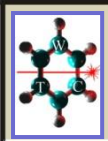


# Zasady zwielokrotnienia czujników punktowych

- Wprowadzenie
- Koncepcja sieci czujników
- Architektury sieci
- Zwielokrotnienie niekoherentne
- Zwielokrotnienie czujników interferencyjnych





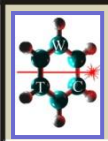
## Wprowadzenie

Połączenie wielu czujników w jeden organizm nazywamy siecią. W sieci czujników, co najmniej dwa czujniki, które mogą być miejscowo lub ciągle rozłożone w przestrzeni zgodnie z pewną topologią (omówioną dalej), działają i są kontrolowane przez pojedynczy centralny terminal optoelektroniczny (nadajnik-odbiornik). Wymaga to odpowiedniego schematu dostarczania jednoznacznego adresowania sygnałów zarówno: do (multipleksowanie) jak i od (demodulacja) czujników.

Sieć czujników punktowych dotyczy przypadków gdy czujniki są zlokalizowane w przestrzeni (**discrete** lub **quantized sensors**).

Funkcje jednostki centralnej (**multiplexing**):

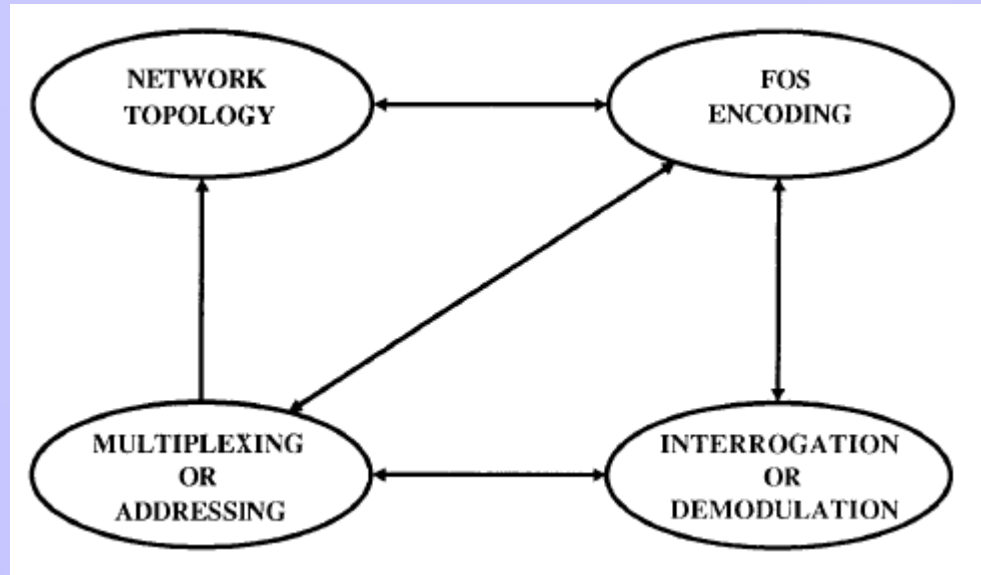
- zasilanie (**powering**) sieci sygnałem optycznym o odpowiednim natężeniu, rozkładzie widmowym, SOP oraz własnościach chwilowych (sygnał ciągły lub modulowany),
- detekowanie (**detecting**) części mocy optycznej zmodulowanej (zakodowanej) przez mierzalny czynnik w danym czujniku oraz przesłanie go z powrotem przez terminal,
- identyfikowanie informacji (**identifying**) odnośnie wartości czynnika mierzonego z danego czujnika poprzez odpowiednie schematy adresowania, przetwarzanie i dekodowania,
- przekształcanie (**evaluating**) oddzielonych sygnałów z czujników na sygnały elektroniczne, które są kalibrowane zależnie od mierzalnego czynnika



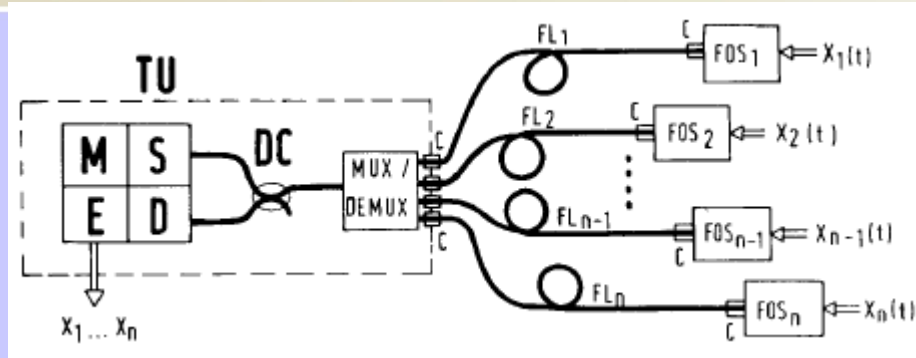
## Koncepcja sieci czujników

Przetwarzanie może być realizowane w dziedzinie **czasu** - TDM (*time-division multiplexing*), **częstotliwości** - FDM (*frequency-division multiplexing*) lub **długości fali** - WDM (*wavelength-division multiplexing*) ostatnie tylko FOS.

Główną korzyścią i motywacją dla zwielokrotnienia czujników jest możliwość osiągnięcia redukcji kosztu instalacji pojedynczego czujnika, gdyż wiele czujników może być zasilanych i przetwarzanych przez pojedynczy układ nadawczo-odbiorczy.



**Fig. 1.** Współzależność głównych funkcjonalnych części sieci światłowodowej

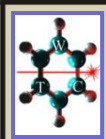


**Rys. 2** Uogólniona sieć z wydzieleniem podstawowych elementów: TU – jednostka nad.-odb., S – nadajnik, M – modulator, D – detektor, E – przetwornik sygnału, FL – kanały światłowodowe

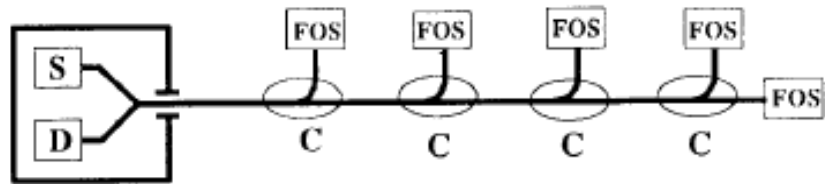
**Źródło** – zależne od zastosowanego dekodera sygnału oraz techniki zwielokrotnienia: lampy arc, lasery gazowe, LD, LED, SRD – charakterystyka widmowa z  $\lambda_0$  i  $FWHM = \Delta\lambda$ ,  $L_c = (\lambda_0)^2 / \Delta\lambda = t_c c$ ,  $t_c = 1 / \Delta f$ .

**Modulator** – zewnętrzny (modulacja amplitudy lub natężenia), wewnętrzny – dla źródła spójnego (fazy lub częstotliwości). Stosowane typy sygnału modulującego: sinusoidalny, piłowy, powtarzalny impuls ze stałą lub zmienną częstotliwością oraz inna skomplikowana funkcja w czasie – wszystkie charakteryzowane przez współczynnik modulacji  $m = (M_{max} - M_{min}) / M_{max}$

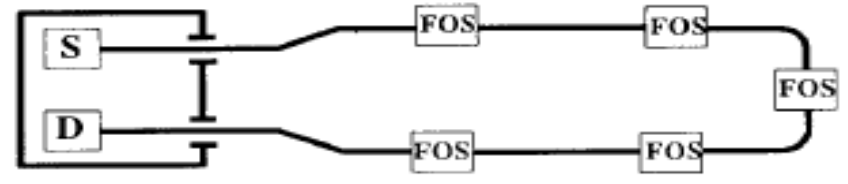
**Połączenia i sprzęgacze** – przyczyna stratności mocy w układzie. DC charakteryzuje współczynnik podziału  $P_1 / (P_1 + P_2)$ ,  $P_i$  – moc w danym wyjściu oraz straty wtrąceniowe  $\alpha_i = 10 \log(P_1 + P_2 / P_0)$ ,  $P_0$  - moc wejściowa. Generalnie dodatkowo zachodzi zależność od długości fali, rozkładu modów, SOP.



