

Zagadnienie maksymalizacji wykorzystania mediów transmisyjnych

Pamiętamy, że **jednym z celów działalności operatora** telekomunikacyjnego jest **minimalizacja kosztów** w dostarczaniu usług telekomunikacyjnych. Dla techniki wynika z tego konieczność proponowania takich rozwiązań aby ilość zasobów w sieci telekomunikacyjnej była jak najmniejsza a **tym samym dążymy** do **maksymalizacji wykorzystania zasobów**.

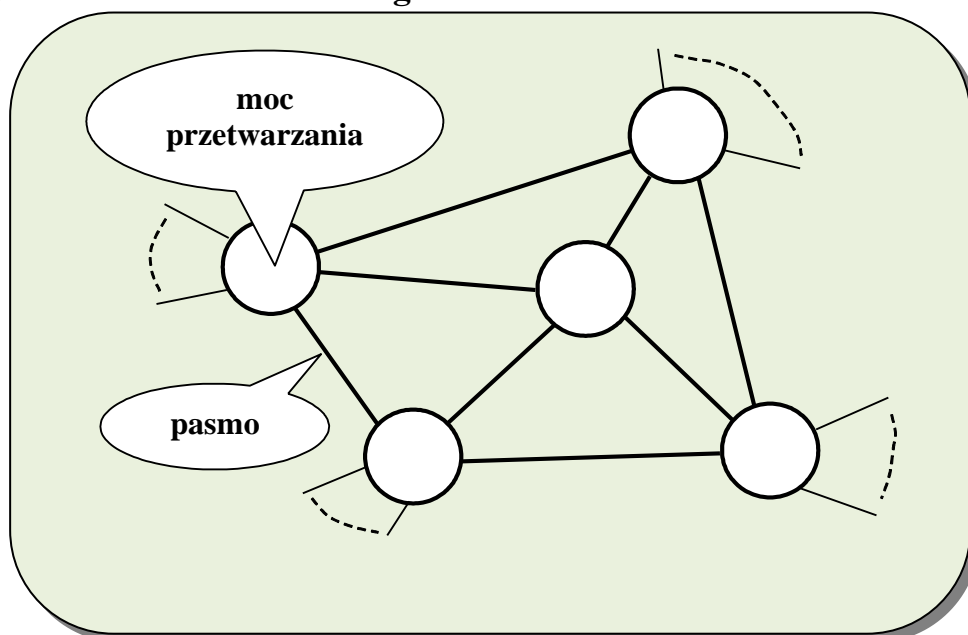
Ponieważ w sieci realizowane są **dwie podstawowe funkcje**, tzn. transmisja i komutacja (łączenie), to należy proponować takie rozwiązania aby **realizacja tych funkcji na poziomie sieci wymagała minimalnej ilości zasobów**.

Problem ten jest rozwiązywany na dwa uzupełniające się sposoby:

- **optymalizacja lokalna**; optymalizujemy realizację każdego z elementów funkcjonalnych, tzn. węzła komutacyjnego oraz systemu transmisyjnego realizującego łącza międzywęzłowe i łącza abonenckie,
- **optymalizacja globalna**; optymalizujemy sieć uwzględniając fakt iż jest ona systemem masowej obsługi, tzn. należy obsłużyć na określonym poziomie jakości zmieniające się w czasie zapotrzebowanie na usługi.

Zagadnienia te są zagadnieniami złożonymi i daleko wybiegającymi poza treść tego wykładu.

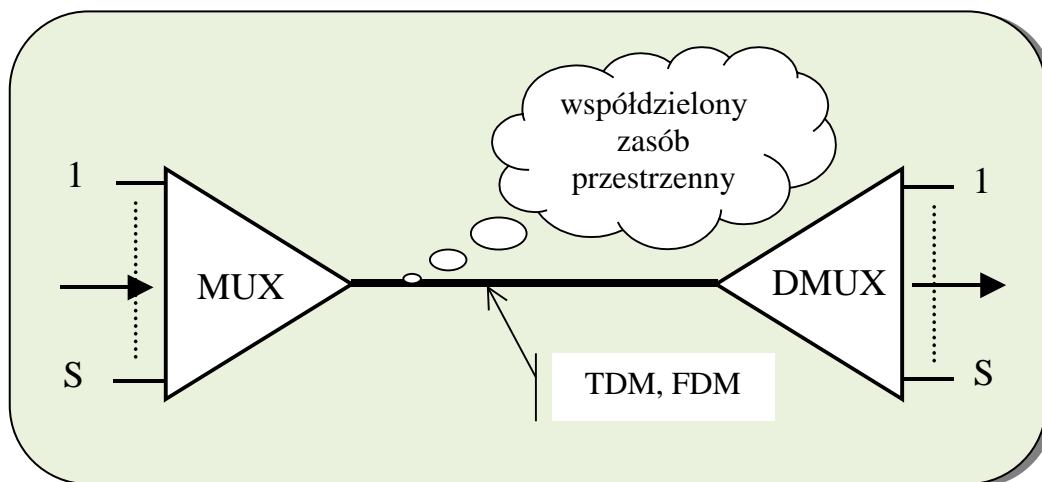
Najogólniej rzecz ujmując można stwierdzić, że **zasoby które podlegają ograniczeniom** w przypadku węzłów komutacyjnych to **moc przetwarzania**, a w przypadku transmisji to **pasmo** (przepustowość), które jest dostępne przy zastosowaniu określonego medium.



Dalsze nasze **rozważania ograniczymy do funkcji transmisji** i stąd wynikającego problemu maksymalizacji wykorzystania medium dla jej realizacji. Uzasadnione to jest tym iż telekomunikacja jako pierwszy z problemów jaki musi rozwiązywać to problem przesyłania na odległość sygnałów niosących informacje między dwoma bezpośrednio połączonymi punktami.

