



# TELEKOMUNIKACJA OPTOFALOWA

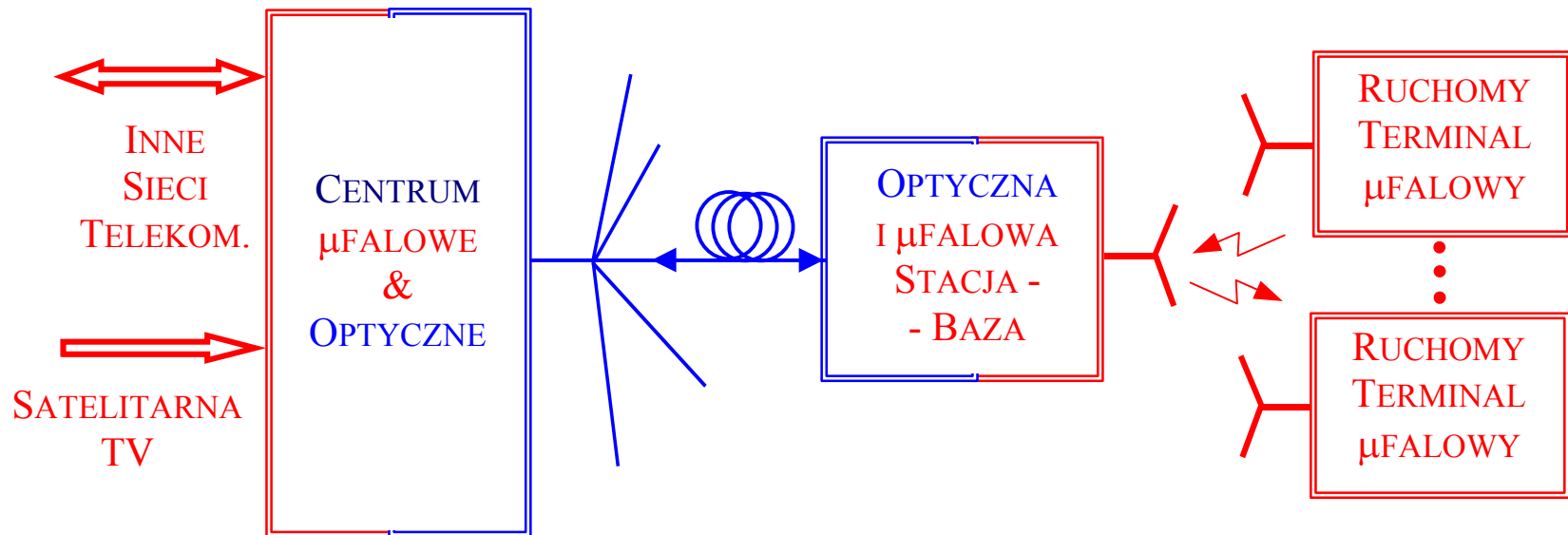
## 14. Systemy radiowo-światłowodowe

### *Spis treści:*

1. Wprowadzenie
2. Transmisja sygnałów mikrofalowych
3. Optyczna generacja sygnałów mikrofalowych
4. Systemy radiowo-światłowodowe – przykłady
5. Fotonika w technice radarowej
6. Podsumowanie

## 1. WPROWADZENIE – IDEA SIECI RADIOWO-OPTYCZNEJ

- ◆ Stałe dążenie do coraz większych prędkości transmisji informacji w telekomunikacji radiowej tworzy nacisk na wykorzystanie pasm fal milimetrowych.
- ◆ Pasma fal milimetrowych (25 GHz, 34 GHz, 43 GHz, 60 GHz) nie zapewniają dużych zasięgów - tłumienie w atmosferze. Jednakże problemem jest połączenie Stacji-Bazy z Centrum, gdyż ani linia współosiowa, ani falowody nie mogą być ze względu na tłumienie wykorzystane.
- ◆ Powstała idea wykorzystania do tego celu łącza światłowodowego. Łącze takie winno służyć do:
  - transmisji informacji,
  - transmisji fali nośnej (informacji o jej częstotliwości).