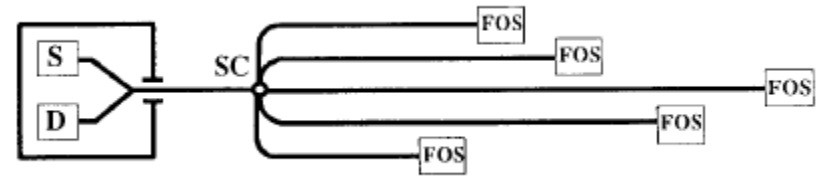
## Architektury sieci



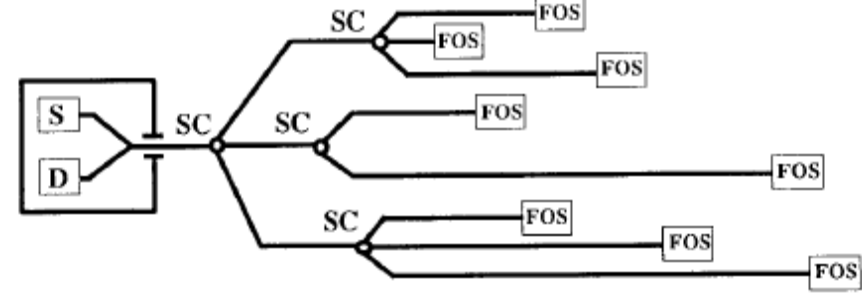
**Macierz liniowa** (dostęp przez DC do odbiciowych FOS)



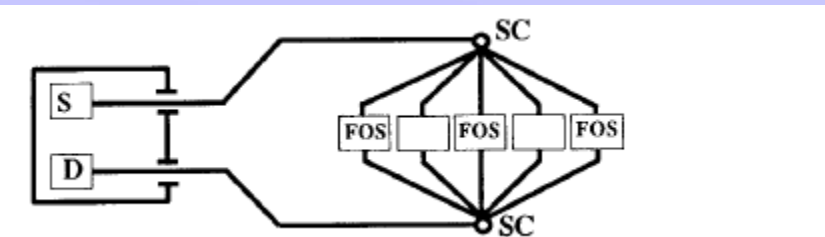
**Pierścień** (FOS transmisyjne)



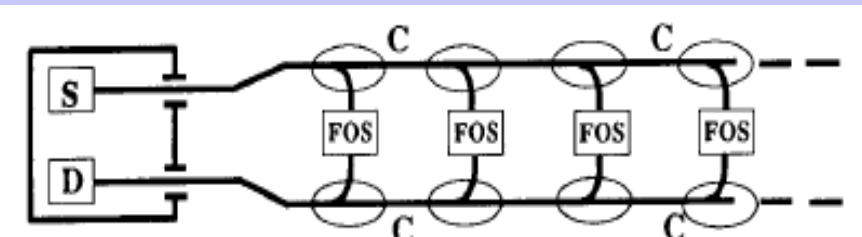
**Gwiazda** (wykorzystująca odbiciowe FOS)  
gdy w gwiazdzie jeden lub parę FOS zastąpi się przez oddzielne sieci typu gwiazda – uzyskuje się topologię sieci



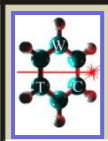
**Drzewo**



**Gwiazda** (wykorzystująca FOS transmisyjne)



**Drabina** (FOS transmisyjne)

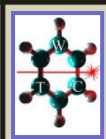


## Kryteria wyboru topologii:

- typ czujnika, zasady dekodowania sygnału, użyteczność danej topologii,
- proponowany schemat zwielokrotnienia, wymagana liczba czujników, budżet mocy,
- dopuszczalny poziom przesłuchów,
- cena systemu i jego złożoność konstrukcyjna,
- niezawodność, tzn. wpływ uszkodzenia elementu na własności całego systemu.

## Źródła szumu mające wpływ na sieć:

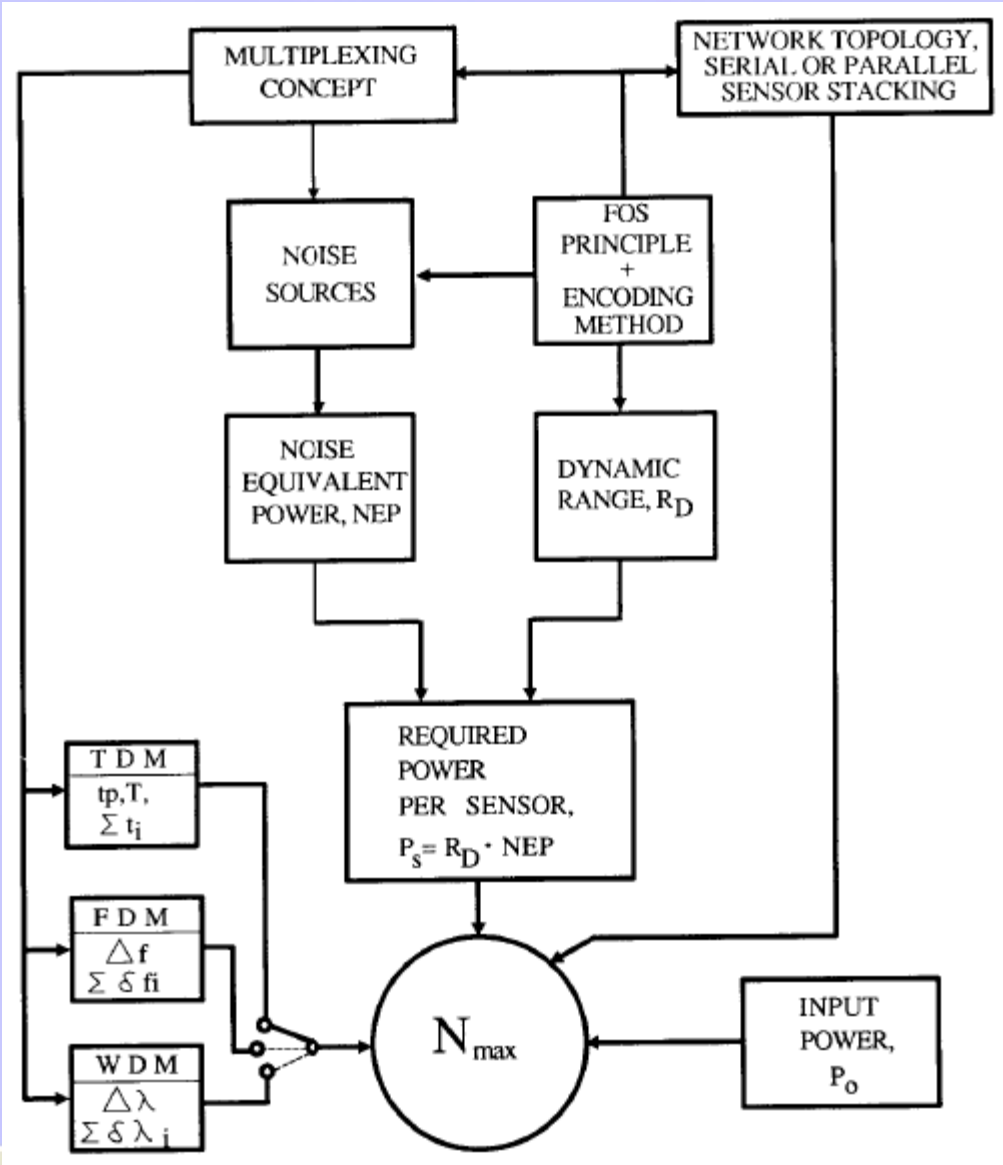
- szum amplitudowy diody laserowej,
- szum fazowy lub częstotliwościowy diody laserowej – liniowo rosnący wraz ze wzrostem różnicy ramion czujnika ( $\Delta L$ ), dla DL stabilizowanej częstotliwościowo  $<30\text{dB}$ ,
- dodatkowy szum źródła wynikający z jego niestabilnej pracy (np. indukowany przez rozproszenie wsteczne),
- szum śrutowy (lub kwantowy) detektora i wzmacniacza, szum  $1/f$ , szum termiczny (Johnson) odbiornika optycznego,
- szum losowy środowiska wynikły z wibracji,
- przesłuch pomiędzy kanałami (dla układów z 1% dokładnością musi być  $<-20\text{ dB}$ ),
- szum termodynamiczny wynikły z termodynamicznych fluktuacji we włóknie oraz innych elementach światłowodowych, etc. (rzędu  $10^{-6} - 10^{-5}\text{ rad}/\text{Sqrt}(\text{Hz})$ ),



Maksymalna liczba czujników  $N_{\max}$  uzależniona jest od:

- mocy wejściowej  $P_o$ ,
- budżetu mocy systemu stanowiącego niezbędny element dla określenia zapasu mocy  $P_s$  każdego czujnika umożliwiającej osiągnięcie przez niego zakładanego zakresu dynamiki,
- przyjęty schemat zwielokrotnienia,
- globalne szумы systemu.