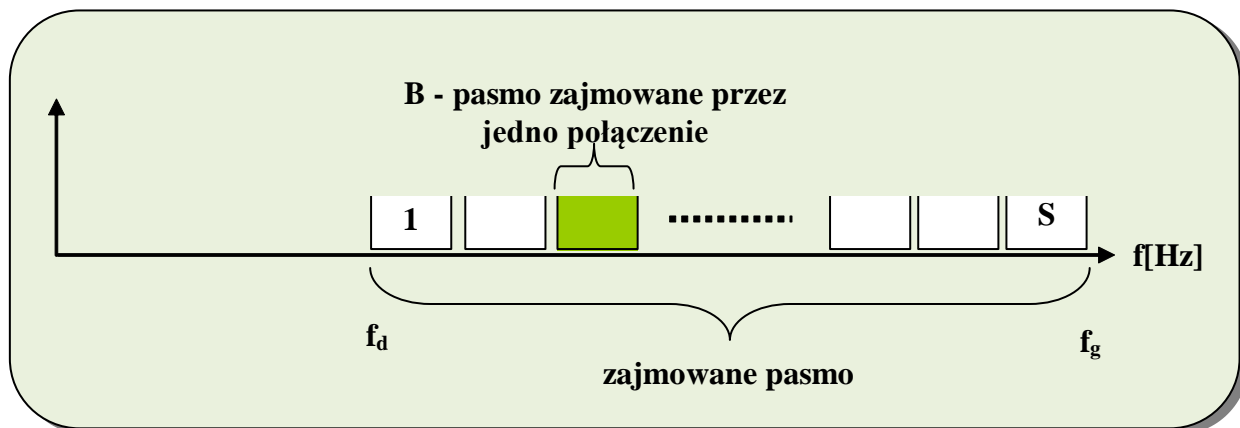
Otóż jak to już było podkreślone na wcześniejszych zajęciach każde medium transmisyjne ma specyficzne cechy określające możliwości przenoszenia sygnałów między wejściem do medium i wyjściem z tego medium. **Możliwości te są na ogół dużo większe niż potrzeby** dla realizacji **jednego połączenia** między dwoma abonentami.

To zrodziło **pomysł współdzielenia medium** między wieloma połączeniami i w ten sposób **wprowadzenia nowej funkcji** jaką jest **multipleksacja**. Jak już wiemy to współdzielenie może być realizowane w dziedzinie pasma (częstotliwości) oraz czasu co ma odzwierciedlenie w nazwach FDM i TDM. To współdzielenie zasobów przestrzennych przez wiele połączeń **powoduje zwiększenie wykorzystania tych zasobów!!!**



W **przypadku techniki FDM stosując modulację nośnych** sygnałem o ograniczonym paśmie **B tworzymy obok siebie w dziedzinie częstotliwości łącza** z których każde obsługuje w danej chwili czasu **jedno połączenie** źródła z odbiorcą informacji. Na kolejnym rysunku pokazano przykład dla **S** takich połączeń z których każde ma do dyspozycji pasmo o szerokości **B**.

Jako ćwiczenie proszę na tym rysunku zaznaczyć częstotliwości nośne. Ile ich jest i gdzie?



Było to rozwiązanie, które **w telekomunikacji zostało zastosowane jako pierwsze**. W oparciu o tą zasadę budowano analogowe systemy transmisyjne, które umożliwiały początkowo realizację 12/24 a później aż 2700 połączeń. Zauważmy, że **im większa jest liczba S** tym większe jest zajmowane pasmo. To oznacza, że sygnały o wyższych częstotliwościach są bardziej tłumione w przypadku linii miedzianych (patrz parametr *alfa* i jego zależność od częstotliwości). To z kolei **wymaga gęstszego umieszczania wzmacniaków z wszystkimi tego konsekwencjami**.

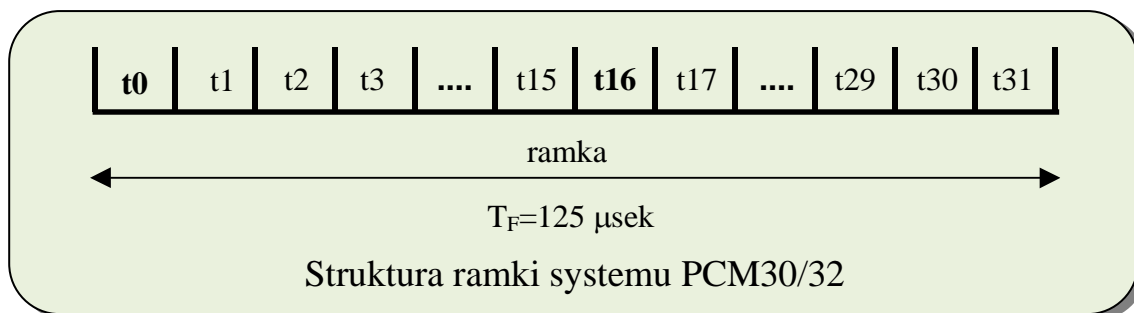
Jak pamiętamy **technika analogowa miała swoje wady i ograniczenia**, które **usunęła technika cyfrowa** wprowadzając jednocześnie inny sposób współdzielenia zasobów oparty na TDM. **To rozwiązanie jest obecnie dominujące** w maksymalizacji wykorzystania pasma udostępnianego przez medium. Dlatego też **zostanie ono omówione bardziej szczegółowo**.

Ponieważ **pierwszą propozycją kodowania sygnału mowy było PCM** to ono wyznaczyło zasady multipleksacji z podziałem czasowym. Pojawiły się dwa standardy TDM, pierwszy w **Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej** nazwany **PCM24** oraz drugi w kolejności **europejski PCM30/32**. Przy współdzieleniu zasobu przestrzennego przy podziale czasowym jedno połączenie otrzymuje ten zasób na ściśle określony czas i proces ten musi być powtarzany co stały okres. **Konieczne jest zatem utworzenie ramki czasowej**, której długość wynika z tego okresu i równa się **125μs**. Wartość ta jest konsekwencją **twierdzenia Nyquista** i szerokości pasma dla sygnału mowy, którego **górna częstotliwość** po uwzględnieniu braku idealnych filtrów **wynosi 4000Hz**. Samo pasmo sygnału mowy jest od 300Hz do 3400Hz (ciekawe że od 300Hz a dlaczego nie niżej?).