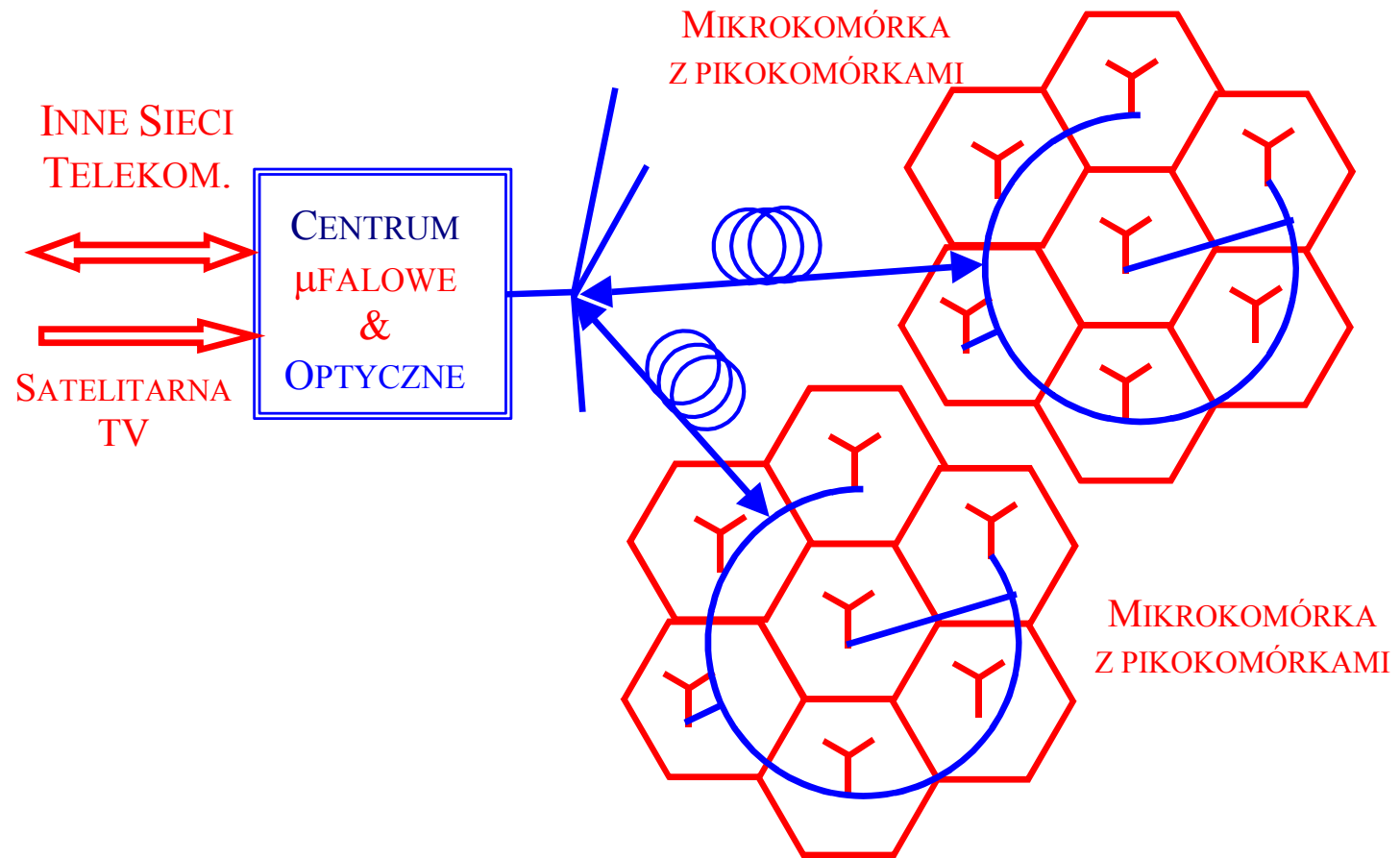


Rys.14.1. Struktura ideowa telekomunikacyjnego systemu radiowo-optycznego

# 1. WPROWADZENIE – STRUKTURA SIECI RADIOWO-ŚWIATŁOWODOWEJ

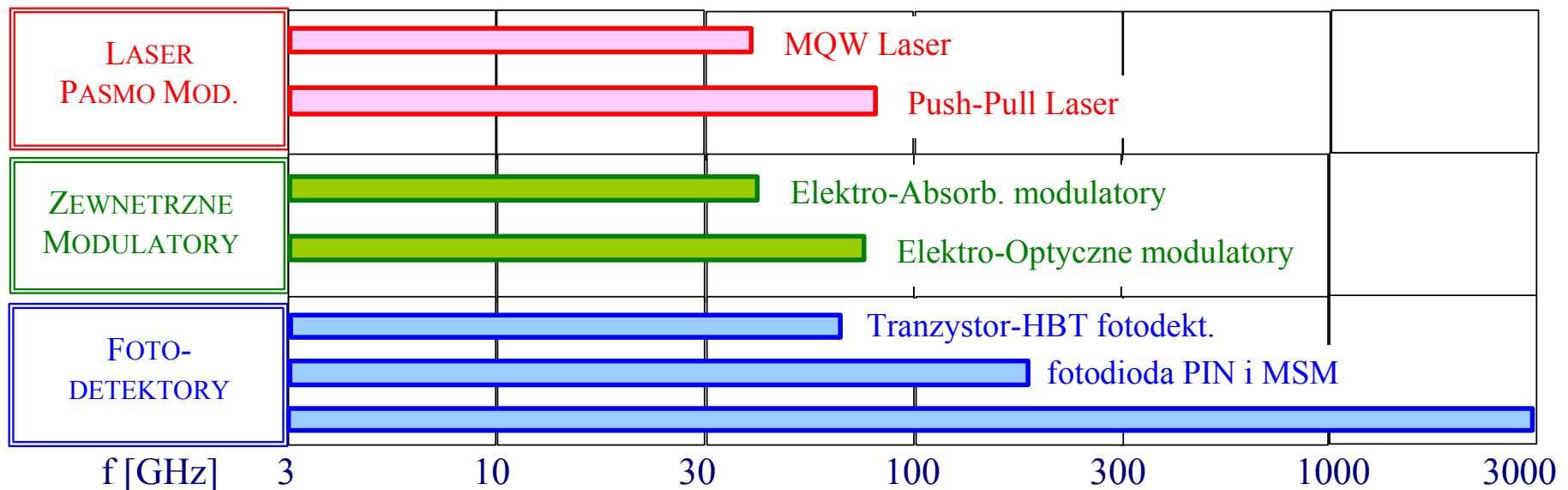
- ◆ Złożone struktury zawierają mikrokomórki połączone światłowodami ze stacją centralną.
- ◆ Ze względu na mały zasięg łączy na fale milimetrowe komórki dzieli się na pikokomórki.
- ◆ W każdej pikokomórce znajduje się jedna antena nadawczo odbiorcza transmitująca do i odbierająca od terminali informacje drogą radiową.

Rys.14.2. Sieć radiowo-światłowodowa z mikrokomórkami podzielonymi na elementarne pikokomórki. Częstotliwości nośne w pikokomórkach są różne.



## 1. WPROWADZENIE – PASMA MODULACJI I DETEKCCI

- ◆ Wykorzystanie łączy światłowodowych do transmisji fali nośnej pasm milimetrowych wymaga dużych prędkości modulacji i detekcji, tworzy to określone trudności.
- ◆ Najlepiej dają sobie radę fotodetektory diodowe PIN i MSM, fototranzystory ciągle są rozwijane i niedorozwinięte.
- ◆ Bardzo pomocnym stał się proces mieszania optycznego dwóch sygnałów optycznych o różnej częstotliwości, umożliwiającą generację sygnałów w pasmach fal submilimetrowych do 3000 GHz.
- ◆ Ostateczne rozwiązania nie zostały jeszcze uzyskane.