**Fig.4** Zależności pomiędzy różnymi charakterystykami sieci, które determinują maksymalną liczbę FOS





## Zwielokrotnienie niekoherentne

Możliwa jest budowa systemu N czujnikowego, każdy z oddzielnym we- i wy- światłowodowym w topologii prostej sieci z wykorzystaniem wspólnego źródła i macierzy detektorów lub wieloma źródłami i wspólnym detektorem.

### Zwielokrotnienie z podziałem przestrzennym - SDM (spatial-division multiplexing)

Topologia wykorzystująca światłowody 1-N rozgałęziacz lub n-1 sprzęgacz celem synchronicznego przełączania pomiędzy N włókami umożliwiającą stosowanie pojedynczego źródła lub detektora. Pomimo, iż każdy FOS ma oddzielne łącze światłowodowe zaletą SDM jest brak przesłuchów.

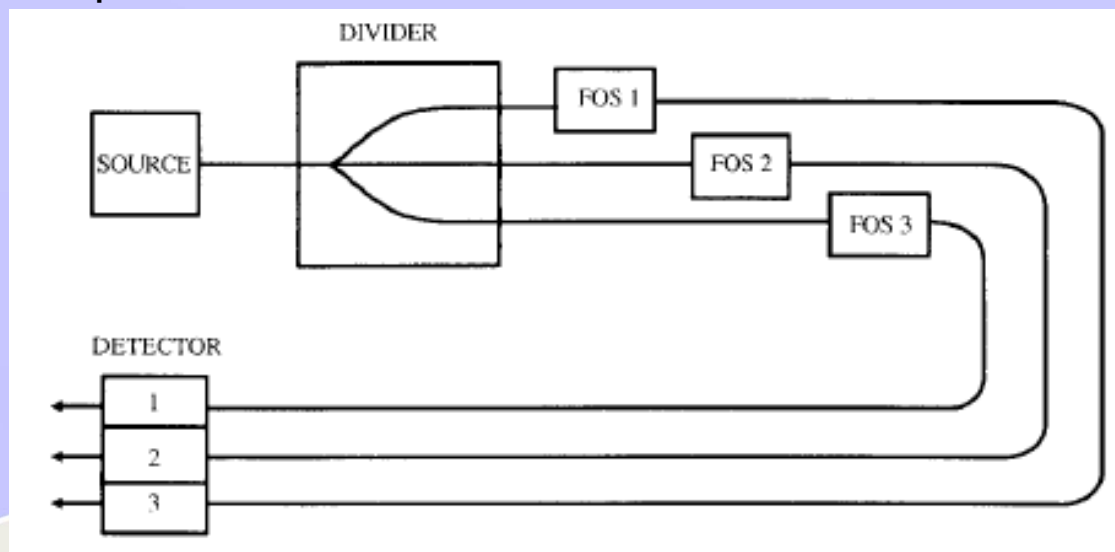
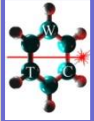


Fig. 5. Zasada działania sieci z SDM





## Zwielokrotnienie z podziałem czasowym - TDM (time-division multiplexing)

Multipleksja czasowa polega na kolejnym w czasie adresowaniu sensorów. Każdy kanał otrzymuje cyklicznie pełne pasmo łącza, ale w ograniczonym odcinku czasu. Stosuje się przełączanie elektro-optyczne lub elektro-mechaniczne. Zaletą TDM jest brak przesłuchów, zaś wadą krótki czas monitorowania pojedynczego sensora.

Pojedynczy impuls wejściowy odbierany jest jako szereg impulsów wyjściowych uzyskanych przy odbiciu na kolejnych sensorach. Echo z najdalszego sensora wraca w czasie pojedynczej repetycji impulsu, a odległość sensorów musi być taka aby można było rozdzielić „echa”.



Zastosowanie przełącznika światłowodowego pozwala na realizację TDM w topologii gwiazdy.

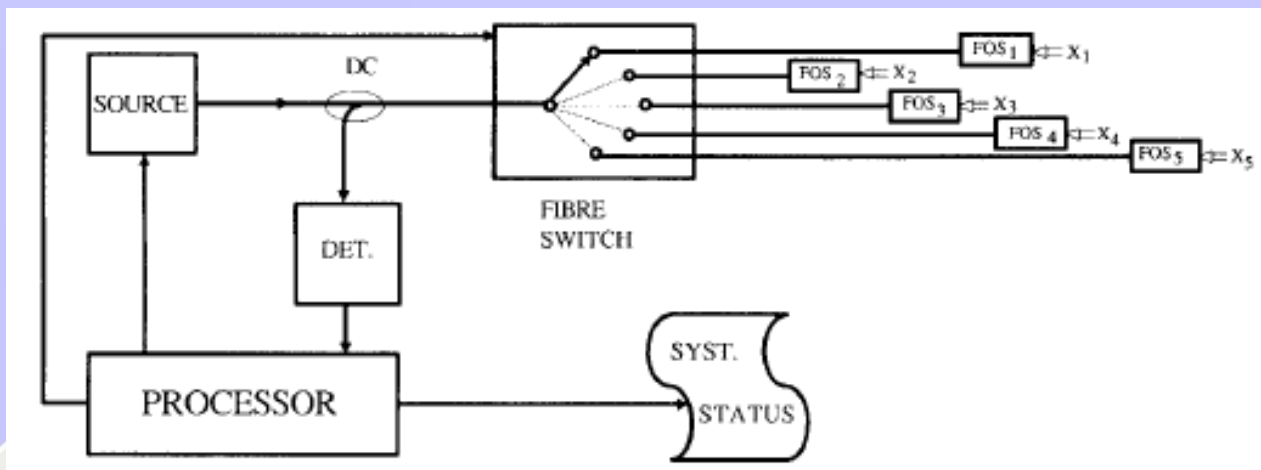


Fig. 7. Zasada działania sieci z TDM w topologii gwiazdy

## Pomiar refraktometryczny - OTDR (optical time-domain reflectometry)

Pomiar refraktometryczny opiera się na analizie mocy rozproszenia wstecznego w funkcji czasu (odległości od miejsca pomiaru).

