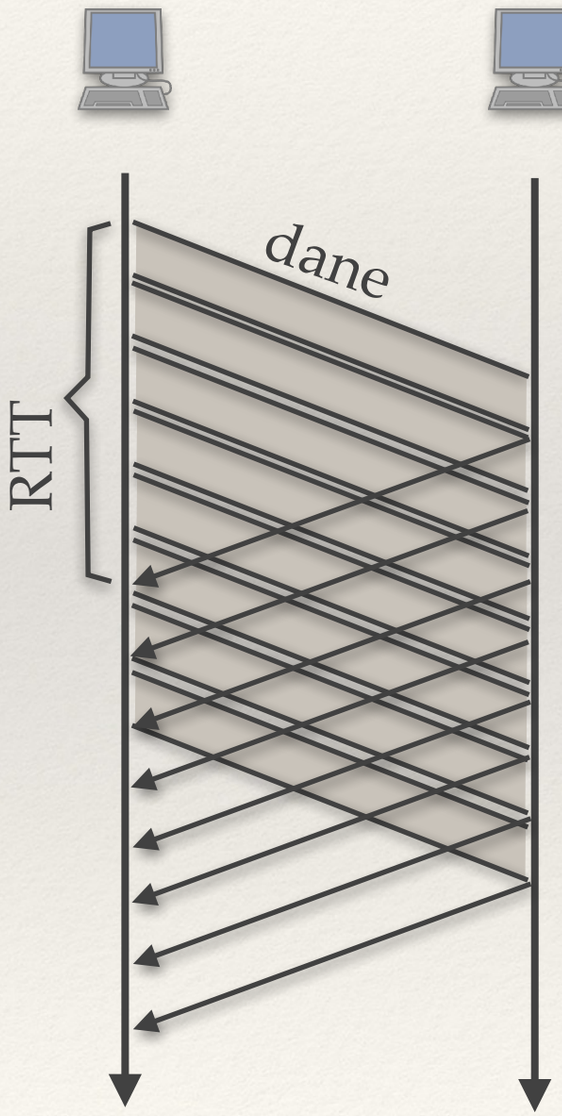
Stop-and-wait + numery sekwencyjne

Działa, ale przy długich łączach o dużej przepustowości wykorzystuje ułamek ich możliwości.

stop-and-wait



chcemy tak:



Nadawca powinien móc nadawać bez czekania na ACK co najmniej przez RTT.

ARQ: Okno przesuwne

Okno przesuwne nadawcy

- **Klasa algorytmów wykorzystująca przesuwne okno nadawcy.**
  - Cechy wspólne.
  - Algorytm Go-Back-N.
  - Algorytm wybiórczego powtarzania (SR, *selective repeat*).

- **Implementacja w TCP.**

Cechy wspólne: co robi nadawca

- SWS (*sender window size*) = rozmiar okna nadawcy.
- Niezmiennik: segmenty od 1 do LAR są potwierdzone, a LAR+1 nie.
- Otrzymanie ACK dla segmentu może przesunąć okno w prawo.

Cechy wspólne: co robi nadawca

- SWS (*sender window size*) = rozmiar okna nadawcy.
- Niezmiennik: segmenty od 1 do LAR są potwierdzone, a LAR+1 nie.
- Otrzymanie ACK dla segmentu może przesunąć okno w prawo.

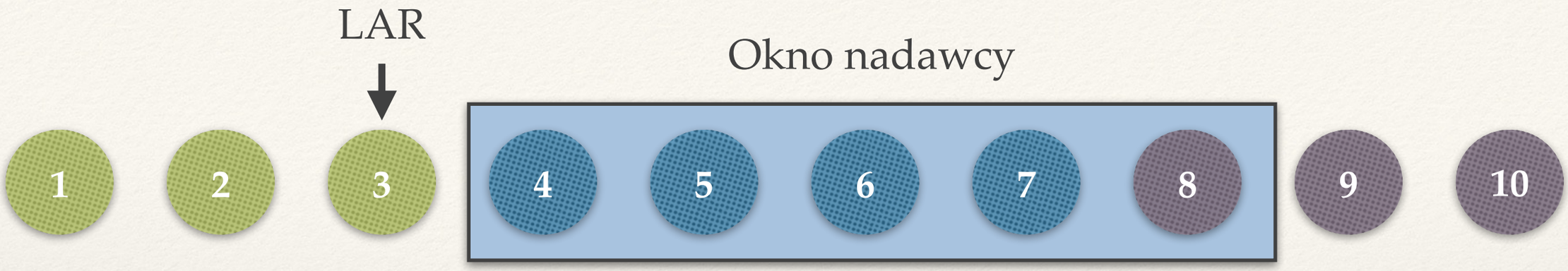
- Nadawca wysyła niewysłane segmenty z okna, jeśli są.
- W zależności od algorytmu czasem też ponawia niepotwierdzone.
- Dla każdego segmentu X nadawca pamięta $sent(X)$ = ostatni czas jego wysłania.

Okno przesuwne nadawcy

- **Klasa algorytmów wykorzystująca przesuwne okno nadawcy.**
  - Cechy wspólne. ✅
  - Algorytm Go-Back-N.
  - Algorytm wybiórczego powtarzania (*selective repeat*).