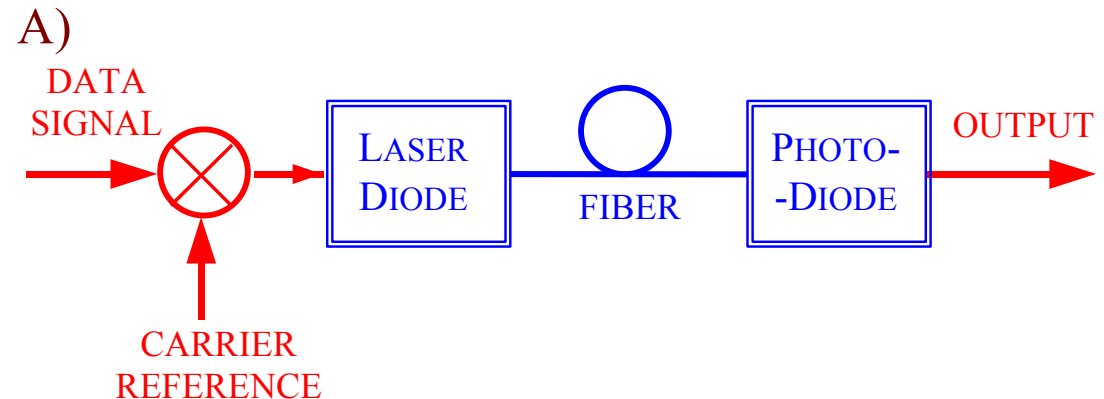


Rys.14.3. Porównanie szerokości pasm modulacji i detekcji.

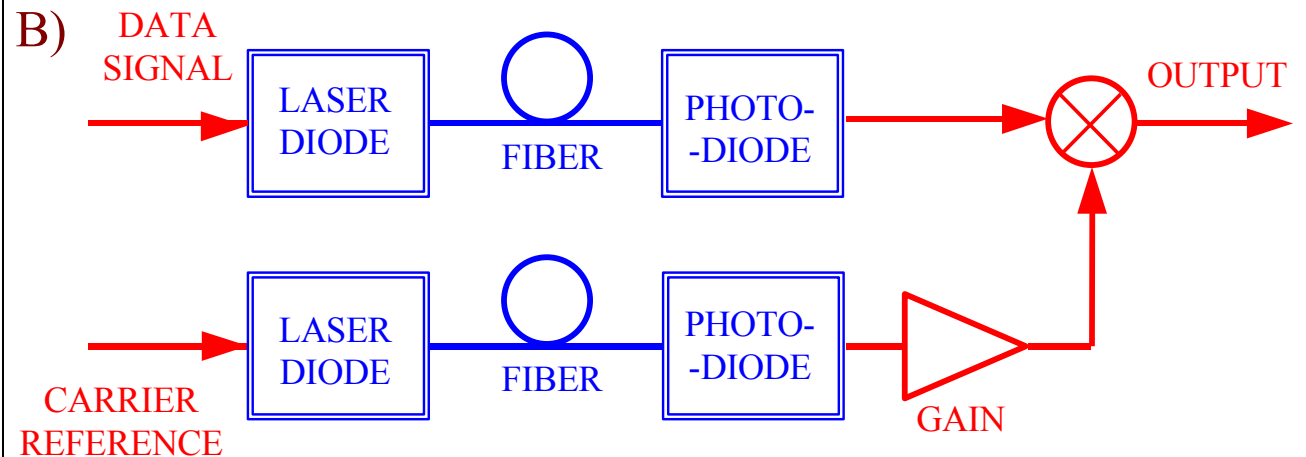
## 2. OPTYCZNA TRANSMISJA SYGNAŁÓW MIKROFALOWYCH – ROZWIĄZANIA A & B

- Struktury łącz optycznych do transmisji sygnałów mikrofalowych wykorzystują albo **bezpośrednią modulację laserów**, albo **zewnętrzną modulację nośnej**.

*Rys.14.4A. Konwencjonalne rozwiązanie; modulacja sygnału mikrofalowego ma miejsce przed nadajnikiem optycznym.*