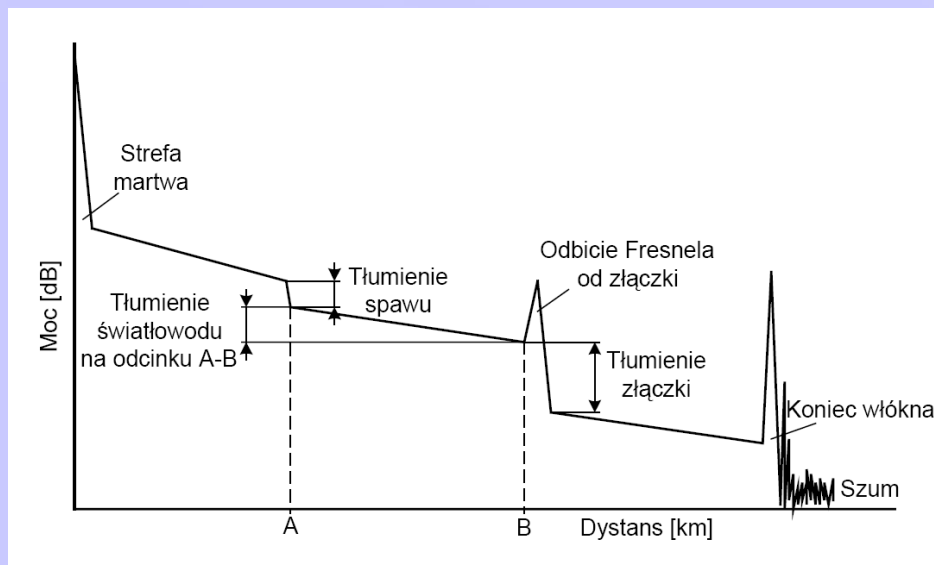
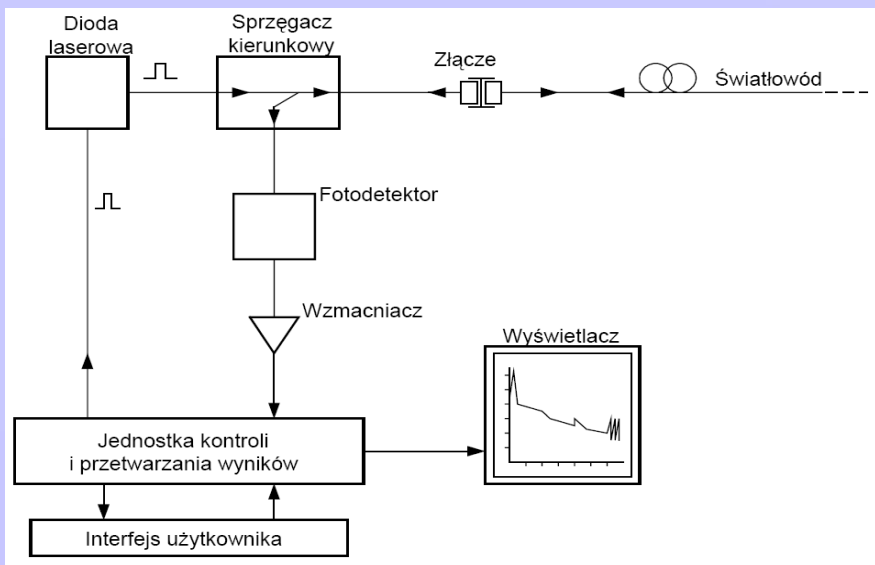


Fig. 8. przykładowa krzywa refraktometryczna i schemat refraktometru

$$P_b(t) = (P_0 S \alpha_s W v / 2) \exp \{ - 2 \alpha (vt / 2) \}$$

$P_b$ -rozproszona wstecznie moc Rayleigha,  $P_0$ -szczytowa moc impulsu optycznego,  $S$ - współczynnik przechwyty wstępnie rozproszonej mocy Rayleigha do włókna,  $\alpha_s$ - współczynnik tłumienia mocy optycznej wywołany rozpraszaniem Rayleigha,  $v$ - szybkość impulsu światła we włóknie,  $\alpha(vt/2)$ - tłumienie całkowite na odległości  $vt/2$  [w neperach],  $t$ - czas,  $W$ - długość impulsu [w jednostkach czasu]

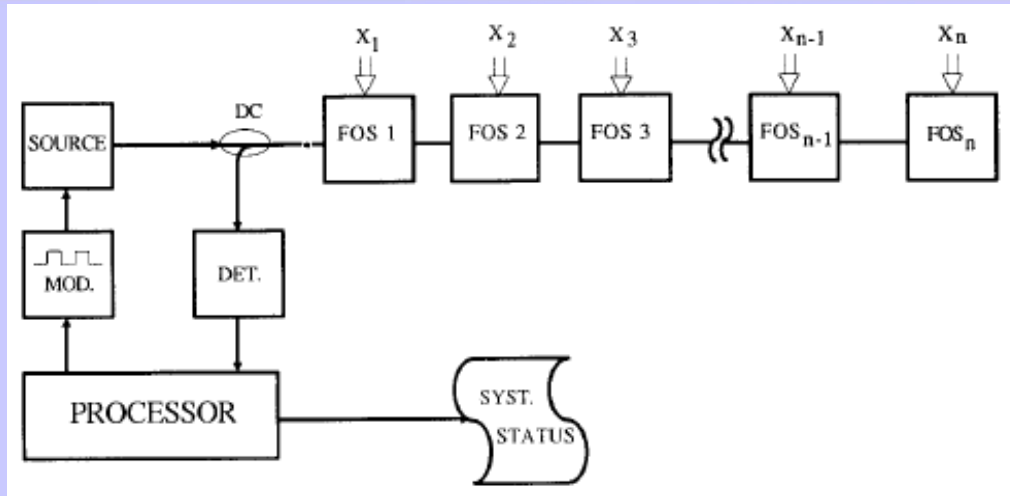
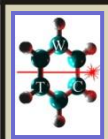


Fig. 9. Macierz liniowa absorpcyjnych FOS z adresowaniem przez system OTDR

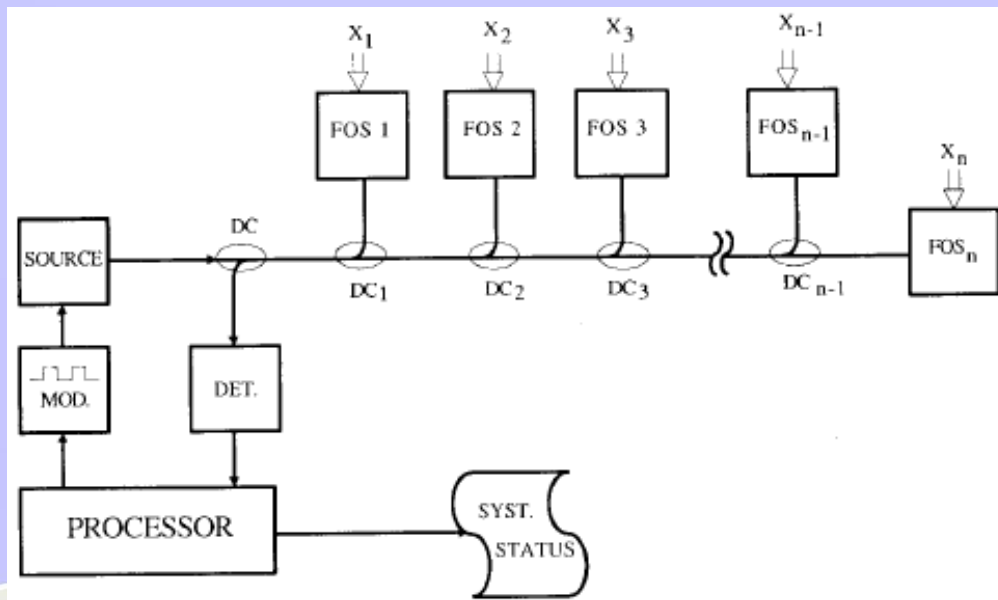


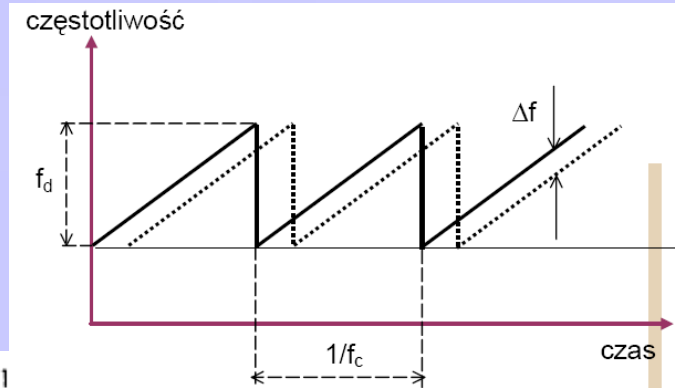
Fig. 10. Macierz liniowa odbiciowych FOS z adresowaniem przez system OTDR



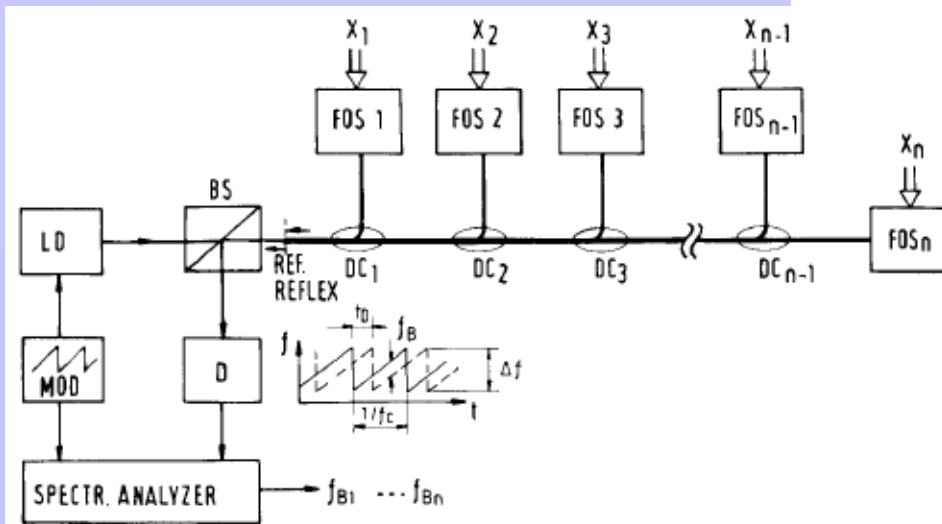
## Reflektometria optyczna w dziedzinie częstotliwości - OFDR (Optical frequency-domain reflectometry)