- **Implementacja w TCP.**

Go-Back-N: co robi odbiorca



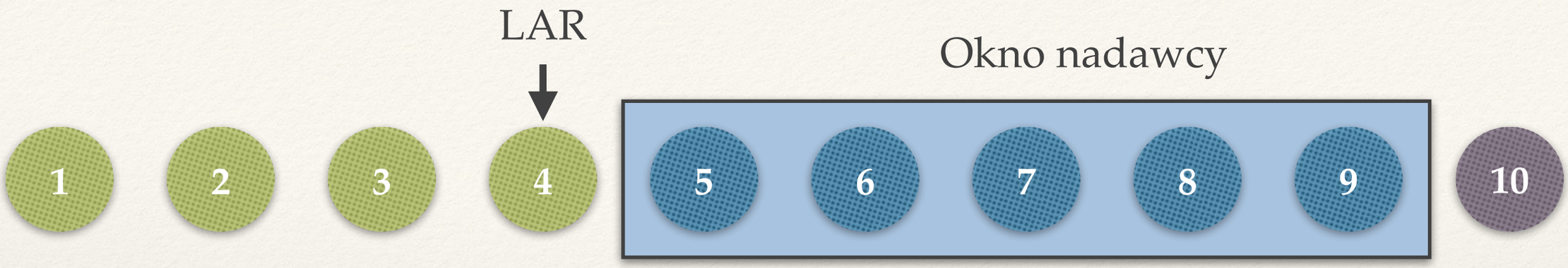
Algorytm dla odbiorcy:

- Odbiorca ma segmenty do P włącznie.
- Obiorca akceptuje otrzymany segment S, tylko jeśli $S = P + 1$.
- Odbiorca odsyła ACK, jeśli $S \leq P + 1$.

Co nadawca wnioskuje z otrzymania ACK dla segmentu S:

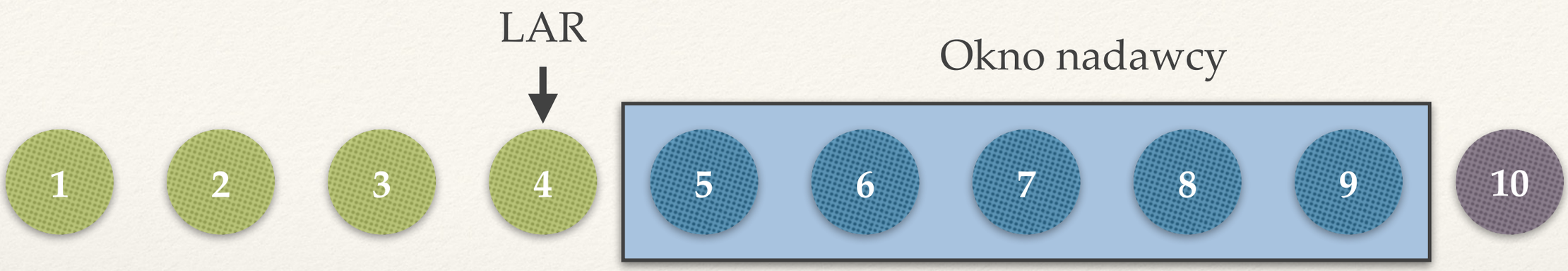
- Odbiorca ma wszystko do S włącznie → można zaktualizować LAR := S

Go-Back-N: co robi nadawca



- Niezmiennik w Go-Back-N: okno nadawcy zawiera wyłącznie niepotwierdzone segmenty.
- W czasie *sent(*LAR*+1)* + RTO wysyłamy ponownie wszystkie segmenty z okna.

Go-Back-N: co robi nadawca



- Niezmiennik w Go-Back-N: okno nadawcy zawiera wyłącznie niepotwierdzone segmenty.
- W czasie *sent(*LAR+*1)* + RTO wysyłamy ponownie wszystkie segmenty z okna.
- Prosta implementacja nadawcy, trywialna odbiorcy.
- Jeśli SWS = 1, to Go-Back-N = Stop-and-Wait.