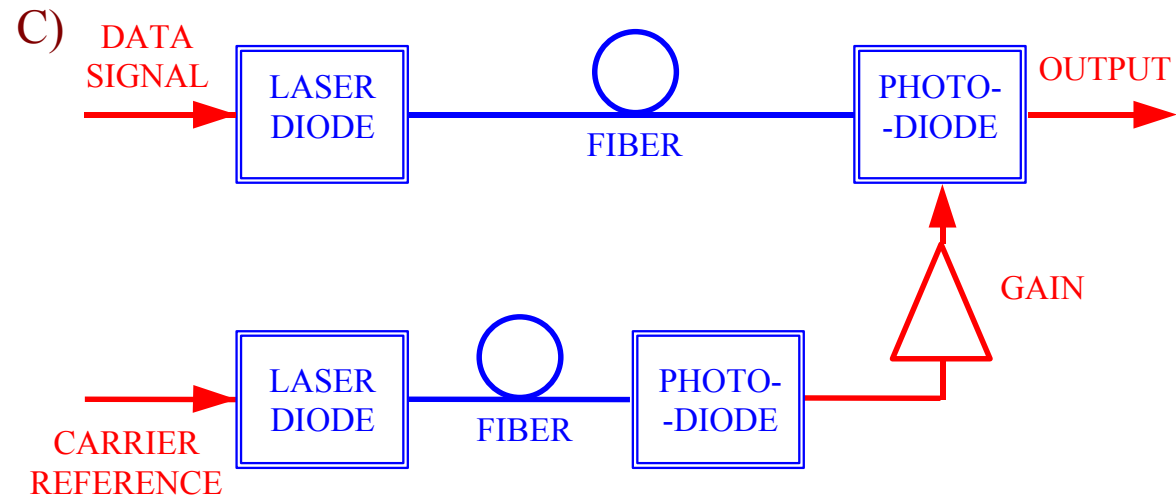


*Rys.14.4B. Sygnał i informacja transmitowane są oddzielnie różnymi światłowodami, modulacja ma miejsce po stronie odbiorczej.*

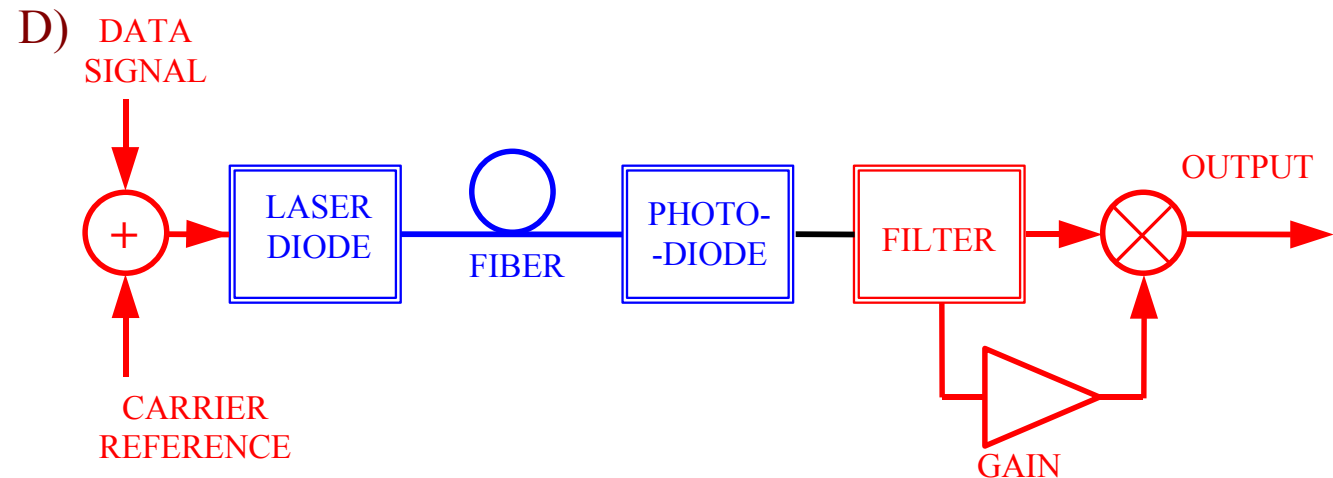


## 2. OPTYCZNA TRANSMISJA SYGNAŁÓW MIKROFALOWYCH – ROZWIĄZANIA C & D

Rys.14.4C. Fotodioda użyta jest jako mieszacz mikrofalowy, redukuje to liczbę elementów odbiornika.