Wprowadzony do układu impuls świetlny ma zmienną w czasie częstotliwość, co osiąga się przez zmiany prądu zasilania lasera półprzewodnikowego. Światło rozproszone wstecznie będzie miało inną częstotliwość niż sygnał wprowadzony

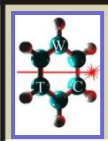
**Fig. 11.** Zależność czasowa częstotliwości w układzie OFDR:  
 $f_D$  – max różnica częstotliwości prom we,  $f_c$  – repetycja modulacji częstotliwości,  $\Delta f$  – zamieniona na pomiar częstotliwości dudnienia „mora” elektroniczna



Zaletą jest lepsza rozdzielczość niż w OTDR



**Fig. 12.** Macierz liniowa czujnika reflektometrycznego działającego jako OFDR:  $t_D$  – opóźnienie czasowe,  $1/f_c$  okres repetycji,  $f_B$  – częstotliwość dudnień



## Zwielokrotnienie z podziałem częstotliwości - FDM (frequency-division multiplexing)

W zwielokrotnianiu częstotliwościowym FDM pasmo przepustowe łącza jest przez cały czas dzielone pomiędzy kanały (każdy kanał otrzymuje dostęp do części pasma, do jednej częstotliwości w obrębie pasma). Zwielokrotnianie częstotliwościowe jest techniką analogową, wymagającą zastosowania konwersji analogowo-cyfrowej w celu wytworzenia ciągu impulsów zasilających źródło promieniowania świetlnego.

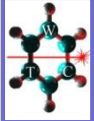
Zalety FDM to: wysoka czułość, mniejsza moc, wąskie pasmo przenoszenia układu detekcyjnego, zaś zasadnicze wady FDM: wymagane jest źródło o bardzo dużej drodze koherencji.

Istnieją dwie odmiany tej metody:

- **zwielokrotnienie z podziałem częstotliwości podnośnych – SFDM**  
(subcarrier frequency-domain multiplexing),
- **zwielokrotnienie z optycznym odkodowaniem częstotliwości - OFEM**  
(optical frequency-encoded multiplexing).

**Technika OFEM** jest dobrze opanowana w konwencjonalnych czujnikach np. zależnych temperaturowo, sterowanych mechanicznie elementach oscylatora kwarcowego.

Zasadniczą zaletą OFEM jest niezależność amplitudy sygnału, a co za tym idzie dobra liniowość odpowiedzi.



## Zwielokrotnienie z podziałem częstotliwości podnośnych – SFDM (subcarrier frequency-domain multiplexing)

Polega na zastosowaniu N natężeniowo zakodowanych odbiciowych lub transmisyjnych FOS na N różnych częstotliwościach. Dla przykładu poniżej, sygnał dostarczany przez sieć jest:

$$U_{Di} = \sum_{k=1}^3 A_k \exp(j\phi_{ik})$$

gdzie:  $A_k$  i  $\phi_{ik} = 2\omega_i L_k / v_g$  – amplitudy i fazy k-tego FOS,  $L_k$  - lokalizacja czujnika,  $v_g$  – prędkość grupowa światła, Składowa rzeczywista  $U_{Di}$ :  $R_i = \sum_{k=1}^3 A_k \cos \phi_{ik}$  jest w fazie z nośną sygnału modulującego i określana przez wz. Lock-in.

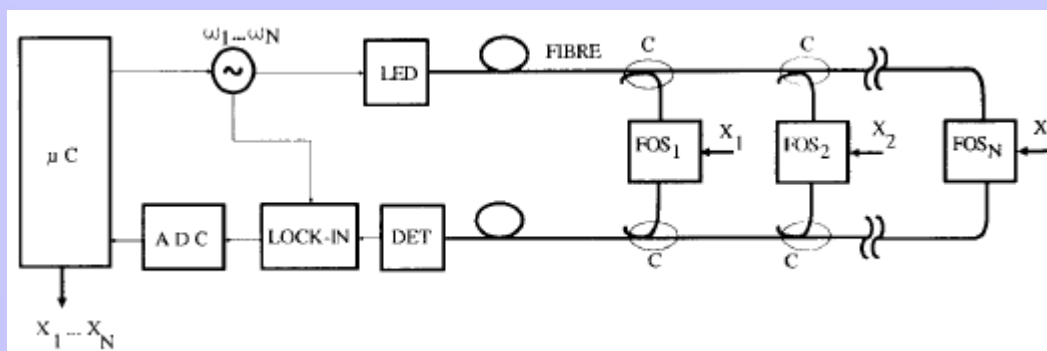


Fig. 13. FOS w topologii drabina z SFDM

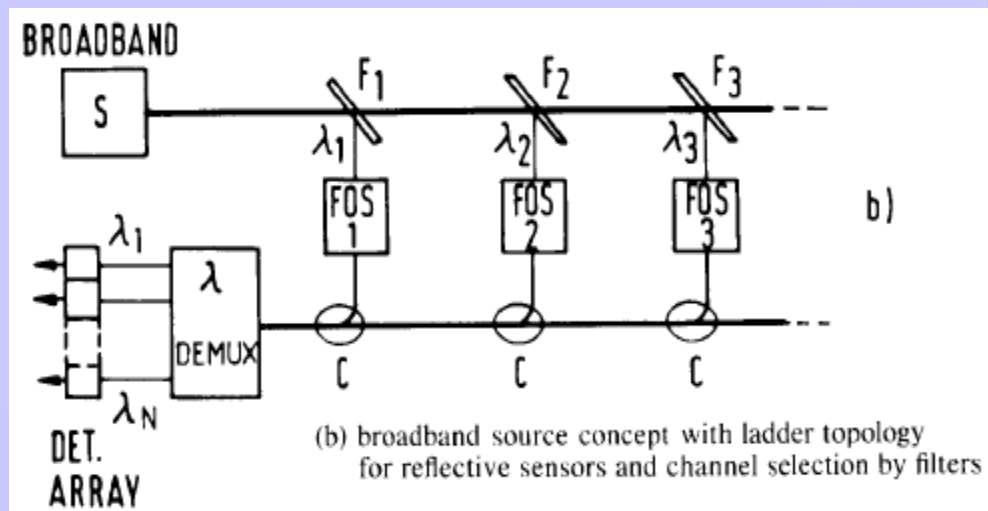
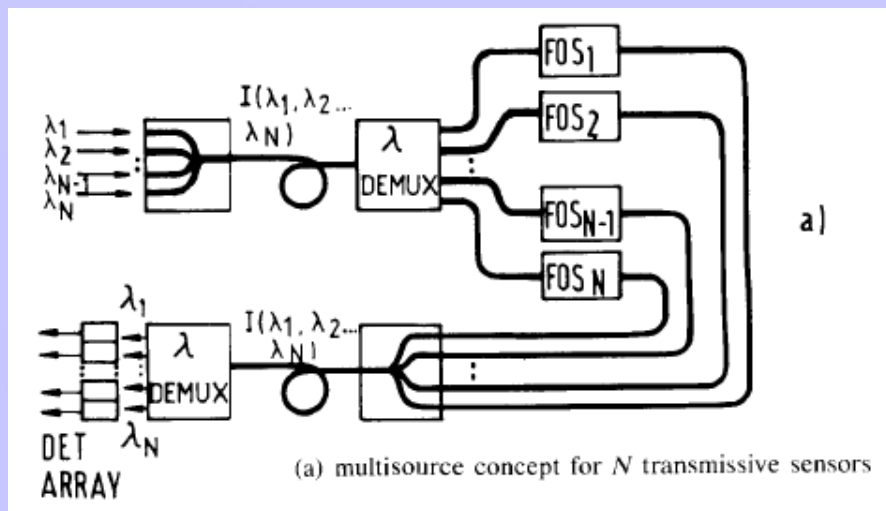
Amplitudy  $A_k$  zależne od mierzonej wielkości  $X_k$  ze względu na pracę układu na N różnych częstotliwościach wyznaczone są z układu N równań liniowych na  $R_i$ .