Okno przesuwne nadawcy

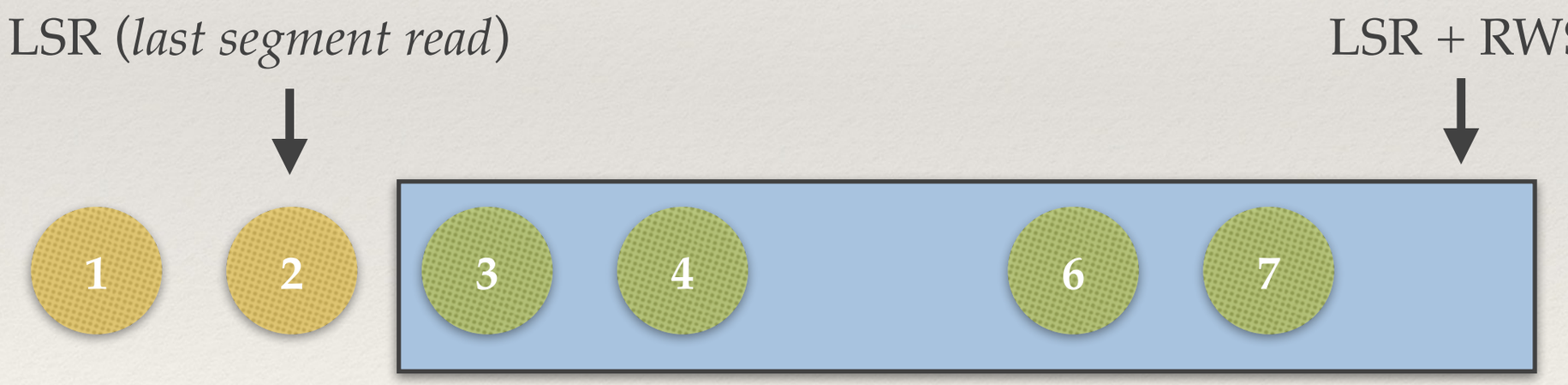
- **Klasa algorytmów wykorzystująca przesuwne okno nadawcy.**
  - Cechy wspólne. ✅
  - Algorytm Go-Back-N. ✅
  - Algorytm wybiórczego powtarzania (*selective repeat*).
- **Implementacja w TCP.**

SR: odbiorca też ma okno

- RWS (*receiver window size)* = rozmiar okna odbiorcy.
- Okno to bufor na:
  - segmenty (jeszcze) nieprzeczytane,
  - segmenty, które przyszły „poza kolejnością”.

SR: odbiorca też ma okno

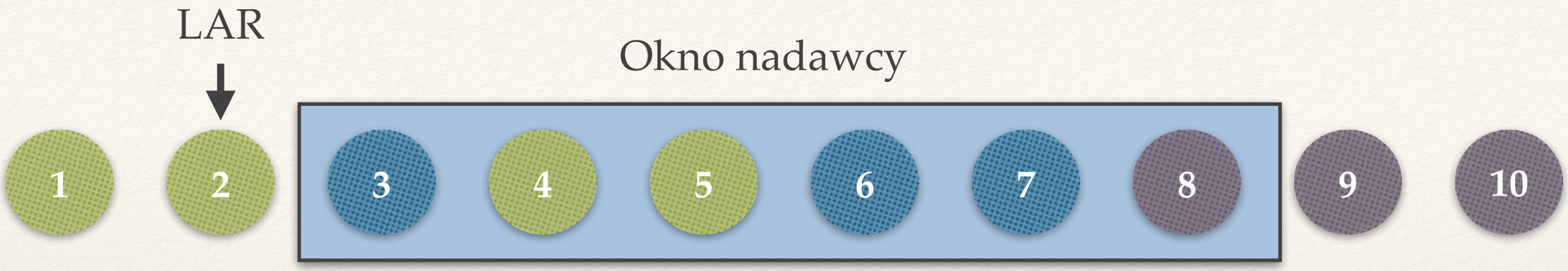
- RWS (*receiver window size)* = rozmiar okna odbiorcy.
- Okno to bufor na:
  - segmenty (jeszcze) nieprzeczytane,
  - segmenty, które przyszły „poza kolejnością”.
- Odbiorca potwierdza segment S jeśli S ≤ LSR + RWS.



odebrane, potwierdzone, przeczytane przez aplikację za pomocą `read()`

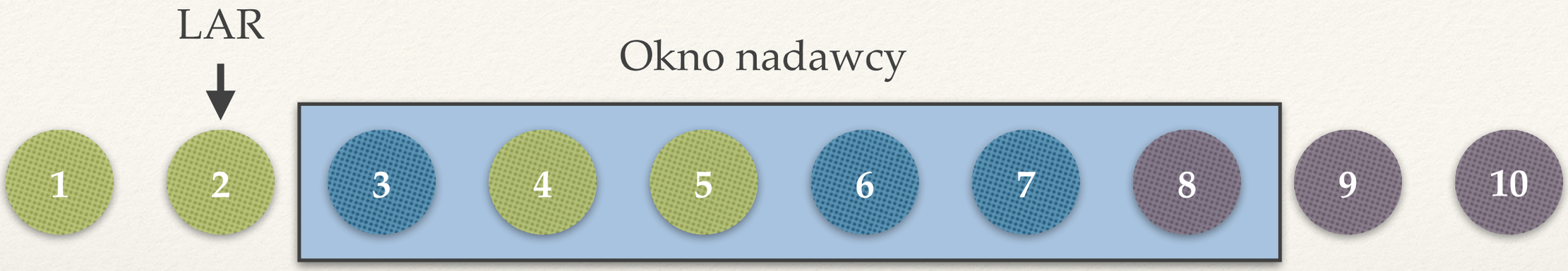
odebrane (i potwierdzone), ale nieprzeczytane przez aplikację