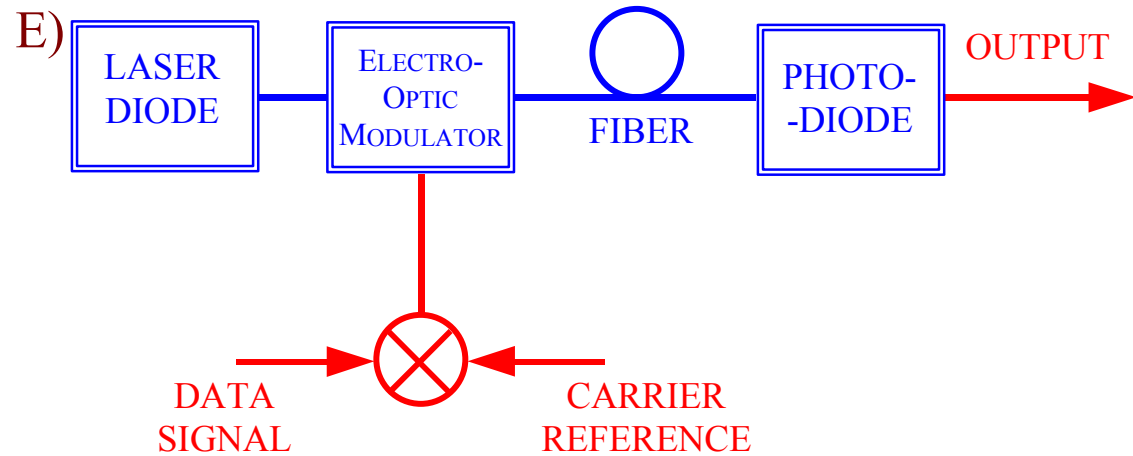


Rys.14.4D. Informacja i nośna transmitowane są razem bez modulacji. Po odfiltrowaniu i wzmocnieniu proces modulacji ma miejsce po stronie odbiorczej.

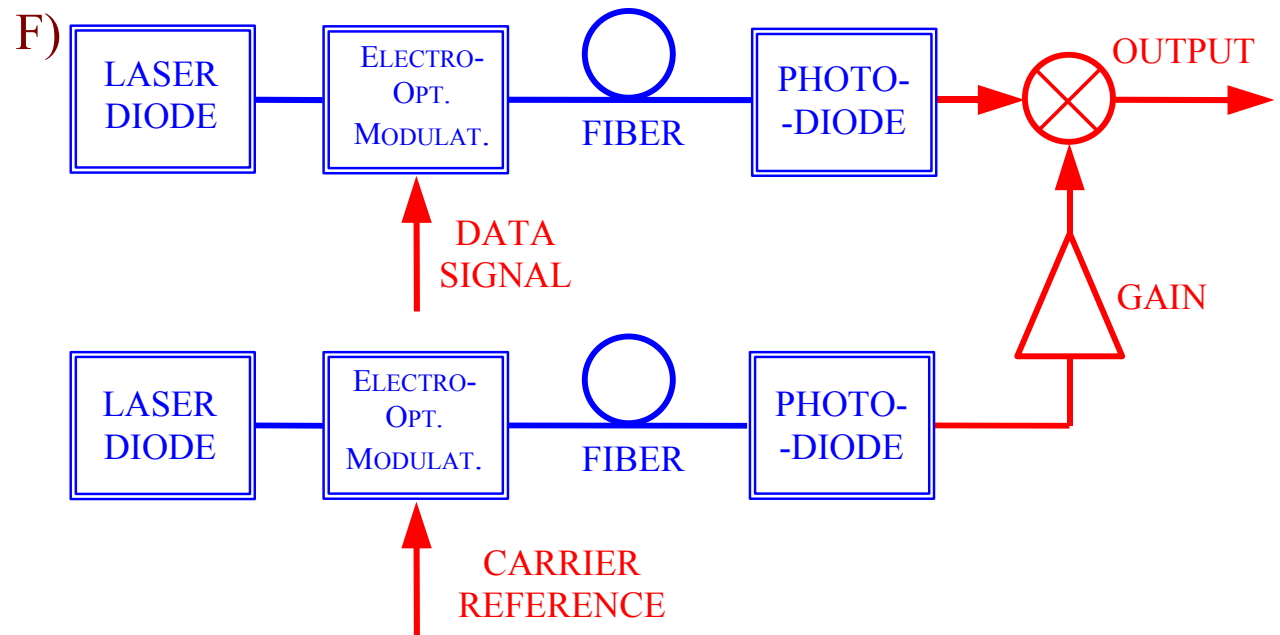


## 2. OPTYCZNA TRANSMISJA SYGNAŁÓW MIKROFALOWYCH – ROZWIĄZANIA E & F

Rys.14.4E. Łącze o strukturze konwencjonalnej, ale z modulatorem zewnętrznym.