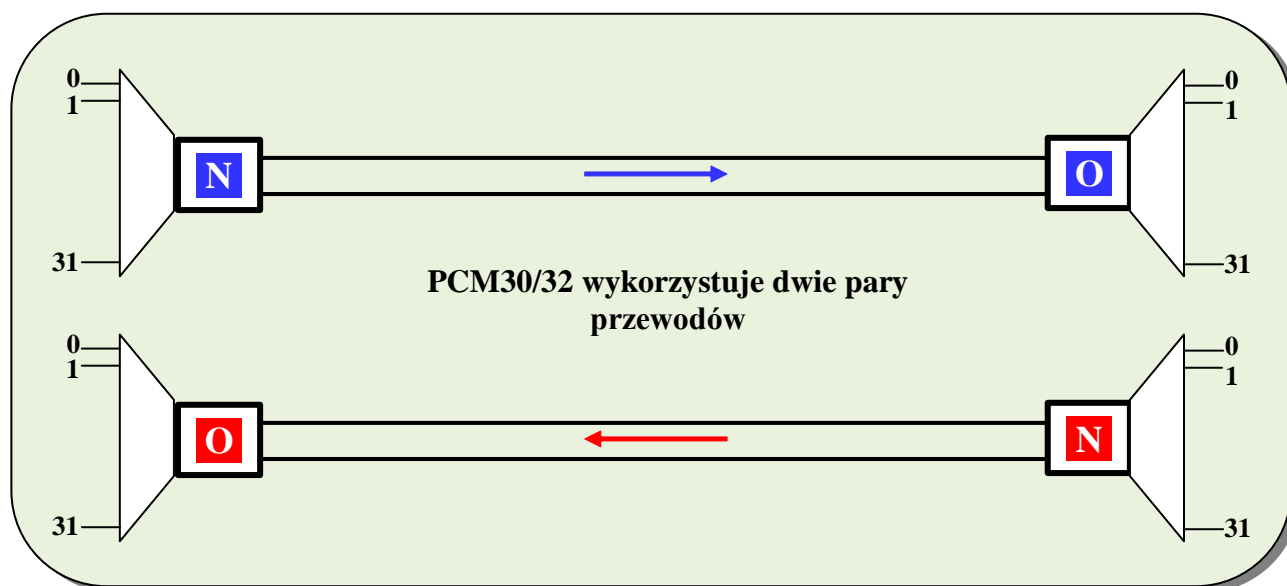
Odcinek czasu o długości 125μs został dla systemu europejskiego podzielony na 32 szczeliny czasowe ponumerowane od 0 do 31, a każda szczelina składa się z ośmiu bitów. Liczba bitów wynika z zasady tworzenia sygnału PCM.

Czy wszystkie szczeliny mogą być użyte na realizację połączeń?

Odpowiedź brzmi nie!!! Gdybyśmy tak postąpili to po stronie odbiorczej nie byłoby możliwe wydzielenie bitów należących do konkretnej szczeliny czasowej (dlaczego?). Jest to warunkiem koniecznym poprawnego przesłania informacji od źródła do odbiorcy. Zatem jedną szczelinę czasową (zerową) należy przeznaczyć na **rozpoznanie początku ramki czasowej** poprzez wstawianie tam ustalonego wzorca ramkowania postaci **C0011011** (C może przyjmować wartość 0 albo 1) do co drugiej ramki. Proces znajdowania wzorca (słowa) ramkowania nazywany jest **synchronizacją**. Z pozostałych 31 szczelin tylko 30 jest przeznaczonych dla realizacji połączeń użytkowych (między źródłem i odbiorcą będących abonentami). **Szczelina szesnasta** (t16) została przeznaczona do **wymiany informacji sterującej** między dwoma węzłami komutacyjnymi. **Stąd też nazwa tego systemu PCM30/32** - bo jest 30 szczelin użytkowych spośród wszystkich 32 szczelin czasowych.



Standard tego systemu oparty jest na medium miedzianym i rozdzieleniu obu kierunków przesyłania sygnałów na osobne pary przewodów.



Możemy **obliczyć przepływność bitowa** tego sposobu multipleksacji. Otóż ramka o długości $125\mu s$ ma 32 szczeliny czasowe z których każda zawiera 8 bitów co daje

$$32 \cdot 8 / 125\mu s = 2048 \text{ kb/s} = 2.049 \text{ Mb/s}$$

i dlatego używa się określenia, że PCM30/32 to system o przepustowości 2Mbitowej. Proszę zauważyć, że **faktycznie ma on dwa takie strumienie po jednym na kierunek**.

Zastanówmy się czy można ten strumień binarny (zero - jedynkowy) przesyłać bezpośrednio przez linię. Z już wcześniej przeprowadzonych rozważań wynika, że nie (proszę sobie przypomnieć, gdzie i w związku z czym były te rozważania prowadzone). **Konieczne jest zatem zastosowanie do tego strumienia kodowania liniowego (transmisyjnego) i jest to kodowanie HDB3**. Zasada tego kodowania została pokazana na kolejnym rysunku.