SR: co robi nadawca



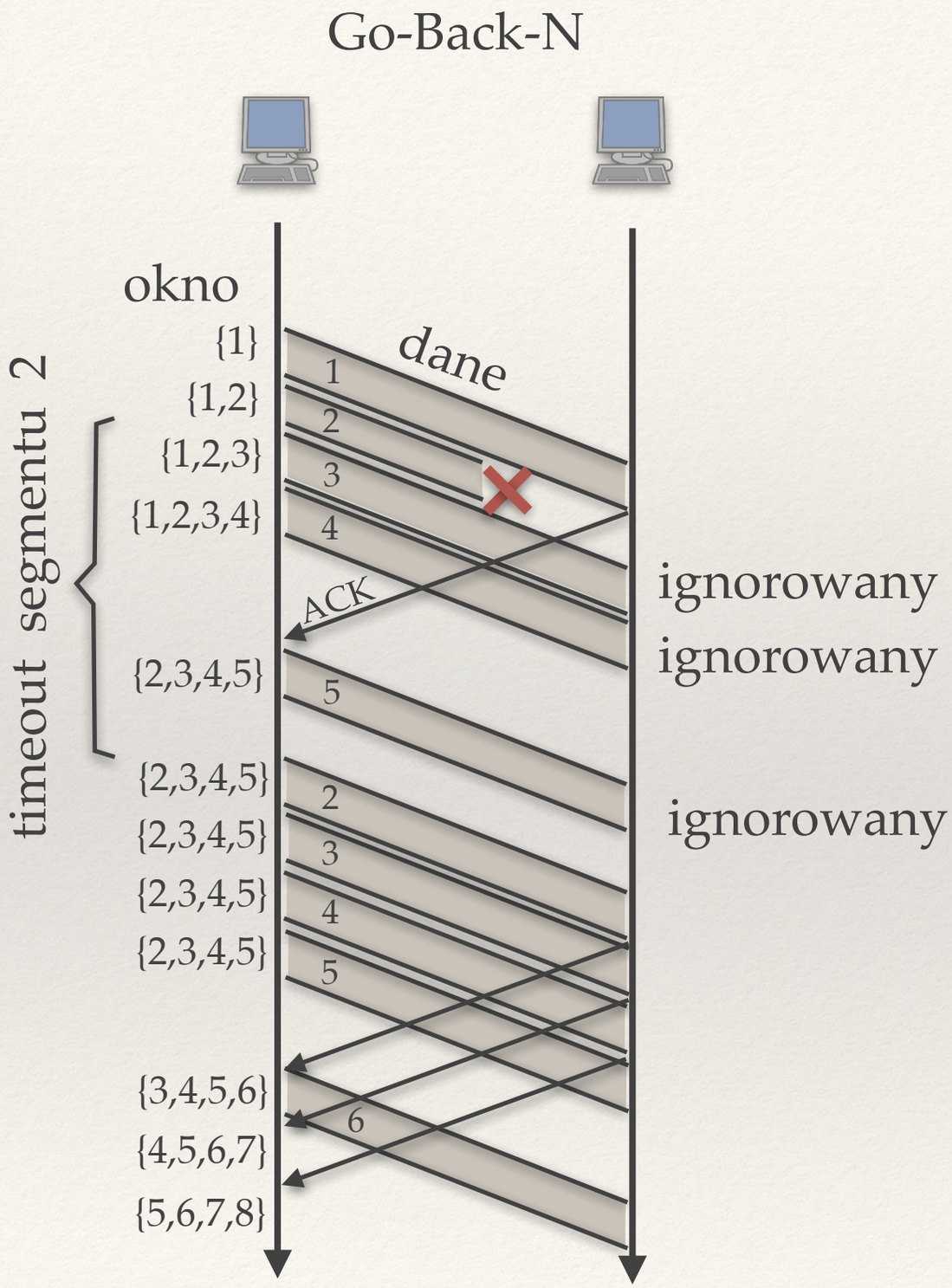
- Otrzymanie ACK Y → sprawdzamy, czy możemy przesunąć okno.
  - Cecha wspólna, ale ACK Y nie oznacza, że odbiorca ma wszystko do Y włącznie jak w Go-Back-N.
- Dla każdego segmentu X z okna:
  - wyślij X ponownie w czasie *sent(X)* + RTO.