System ten może być przydatny dla układu zawierających do 10 natężeniowo kodowanych FOS, jednakże błąd metody uzależniony jest od liniowości elektroniki, ponadto straty linii mogą powodować zaburzenia wyznaczenia  $A_k$ .

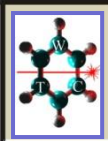


## Zwielokrotnienie z podziałem długości fali - WDM (wavelength-division multiplexing)

Od strony koncepcyjnej WDM jest takim samym rodzajem zwielokrotniania co FDM (różnym kanałom przypisywane różne pasma częstotliwości), ale będącym procesem czysto optycznym. W technice WDM poszczególne źródła promieniowania emitują promieniowanie o różnych długościach fal, a w odbiorniku filtr optyczny wydziela z całego widma właściwą długość fali.



**Fig. 14.** WDM dla FOS:  $F_1, F_2, F_3$  –elementy dyspersyjne kierujące każde  $\lambda_i$  do właściwego detektora



## Zwielokrotnienie czujników interferencyjnych

Stosowane jest w czujnikach interferencyjnych (IFOS), o ogólnej postaci funkcji przenoszenia:

$$I_D = p(1 + V_F \cos \phi_A(t))$$

Demodulacja sygnału może być dokonana poprzez aktywne schematy takie jak aktywne homodynowanie lub heterodynowanie, w których to elektrycznie sterowany modulator fazy lub częstotliwości umieszczony jest w ramieniu odniesienia.

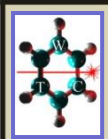
Adresowanie pasywne i demodulacja w sieciach IFOS wymaga procedur 2-stopniowych, które zabezpieczają dużą dynamikę, niski przesłuch, dużą liczbę czujników. Pierwszym etapem jest technika demodulacji pozwalająca na odzyskanie informacji fazowej, gdzie zasadniczo rozróżnia (omówione uprzednio) demodulację:

- interferometrii różnicowej z dopasowaniem dróg – **PMDI (path-matched differential interferometry)**.
- nośnej generowanej fazowo - **PGC (phase-generated carrier)**,

Drugim etapem są techniki sieciowa obejmujące:

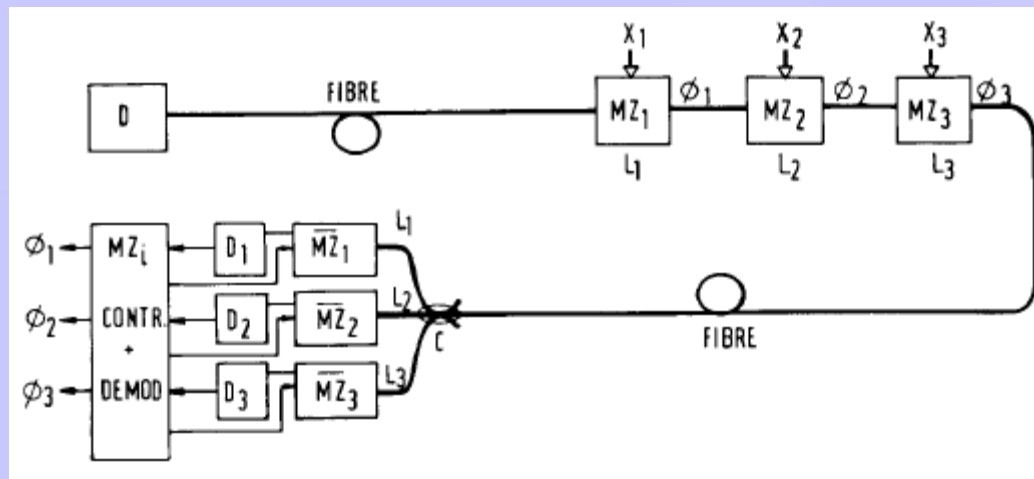
- zwielokrotnienie koherentne **CM – (coherence multiplexing)** bazująca na PMDI,
- **TDM z demodulacją PGC**,
- **TDM z demodulacją PMDI**,
- **FDM z demodulacją PGC** oraz
- **metoda FMCW**.





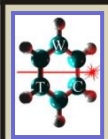
## Zwielokrotnienie koherentne - CM (coherence multiplexing)

Technika **PMDI** jest podstawą do sieciowania IFOS metodą CM. Pozwala ona na jednoczesną demodulację macierzy IFOS z równą liczbą interferometrów odbiorczych, z których każdy ma własny detektor i oddzielny kontroler (zbudowany na bazie światłowodowego ściskacza pzt).

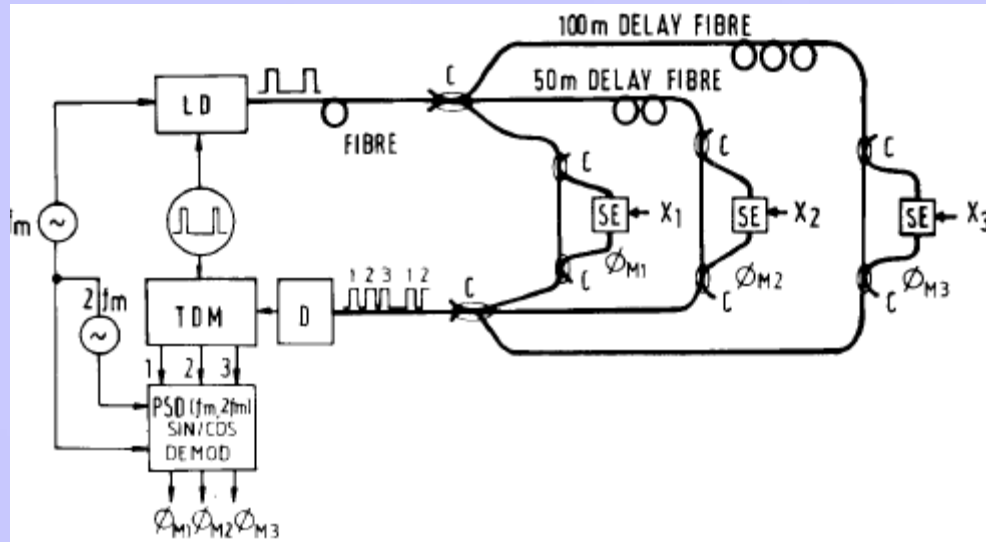


**Fig. 15.** CM macierzy szeregowej trzech M-Z IFOS

Jest to dobra technika dla małej liczby IFOS. Ponieważ zasadniczo dla jednego IFOS PMDI daje cztery człony sygnałowe, zatem przy wzroście IFOS „wyrażenia” te mogą działać jak źródła szumu natężeniowego zmniejszając czułość układu. Użycie LED lub SLD zmniejsza problem ale wymaga dokładniejszego zbalansowania dróg optycznych.