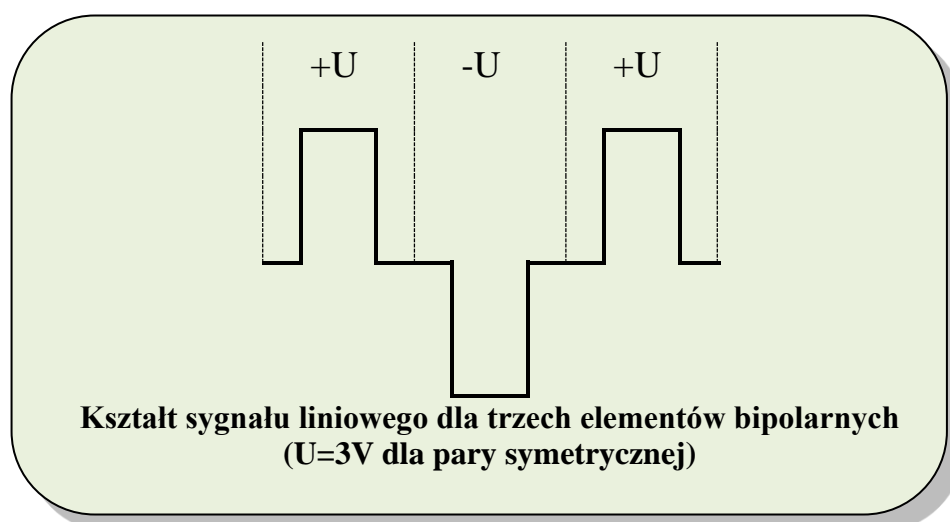
Zasada kodowania HDB3

ciąg binarny	ciąg HDB3	warunki wyboru ciągu
0000	000V	jeżeli za ostatnim elementem V w ciągu HDB3 wystąpiła nieparzysta liczba elementów B
	B00V	jeżeli za ostatnim elementem V w ciągu HDB3 wystąpiła parzysta liczba elementów B

Element V ma amplitudę U i znak łamiący zasadę kodowania AMI, natomiast element B jest elementem bipolarnym ($+U$ lub $-U$).

Przykład kodowania ciągu binarnego według zasady AMI i HDB3

Baudot code																											
BIN	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	
AMI	+	-				+					-			+					-	+					-	+	
	U	0	U	0	0	U	0	0	0	0	U	0	0	U	0	0	0	0	U	U	0	0	0	0	U	U	
HDB3	+	-				+					+	-		+	-				-	+	-	+			+	-	+
	U	0	U	0	0	U	0	0	0	U	U	0	0	U	U	0	0	U	U	U	U	0	0	U	U	U	



To kodowanie liniowe ma dwie **podstawowe cechy** wymagane dla kodów liniowych stosowanych w dolnym paśmie przenoszenia medium (dlaczego takie wymagania?):

- składowa stała jest równa zero,
- w sygnale liniowym występują co najwyżej trzy symbole kodujące zero (napięcie równe zero).

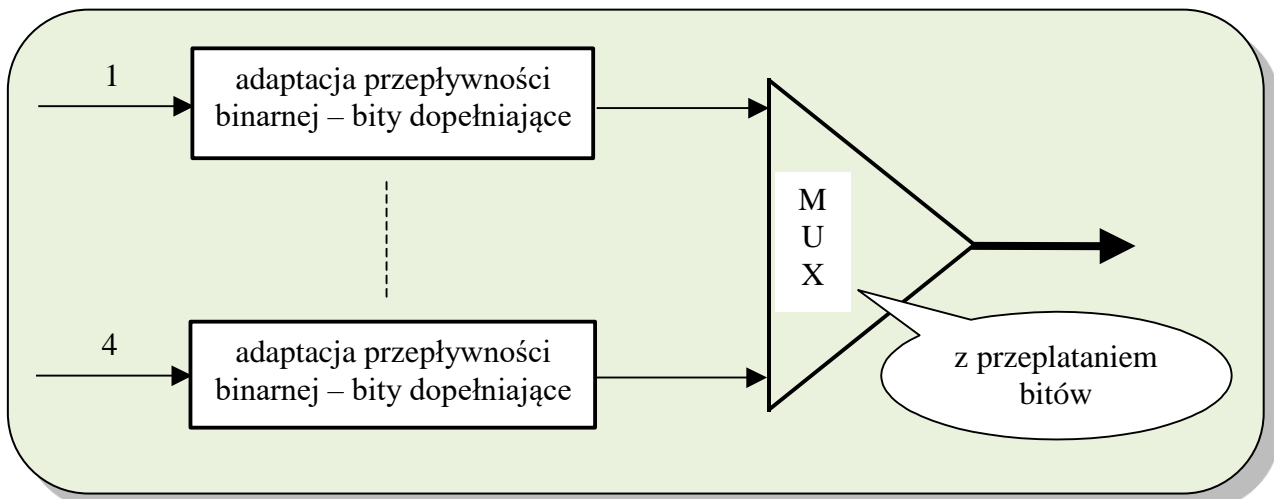
Zasadę multipleksacji można zastosować do strumieni 2Mb/s i w ten sposób maksymalizować wykorzystanie medium do przenoszenia sygnałów umożliwiając jednocześnie zwiększenie liczby realizowanych połączeń. **Ponieważ widmo sygnału jest coraz większe** (impuls jest coraz krótszy) **konieczne jest stosowanie specjalnie skonstruowanych kabli** symetrycznych lub niesymetrycznych oraz gęstsze wstawianie elementów aktywnych służących do regeneracji sygnałów. Kable niesymetryczne mają tę cechę, że są przewodnikami zamkniętymi i tym samym lepiej izolują od otoczenia co jak już wiemy nie jest bez znaczenia dla zasięgu transmisji (patrz wpływ przeników!!!).

Bazując na strumieniu 2Mb/s utworzono hierarchiczny system multipleksacji i zastosowano współczynnik multipleksacji równy cztery.

W wyniku multipleksacji otrzymuje się następujące strumienie:

- $4 \times 2\text{Mb/s} = 8\text{Mb/s}$,
- $4 \times 8 = 4 \times 4 \times 2 \equiv 34\text{Mb/s}$ (to nie jest pomyłka!),
- $4 \times 34 = 4 \times 4 \times 4 \times 2 \equiv 140\text{Mb/s}$ (to też nie jest pomyłka!).