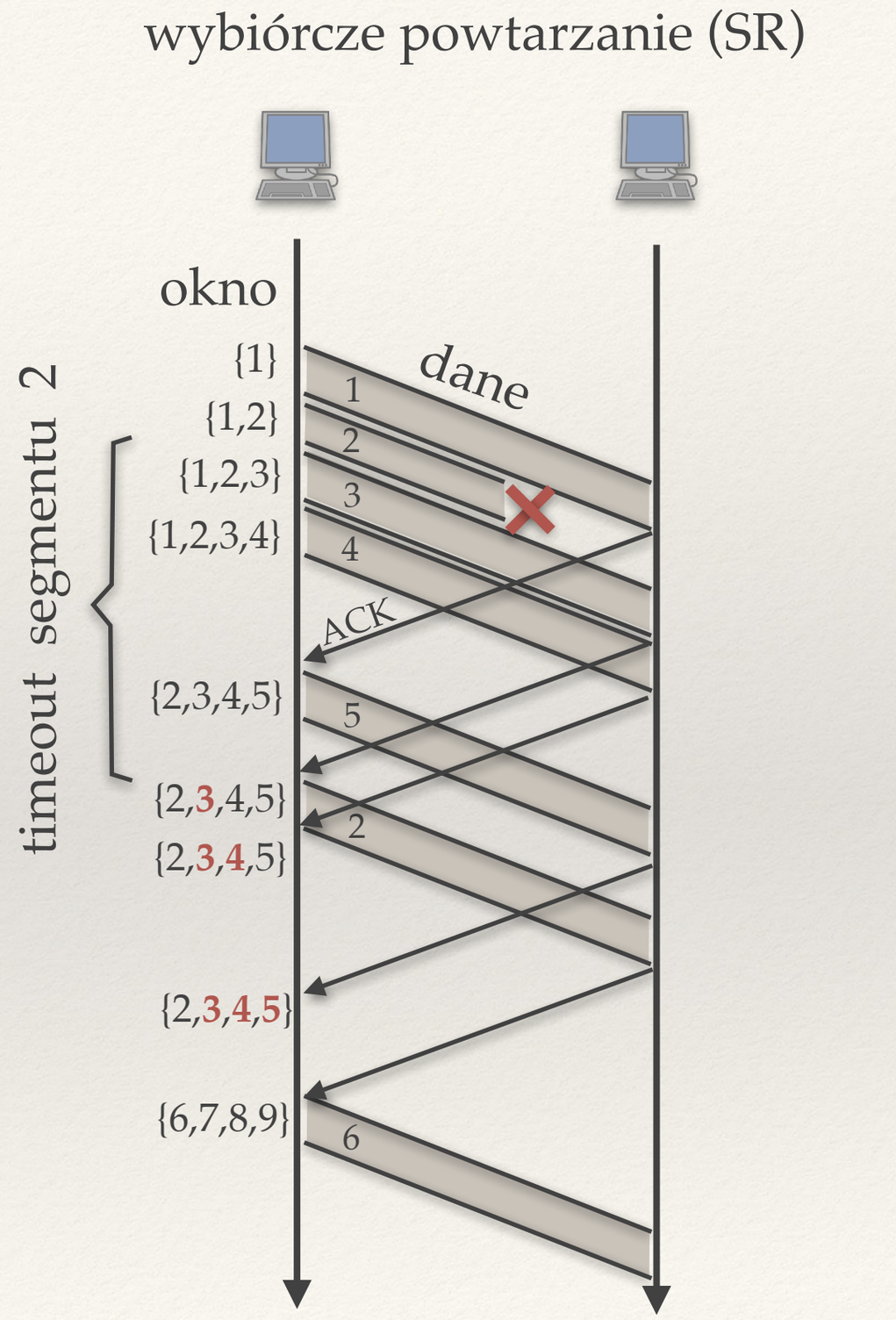
SR: co robi nadawca



- Otrzymanie ACK Y → sprawdzamy, czy możemy przesunąć okno.
  - Cecha wspólna, ale ACK Y nie oznacza, że odbiorca ma wszystko do Y włącznie jak w Go-Back-N.
- Dla każdego segmentu X z okna:
  - wyślij X ponownie w czasie *sent(X)* + RTO.
- Jeśli RWS = 1, to Selective-Repeat = Go-Back-N.

Go-Back-N vs. SR, SWS = 4, utrata segmentu





Okno przesuwne nadawcy

- **Klasa algorytmów wykorzystująca przesuwne okno nadawcy.**
  - Cechy wspólne. ✅
  - Algorytm Go-Back-N. ✅
  - Algorytm wybiórczego powtarzania (*selective repeat*). ✅

- **Implementacja w TCP.**

ARQ: TCP

Liczymy w bajtach

- TCP dzieli strumień bajtów na segmenty.
- Podział jest dynamiczny i może być modyfikowany później:
  - Aplikacja może dostarczać małe dane do wysyłki.
  - MTU na ścieżce może się zmienić.
  - Rozmiar okna może się zmieniać (przyszłe wykłady).

Upraszczamy

- **Pełna implementacja SR jest skomplikowana:**
  - Konieczność pamiętania czasu wysyłania poszczególnych zakresów bajtów.
  - Konieczność retransmisji w określonych momentach.

Upraszczamy

- **Pełna implementacja SR jest skomplikowana:**
  - Konieczność pamiętania czasu wysyłania poszczególnych zakresów bajtów.
  - Konieczność retransmisji w określonych momentach.
- **TCP:**
  - Okno odbiorcy jak w SR.
  - Nadawca ma timeout tylko dla segmentu LAR+1 (jak w GBN).
  - **Potwierdzenia skumulowane:**
    - „ACK *n*” oznacza „mam wszystko do bajtu *n*-1 włącznie”.
    - Umożliwia przesunięcie okna o wiele segmentów naraz.