## Technika Nośnej Generowanej Fazowo (PGC) z TDM



**Fig. 16.** TDM trzech M-Z IFOS w topologii drabiny z zastosowaniem PGC i bramkowaniem sygnałów opóźniających

LD modulowana jest sygnałem sinusoidalnym tak by otrzymać na wyjściach IFOS różnicę fazową. Przy czym sygnał z LD i wejście na detektor są bramkowane, celem selekcji sygnałów interferencyjnych na bazie różnego opóźnienia ich propagacji przez sieć. Budżet mocy pokazuje, iż tą techniką można multipleksować do 30 IFOS

Technika Interferometrii Różnicowej z Dopasowaniem dróg (PMDI) z TDM

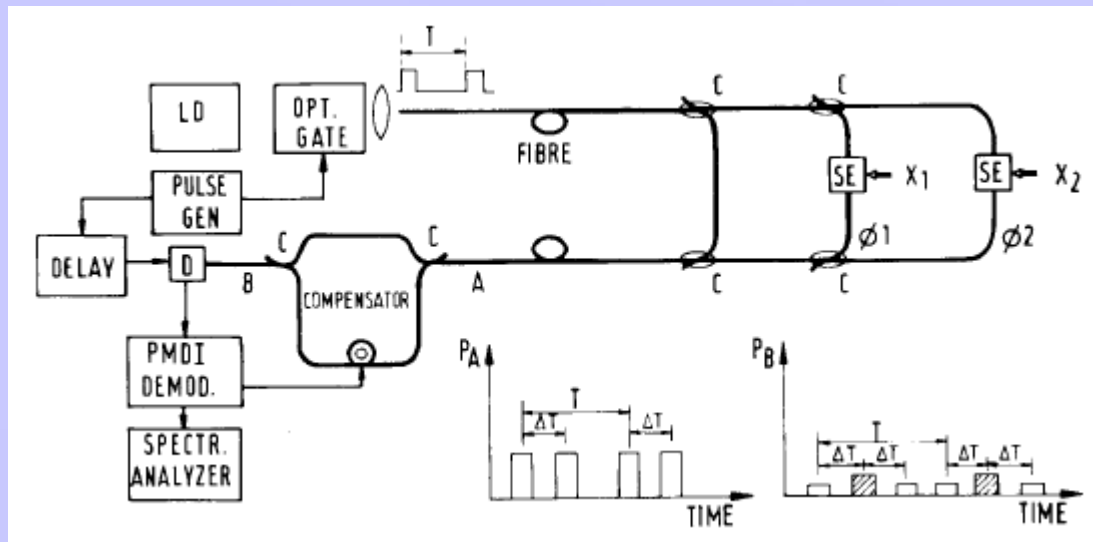
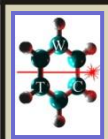


Fig. 17. Dwa M-Z IFOS w topologii drabiny z zastosowaniem PMDI-TDM

Krótki impuls z czasem repetycji  $T$  wytworzony za pomocą komórki Bragga po przejściu przez układ w każdym interferometrze (pkt. A) dzieli się na dwa impulsy ze względu na duże niezbalansowanie  $\Delta L$  dostarczając separacji czasowej  $\Delta T = n\Delta L/c$  większej od szerokości impulsu. Na wyjściu interferometru kompensującego (pkt. B), każdy początkowy impuls jest podzielony na 4: 1- dwie krótkie, 2- krótki-długo, 3- długo krótki, 4 – dwie długie drogi optyczne. Jeśli droga w kompensatorze jest przestrajana na kompensację różnicy dróg IFOS, sygnały 2, 3 - przenoszą sygnał interferencyjny. Optymalna jest prędkość próbkowania na detektorze  $T = 2\Delta T$ . Obok przejścia w dziedzinę czasową, usuwane są zaburzenia istniejące z niezbalansowanych dróg optycznych.



### Technika PGC-FDM

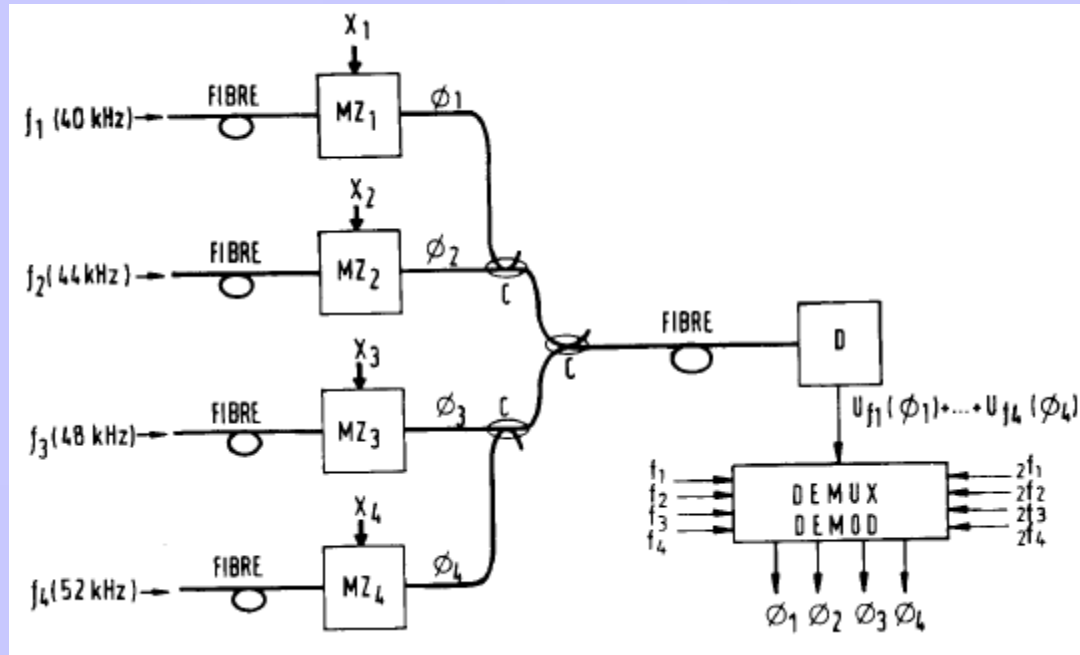
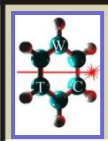


Fig. 18. Cztery M-Z IFOS w topologii drzewa z zastosowaniem PGC-FDM

W tym wypadku każdy z niezbalansowanych IFOS może być usytuowany w równoległej konfiguracji zasilanej laserem zmodulowanym na wybranej częstotliwości. DC kieruje sygnał na elektroniczny demultiplekser, stosujący detekcję czułą fazowo dla utworzenia sygnału na wybranych częstotliwościach za pomocą techniki PGC. Ze względu na bilans mocy technika ta pozwala na multipleksuje kilkuset IFOS.



## Zmodulowana częstotliwościowo fala ciągła - FMCW (frequency-modulated continuous wave)

Literaturowo FMCW oznacza, iż częstotliwość źródła optycznego narasta liniowo „piłokształtnie”. Podstawy są podobne do koncepcji OFDR dając zdudnienie pomiędzy dwoma sygnałami, które są wzajemnie opóźnione o czas  $\tau=L/c$  dostarczany przez niedopasowanie dróg  $L$  w IFOS. Częstotliwość zdudnień  $f_B=\Delta f\tau$ , gdzie  $\Delta f$  to wysokość piły, zaś  $f_r$  jej częstotliwość.