Ten system multipleksacji i realizacji transmisji nazwano **PDH (Plejochronous Digital Hierarchy – nie jest już stosowany)**. Przy czym nie jest to proste zwielokrotnienie a zwielokrotnienie w którym z uwagi na różnice w zegarach każdego 8Mb/s strumienia składowego (wejściowego) stosuje się bity dopełniające, a następnie tak wyrównane strumienie poddawane są **multipleksacji z przeplataniem bitów** (co to znaczy przeplatanie bitów?).

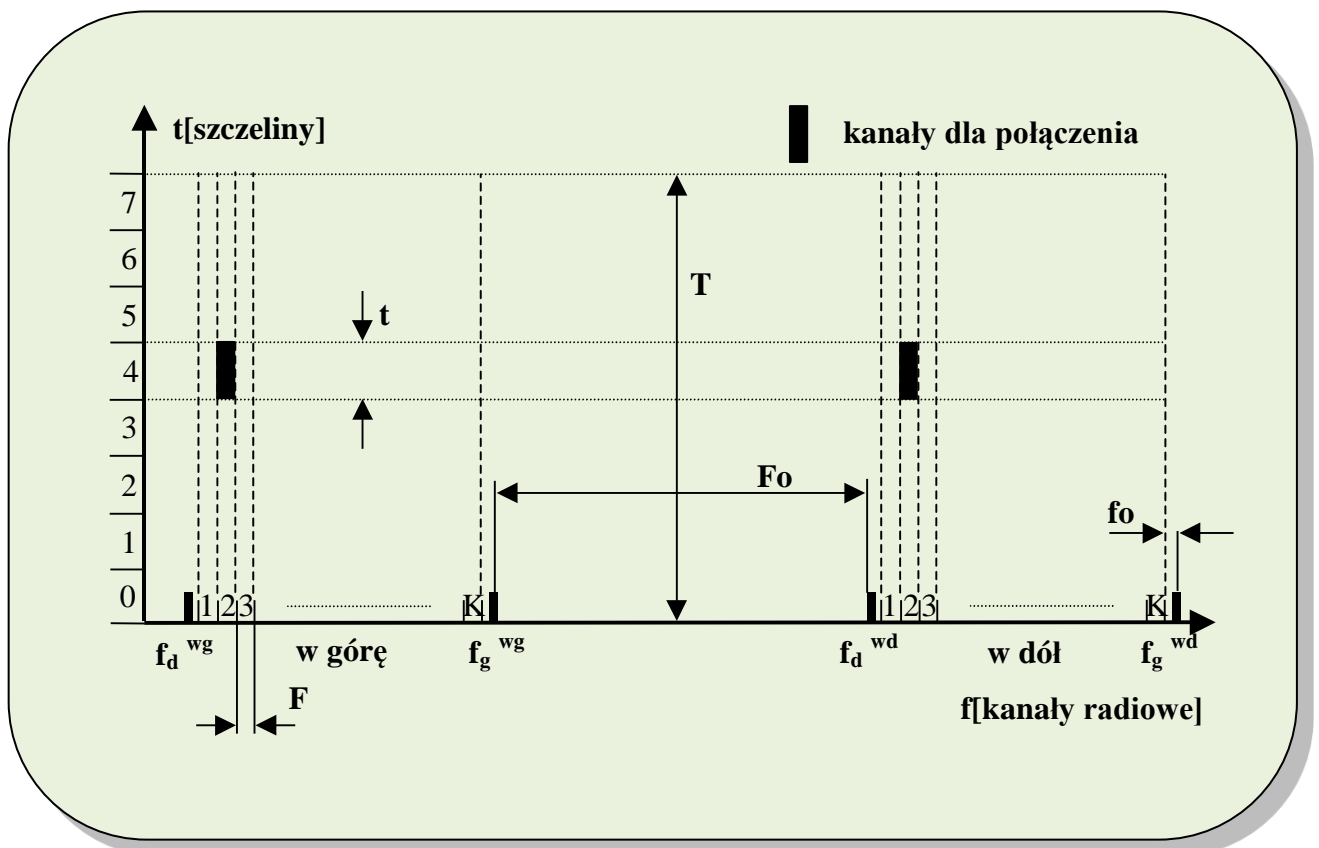


Wadą tego rozwiązania jest to, że jeżeli mamy sygnał na jakimś poziomie hierarchii to aby wydobyć sygnał składowy muszą przejść wszystkie poziomy demultipleksacji (proces odwrotny do multipleksacji), gdyż lokalizacja tego sygnału jest dostępna na najniższym poziomie tej hierarchii. Jest tak z uwagi na bity uzupełniające i przeplot bitowy. Zorganizowanie takiego systemu wymaga dodatkowych przepływności co objawia się tym, że z punktu widzenia przepływności nie jest to proste mnożenie przepływności strumienia 2Mb/s.

W przypadku **medium w postaci przestrzeni radiowej**, które jest wykorzystywane w dostępie abonentów ruchomych do sieci to z uwagi na ściśle określone i wąskie pasmo przydzielone dla realizacji połączeń radiowych **zastosowano jednocześnie współdzielenie tego pasma w częstotliwości i czasie** (FDM i TDM). Dzięki temu można było utworzyć większą liczbę łączy.

Ogólne zasady podziału zasobów są następujące:

- **pasmo radiowe** przyznane dla systemu podzielone jest na dwie części:
 - **w górę** (od Mobile Station MS do Base Transceiver Station BTS),
 - **w dół** (od BTS do MS),
- każdą z nich **podzielono na K kanałów** (pasm) radiowych,
- **dostęp do kanału** (pasma) radiowego jest **z podziałem czasowym** (TDMA), a liczba szczelin czasowych wynosi 8.