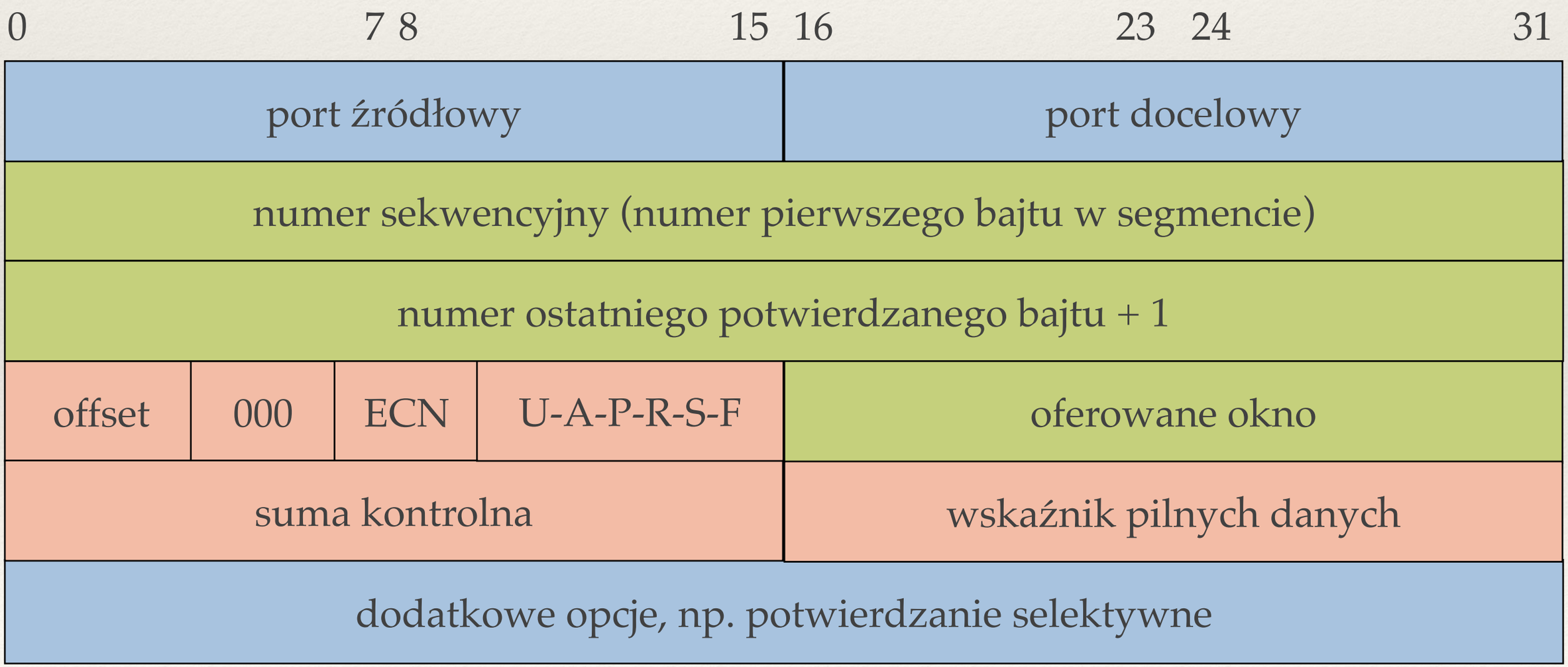
Upraszczamy

- **Pełna implementacja SR jest skomplikowana:**
  - Konieczność pamiętania czasu wysyłania poszczególnych zakresów bajtów.
  - Konieczność retransmisji w określonych momentach.
- **TCP:**
  - Okno odbiorcy jak w SR.
  - Nadawca ma timeout tylko dla segmentu LAR+1 (jak w GBN).
  - **Potwierdzenia skumulowane:**
    - „ACK *n*” oznacza „mam wszystko do bajtu *n*-1 włącznie”.
    - Umożliwia przesunięcie okna o wiele segmentów naraz.

animacje

TCP (Transmission Control Protocol)

- Bajty w strumieniu są numerowane.
- ACK zazwyczaj wysyłany w pakiecie razem z danymi w drugą stronę.



Potwierdzenia opóźnione

- Cel: zmniejszenie liczby pakietów tylko z ACK.

- Czy są dane do wysłania w drugą stronę?
  - Tak → zawsze wysyłamy ACK razem z tymi danymi.
  - Nie → wymuszamy określony czas (ułamek RTT) pomiędzy kolejnymi ACK.

- Przy potwierdzeniach skumulowanych takie podejście przekazuje tę samą informację.

Szybka retransmisja

- Wysyłamy segmenty po 1000 bajtów każdy.
- Co oznacza ciąg potwierdzeń:
  ACK 1001, ACK 2001, ACK 3001, ACK 3001, ACK 3001, ACK 3001, … ?

Szybka retransmisja

- Wysyłamy segmenty po 1000 bajtów każdy.
- Co oznacza ciąg potwierdzeń:
  ACK 1001, ACK 2001, ACK 3001, ACK 3001, ACK 3001, ACK 3001, … ?
- Odbiorca dostał segmenty 1, 2 i 3:
  - wygenerowały ACK 1001, ACK 2001, ACK 3001.
- Następnie dostał trzy segmenty o numerach 5 lub większych:
  - wygenerowały ACK 3001 („czekam na segment 4”).

Szybka retransmisja

- Wysyłamy segmenty po 1000 bajtów każdy.
- Co oznacza ciąg potwierdzeń:
  ACK 1001, ACK 2001, ACK 3001, ACK 3001, ACK 3001, ACK 3001, … ?
- Odbiorca dostał segmenty 1, 2 i 3:
  - wygenerowały ACK 1001, ACK 2001, ACK 3001.
- Następnie dostał trzy segmenty o numerach 5 lub większych:
  - wygenerowały ACK 3001 („czekam na segment 4”).
- Wniosek: odbiorca nie ma segmentu 4.
- Mechanizm **szybkiej retransmisji:** wysyłamy segment 4 jeszcze raz bez czekania na jego RTO.