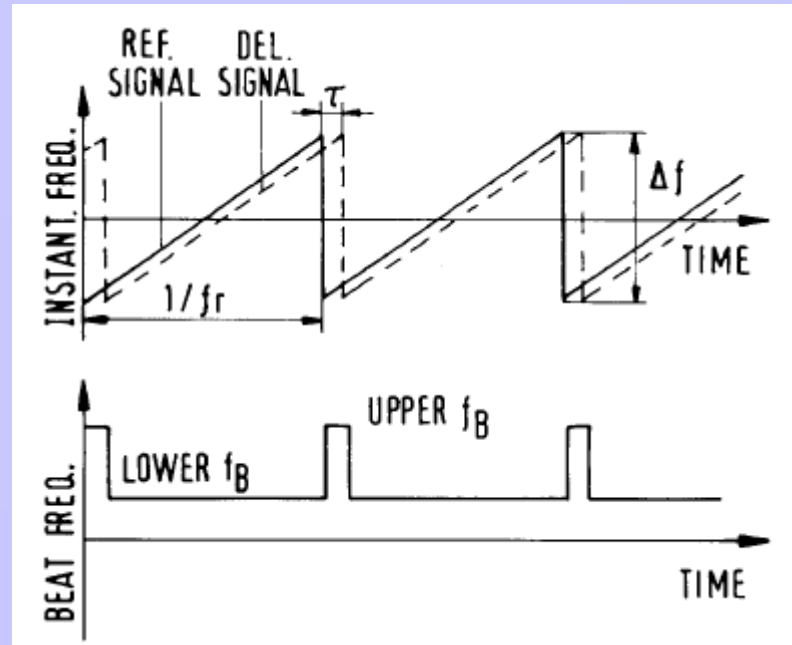
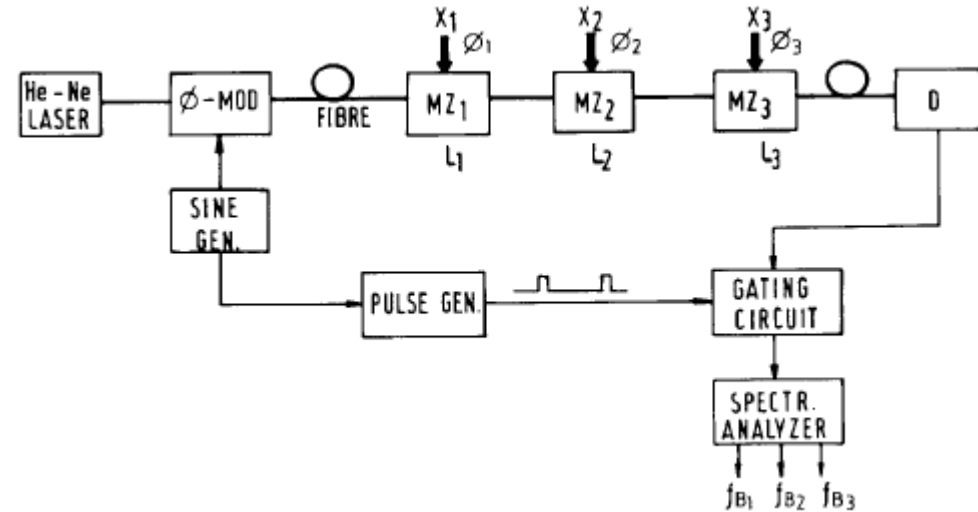
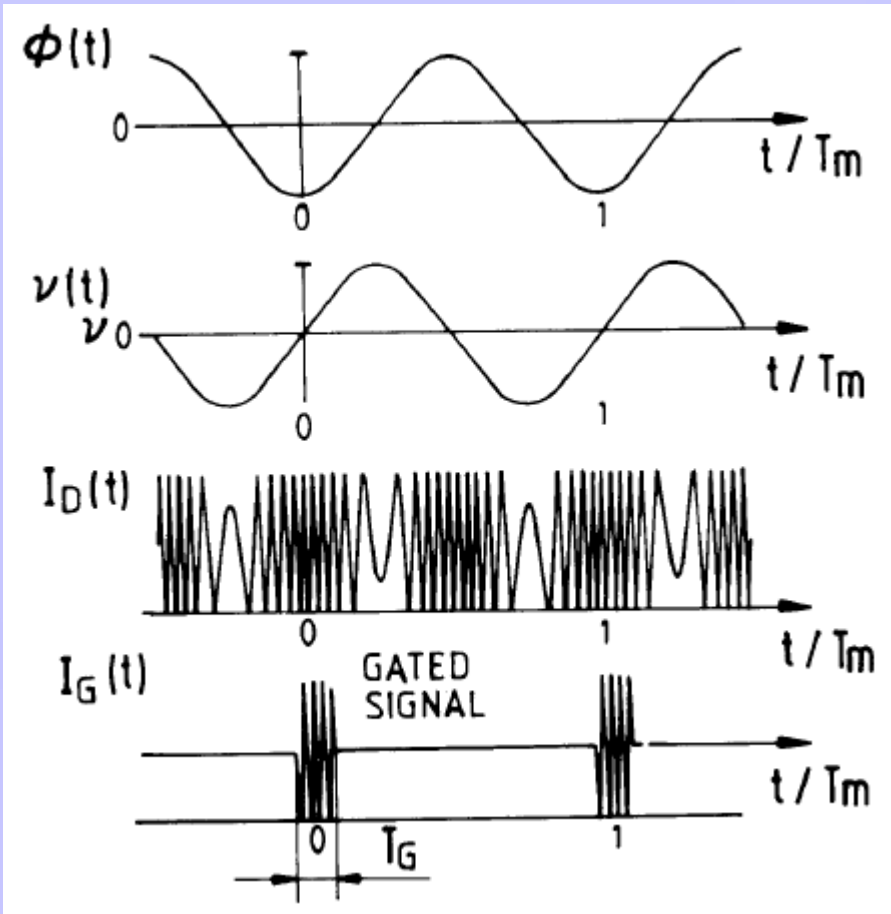


Fig. 19. Zasada działania FMCW



FMCW z ominięciem bezpośredniej modulacji LD – problemy z koherencją źródła w topologii sieciowej można zastosować sinusoidalną modulację częstotliwości źródła (laser gazowy) za pomocą modulatora PZT.



**Fig. 20.** Zasada działania FMCW z modulacją sinusoidalną oraz bramkowaniem sygnału wraz z jej układową implementacją

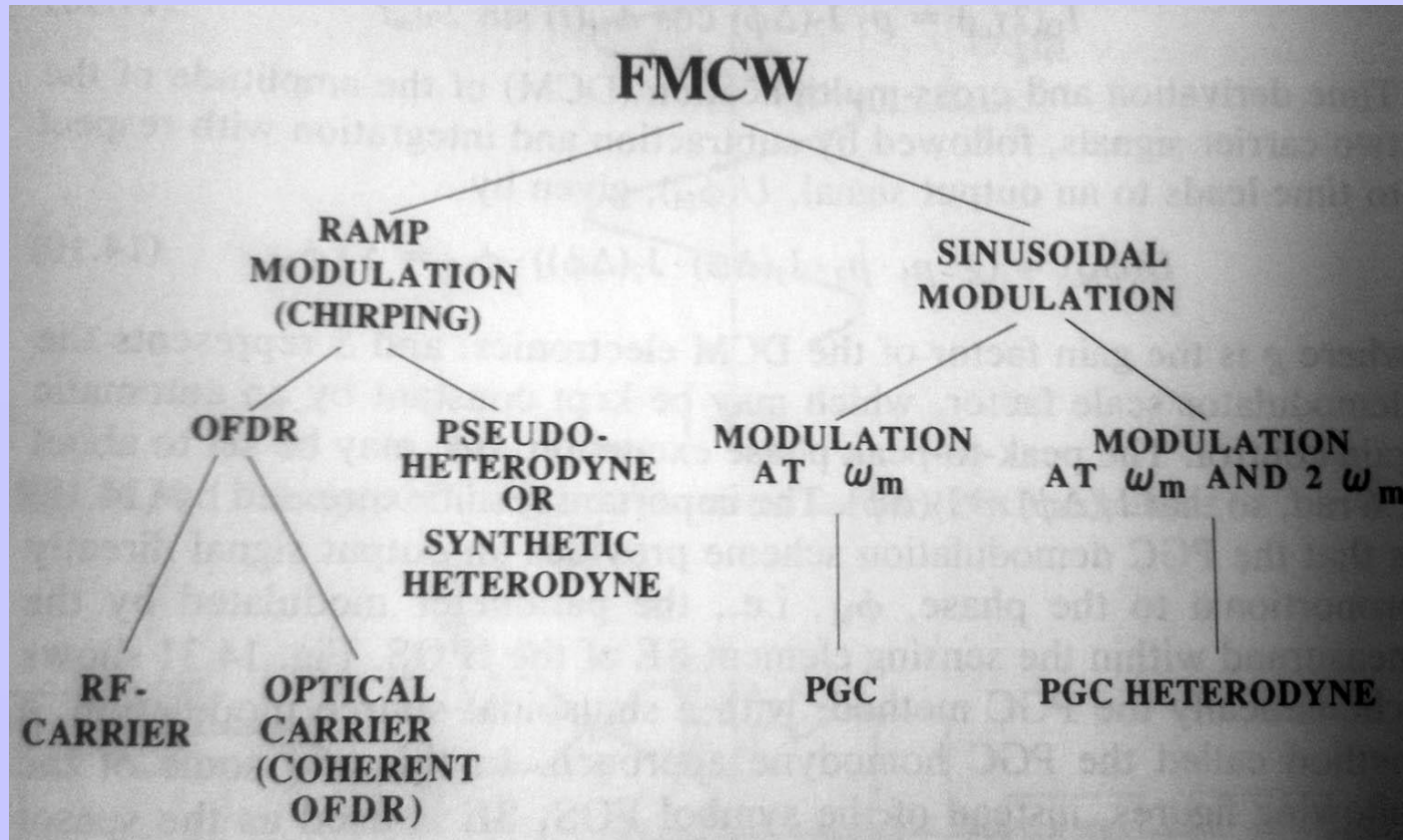
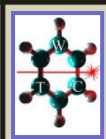


Fig. 21. Schemat hierarchiczny różnych technik FMCW