System	f_d^{wg} [MHz]	f_g^{wg} [MHz]	f_d^{wd} [MHz]	f_g^{wd} [MHz]	F [kHz]	Fo [MHz]	fo [kHz]	t [μsek]	T [msek]	K
GSM 900	890	915	935	960	200	20	100	577 (15/26)	4.615	124
DCS 1800	1710	1785	1805	1880	200	20	100	577 (15/26)	4.615	374

Z chwilą wprowadzenia jako **medium światłowodów** opracowano dwa systemy wykorzystujące technikę TDM - **SONET** (Synchronous Optical Network) opracowany w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej oraz **SDH** (Synchronous Digital Hierarchy), który jest systemem europejskim. **Oba systemy są obecnie stosowane.**

W odróżnieniu od PDH **są to systemy synchroniczne** co wymaga zegarów o dużej stabilności i ich rozprowadzania po sieci. Ale dzięki temu i zastosowaniu **przeplotu bajtowego** nie ma on wad PDH.

Zdefiniowano następujące przepływności podstawowe w SDH:

- STM-1 – 155,520 Mbit/s, popularnie nazywany SDH 155 Mbit/s,
- STM-4 – 622,080 Mbit/s, popularnie nazywany SDH 622 Mbit/s,
- STM-16 – 2,488320 Gbit/s, popularnie nazywany SDH 2,5 Gbit/s,
- STM-64 – 9,95328 Gbit/s, popularnie nazywany SDH 10 Gbit/s,
- STM-256 - 39,81312 Gbit/s, popularnie nazywany SDH 40 Gbit/s.

STM (Synchronous Transport Module) to skrót określający synchroniczny moduł transportowy. Oprócz tych przepływności przyjęła się przepływność

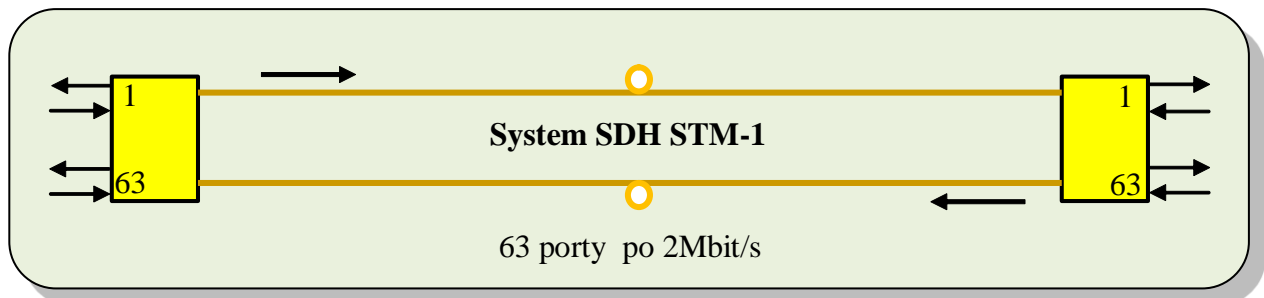
- STM-0 – 51,84 Mbit/s aby oba rozwiązania SONET i SDH mogły ze sobą współpracować.

Dzięki zastosowaniu przeplotu bajtowego, istnieje możliwość bezpośredniego dostępu do strumienia podstawowego (składowego). Rozbudowano także mechanizmy kontroli jakości transmisji oraz przewidziano strumienie dla organizacji zarządzania tym systemem.

Dla realizacji zwielokrotnienia (**multipleksacji**), uzyskiwania strumienia wyższego rzędu w postaci modułu transportowego, zastosowano podejście oparte na **koncepcji kontenerów**.

Na przykład system SDH z STM-1 **umożliwia przeniesienie 63 strumieni systemu PCM 30/32**, czyli strumieni 2Mbit/s. Strumień ten jest umieszczony w kontenerze C-2, który podlega dalszym przekształceniom (odwzorowanie,

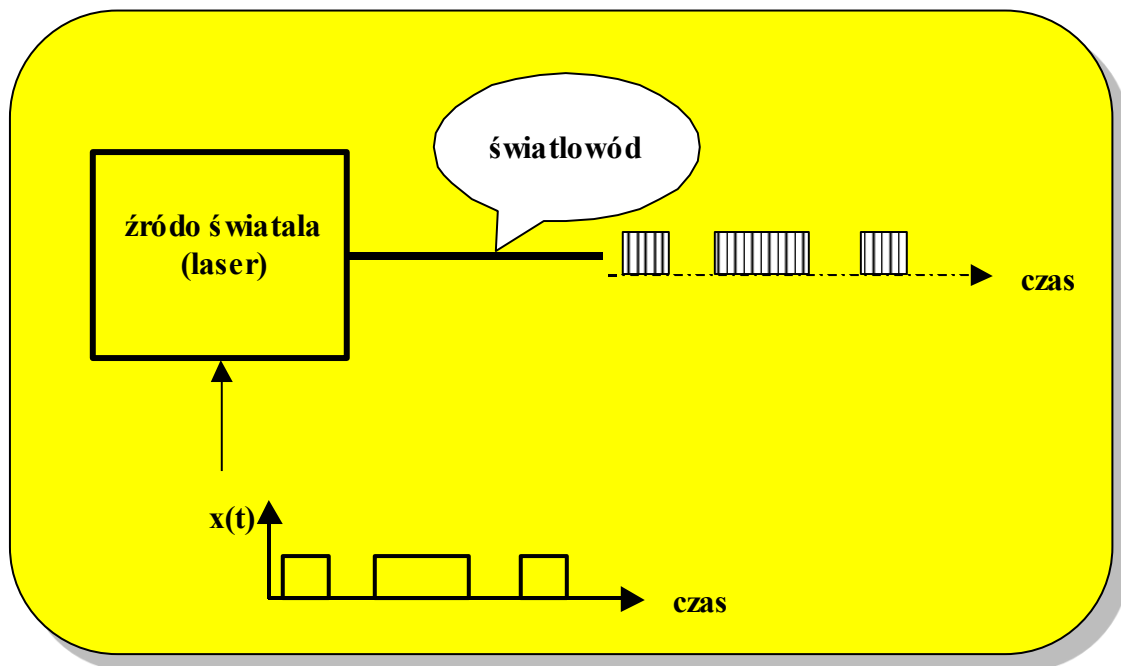
dopasowanie, zwielokrotnienie). W standardzie są także inne typy kontenerów.