Kontrola przepływu

Okno odbiorcy

Odbiorca wysyła rozmiar wolnego miejsca w oknie odbiorcy w polu **oferowane okno.**

- Przy każdym ACK.
- To inna informacja niż ACK: segmenty mogą być potwierdzane na bieżąco, ale jeśli aplikacja wolno czyta z okna, to oferowane okno jest małe.

Okno odbiorcy

odebrane, potwierdzone, przeczytane przez aplikację za pomocą `read()`

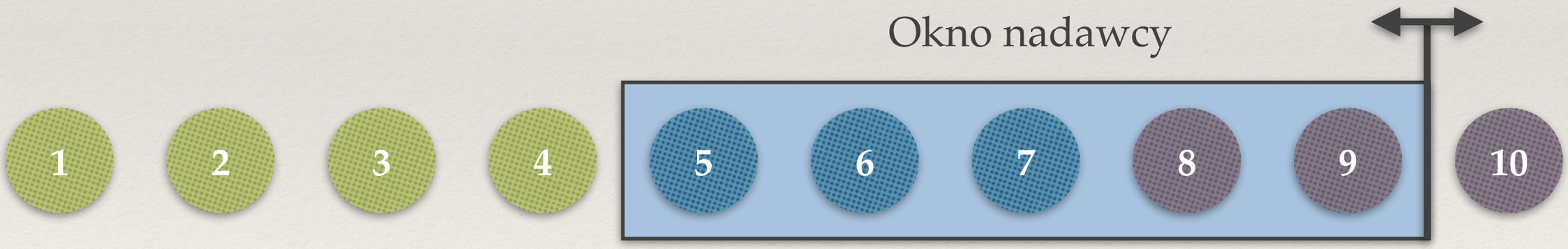
odebrane (i potwierdzone) ale nieprzeczytane przez aplikację

Odbiorca wysyła rozmiar wolnego miejsca w oknie odbiorcy w polu **oferowane okno.**

- Przy każdym ACK.
- To inna informacja niż ACK: segmenty mogą być potwierdzane na bieżąco, ale jeśli aplikacja wolno czyta z okna, to oferowane okno jest małe.

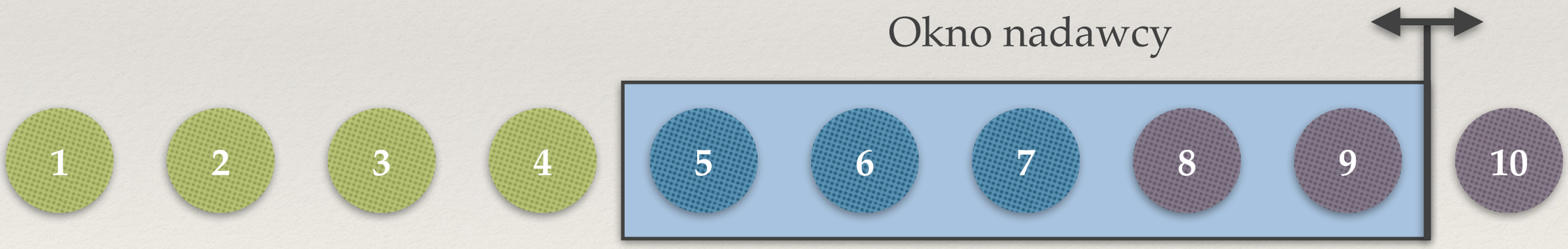
Oferowane okno

- Oferowane okno = wolne miejsce w buforze odbiorcy.
- Nadawca zmienia SWS (rozmiar swojego okna) na rozmiar oferowanego okna.
- Zachowawcze działanie: być może część wysłanych i niepotwierdzonych pakietów jest już w buforze odbiorcy.



Oferowane okno

- Oferowane okno = wolne miejsce w buforze odbiorcy.
- Nadawca zmienia SWS (rozmiar swojego okna) na rozmiar oferowanego okna.
- Zachowawcze działanie: być może część wysłanych i niepotwierdzonych pakietów jest już w buforze odbiorcy.



demonstracja

Informacje dodatkowe

Przykładowe komplikacje

- Oferowaliśmy okno = 0 i aplikacja zwolniła miejsce?
  → Wyślij osobno rozmiar okna (bez ACK).

- Nie mamy danych do wysłania w drugą stronę?
  → Opóźnij wysyłanie ACK.

- Oferowane okno jest mniejsze niż MSS?
  → Czekaj z nadawaniem.

Obliczanie RTO

- Obliczamy średnie RTT ważone wykładniczo czasem.
  - avg-RTT = α × avg-RTT + (1 - α) × zmierzone-RTT.
  - RTT segmentów stałe → avg-RTT zbiega do tej wartości.
  - W podobny sposób mierzymy wariancję RTT (var-RTT).

- RTO (*retransmission timeout*) = 2 × avg-RTT + 4 × var-RTT.

SACK (Selective ACKs)

- Współcześnie TCP obsługuje również potwierdzanie wybiórcze (*selective ACKs*).
- Nagłówek TCP zawiera wtedy:
  - „zwykłego” skumulowane ACK,
  - dodatkowe potwierdzenie kilku regionów bajtów.
- Bardziej precyzyjna informacja, przydatna zwłaszcza przy szybkiej retransmisji.

Gdzie implementować?

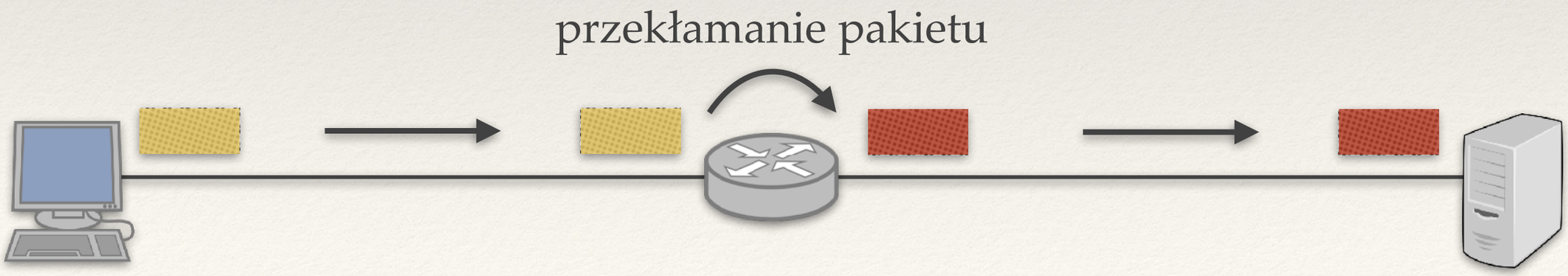
Gdzie implementować?

Warstwa sieciowa:

- Implementowana na routerach i urządzeniach końcowych.

Warstwa transportowa:

- Czy niezawodność dostarczania zapewniać na każdym łączu?
- Problem: błąd może nie być związany z łączem.
- Niezawodność dostarczania i tak musi być kontrolowana na urządzeniach końcowych.



Zasada end-to-end

Niezawodne przesyłanie danych musi być zaimplementowane na urządzeniach końcowych w warstwie transportowej, a urządzenia pośrednie i niższe warstwy…

- … mogą w tym pomagać. (**słaba wersja zasady**)
- … nie powinny się tym zajmować. (**silna wersja zasady**)

Słaba wersja zasady: TCP + WiFi

- WiFi traci 20-80% pakietów.
- TCP działa dobrze, jeśli łącza są w miarę niezawodne (bo reaguje na utratę pakietów zwolnieniem wysyłania).
- WiFi wprowadza potwierdzanie i retransmisję na poziomie warstwy łącza danych (to nie są zadania warstwy łącza danych).
- Krótkoterminowe korzyści, ale być może trudności w przyszłości przy wprowadzeniu innej wersji warstwy transportowej.

Lektura dodatkowa

- Kurose & Ross: rozdział 3.
- Tanenbaum: rozdział 6.

- Dokumentacja TCP: https://web.archive.org/web/20211226010252/http://www.networksorcery.com/enp/protocol/tcp.htm

- Interaktywne animacje:
  - Go-Back-N: https://media.pearsoncmg.com/ph/esm/ecs_kurose_compnetwork_8/cw/content/interactiveanimations/go-back-n-protocol/index.html
  - SR: https://media.pearsoncmg.com/ph/esm/ecs_kurose_compnetwork_8/cw/content/interactiveanimations/selective-repeat-protocol/index.html

Zagadnienia

- Co może stać się z przesyłanym ciągiem pakietów IP podczas zawodnego i niezawodnego transportu?
- Co to jest kontrola przepływu?
- Czym różnią się protokoły UDP i TCP? Podaj zastosowania każdego z nich.
- Co to jest segmentacja? Dlaczego segmenty mają ograniczoną wielkość? Rozwiń skrót MSS.
- Jak nazywają się jednostki danych przesyłane w kolejnych warstwach?
- Jak małe pakiety zmniejszają opóźnienie przesyłania danych?
- Jak protokoły niezawodnego transportu wykrywają duplikaty pakietów i potwierdzeń?
- Opisz algorytm Stop-and-Wait. Jakie są jego wady i zalety?
- Do czego służą numery sekwencyjne w niezawodnym protokole transportowym?
- Opisz algorytmy Go-Back-N i wybiórczego powtarzania (*selective repeat*).
- Dlaczego istotne jest potwierdzanie odbioru duplikatów segmentów?
- Co to jest RTO? Na jakiej podstawie jest ustalana wartość RTO?
- Co to są potwierdzenia skumulowane?
- Jakie mechanizmy niezawodnego transportu i kontroli przepływu implementowane są w protokole TCP?
- Na czym polega mechanizm opóźnionych potwierdzeń?
- Co oznaczają pola ,,numer sekwencyjny'' i ,,numer potwierdzenia'' w nagłówku TCP?
- Co to jest okno oferowane? Jak pomaga w kontroli przepływu?
- Na czym polega mechanizm szybkiej retransmisji? Kiedy się go wykorzystuje?
- Czy warstwa transportowa implementowana jest na routerach? Dlaczego?
- Sformułuj słabą i silną zasadę end-to-end.