Ramka czasowa dla systemu SDH wynosi $125\mu\text{s}$ i dla STM-1 składa się z 270 kolumn i 9 wierszy. Każdy element tej ramki to oktet (8 bitów czyli bajt). 9 pierwszych kolumn to nagłówek ramki przeznaczony na cele organizacyjne. Dla uzmysłowienia sobie jakie problemy musiano rozwiązać podajmy czasy trwania bajtu, który jest równy 51.44ns a bitu - 6.43ns . W przypadku wyższych krotności systemu czasy te są znacznie krótsze i wynikają z dzielenia przez krotność systemu (proszę obliczyć te czasy!).

Ponieważ pasmo dostępne w każdym z okien jest znacznie większe niż wymaga tego strumień binarny w związku z tym zastosowano kodowanie transmisyjne nBmB i w Polsce $n=5$ a $m=6$. Proszę zauważyć, że przepływność strumienia elementów (symboli) w linii jest większa niż strumienia binarnego. Jest to sytuacja odwrotna niż stosowana w przypadku linii miedzianych. Tą nadmiarowość wykorzystuje się do detekcji błędów podczas transmisji.

Amplituda źródła sygnału świetlnego o danej długości fali jest modulowana sygnałem $x(t)$ źródła informacji. W tym przypadku mamy kluczowanie amplitudy sygnału świetlnego czyli modulację ASK i jest to najczęściej stosowany rodzaj modulacji. Ale stosuje się także inne aby na jednej długości fali przesłać więcej bitów na sekundę.

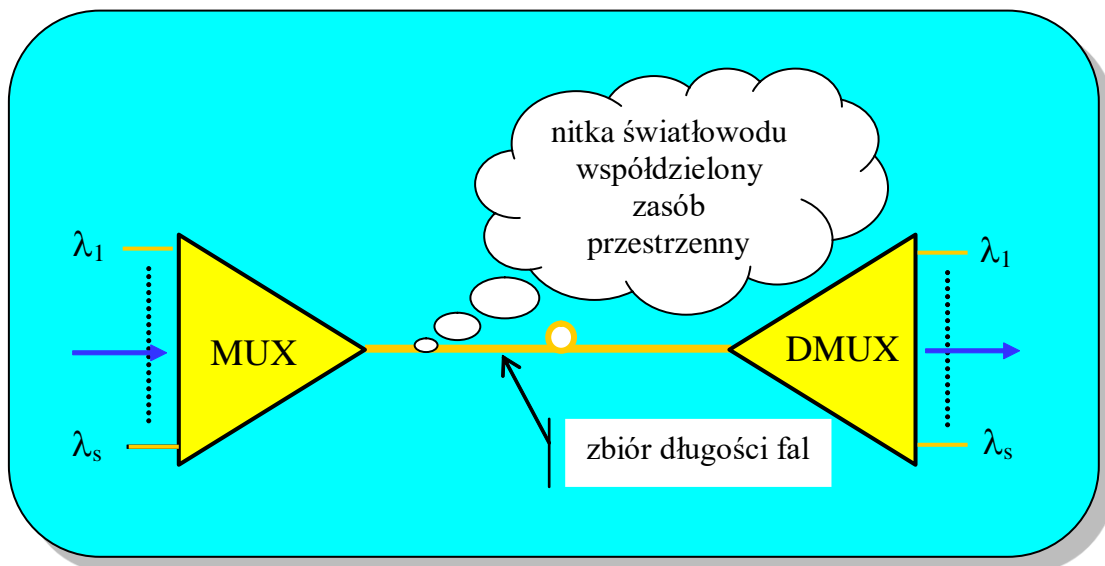


Możliwości lepszego wykorzystania medium jakim jest światłowód, tzn. zwiększenia liczby łączy ponad te o których dotychczas mówiliśmy daje technologia **WDM** (Wavelength Division Multiplexing) i jej rozszerzenie nazywane **DWDM** (Dense WDM) czyli gęste WDM.

W przypadku WDM **odstęp między długościami fal** wynosi **od 4 do 6 nm**, natomiast dla DWDM wynosi **0.4 nm**. Dzięki tym technologiom do jednej nitki światłowodu można wprowadzić od kilku (**DWM do 8 fal**) do kilkuset (**DWDM aktualnie do 320 fal**) długości fal i na każdej z nich umieścić np. system SDH STM-N.

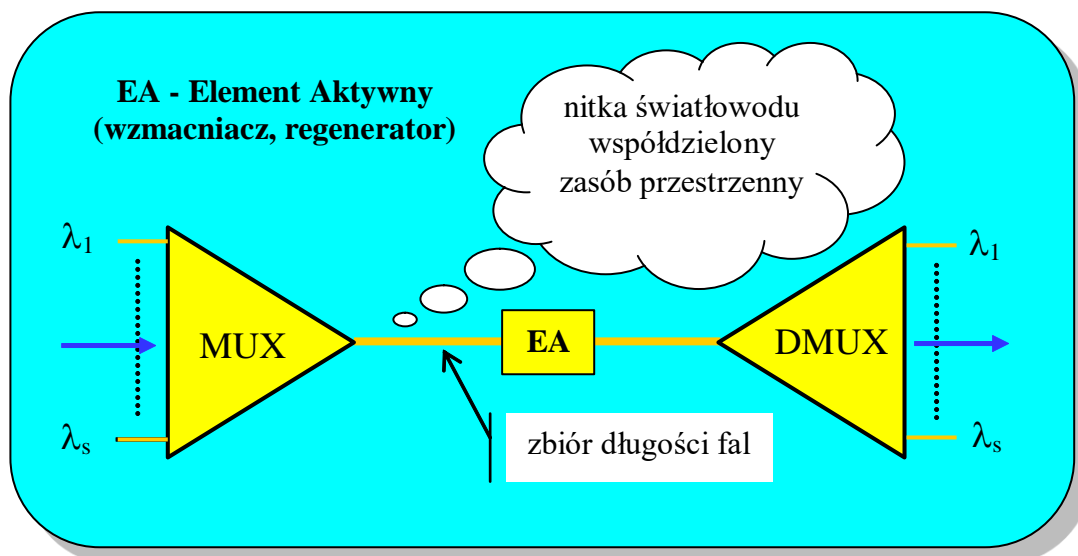
W związku z tym, że mamy cały zbiór długości fal prowadzonych w światłowodzie to bardzo często mówi się o **kolorowych światłowodach**. Należy jednak pamiętać, że nie ma to nic wspólnego z kolorami rozróżnianymi przez ludzkie oko (proszę porównać, gdzie znajdują się okna wykorzystywane w światłowodzie a gdzie jest zakres światła widzialnego).

Na przykład jeżeli liczba długości fal wynosi 80 i na każdej z nich umieszczono strumień STM-64 to sumaryczna przepływność strumienia binarnego na nitce światłowodu wynosi **$80 \times 10 \text{ Gb/s} = 800 \text{ Gb/s} = 0.8 \text{ Tb/s}$** .



Z uwagi na **tłumienność** ale przede wszystkim na **dyspersję** konieczne jest przy znacznych odległościach stosowanie elementów aktywnych, których zadaniem jest odtworzenie kształtu nadanego sygnału. Mamy tu dwa sposoby realizacji tej funkcji:

- **wzmacniania** sygnału optycznego lub
- **regeneracji** .

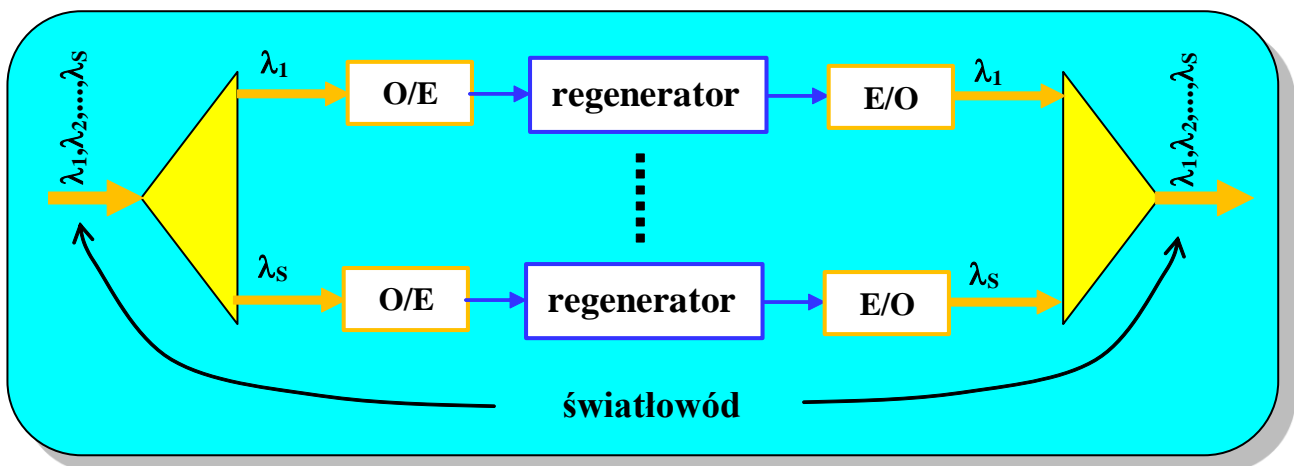


Aktualnie w optyce można zrealizować **wzmacniacze optyczne** . Rozwiązanie to ma dokładnie te same wady jak stosowanie wzmacniaczy w technice analogowej FDM z wykorzystaniem przewodów miedzianych (**problem addytywności szumów i zakłóceń**). **Wzmacniacze** pracują w zakresie od 1530 do 1565 nm czyli mają **pasmo 35 nm** . Z uwagi na to, że światłowód jest

przewodnicą zamkniętą to problem zakłóceń z otoczenia światłowodu nie istnieje. Natomiast pojawia się nowy problem wynikający z faktu istnienia **zjawisk liniowych** (brak dobrych filtrów optycznych – dlaczego to ma wpływ?) oraz **zjawiska nieliniowości** światłowodu i jego skutków w przypadku DWDM. W tym ostatnim przypadku (**nieliniowości**) następuje podczas transmisji światła przenikanie energii z jednej do drugiej długości fali na skutek mieszania się długości fal (**mieszanie czterofalowe**).

Dotychczas nie udało się zrealizować **regeneratorów optycznych** (ale prace trwają).

Dlatego **aby przeprowadzić regenerację** sygnału optycznego musimy najpierw wydzielić każdą z długości fali i **przejsć na sygnał elektryczny** (O/E), a następnie dokonać regeneracji i znowu **przejsć na sygnał optyczny** (E/O).



Aktualnie **odległości d_w** między wzmacniaczami wynoszą **około 100 km** dla WDM i **od 100 do 200 km** dla DWDM.

Natomiast regeneratory umieszcza się w **odległościach d_R od 1500 do 5000 km**. Oczywiście między regeneratorami znajdują się wzmacniacze (**proszę odpowiedzieć dlaczego tak postępujemy?**)

Zilustrowano to na kolejnym rysunku.