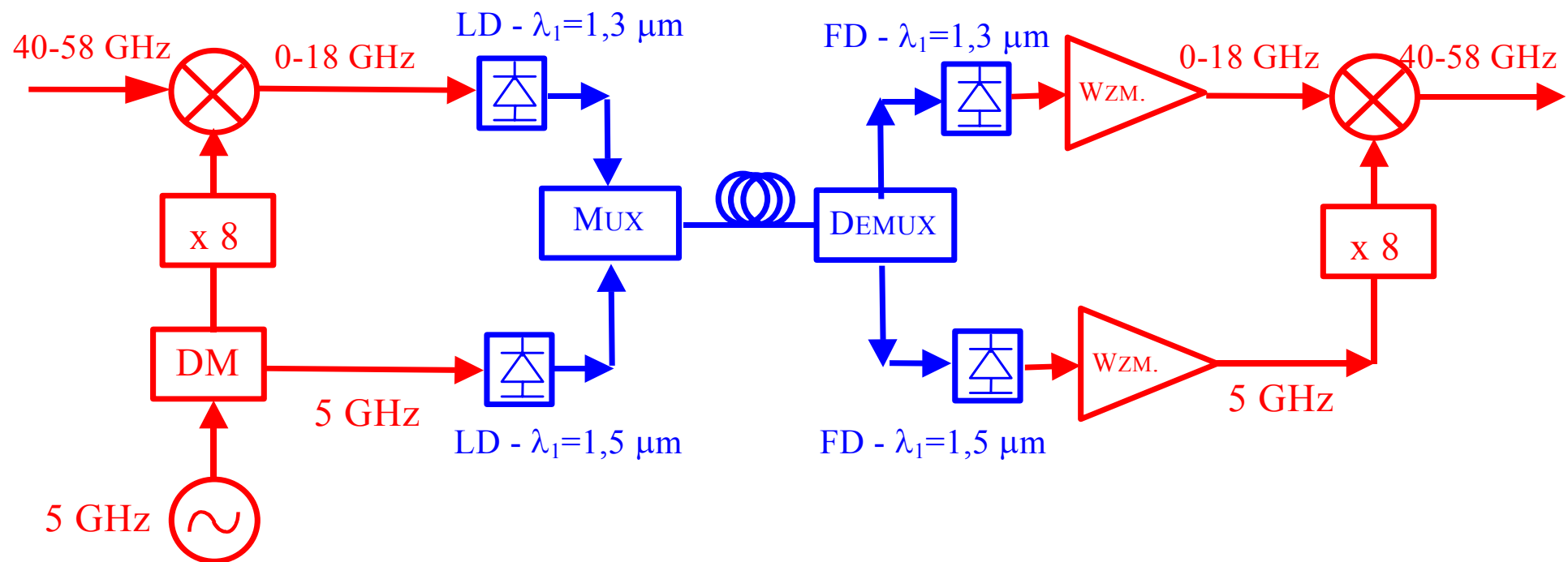


Rys.14.4F. Struktura już pokazywana, tyle, że z modulatorami zewnętrznymi.



## 2. OPTYCZNA TRANSMISJA SYGNAŁÓW MIKROFALOWYCH – PRZYKŁAD G

- ◆ W wielu przypadkach konieczna jest transmisja sygnałów mikrofalowych na z pasm powyżej osiągalnego pasma modulacji laserów.
- ◆ Mieszacze mikrofalowe dolnowstęgowe wykorzystywane są do obniżenia pasma sygnałów do wartości umożliwiających modulację mocy laserów, a górnówstęgowe do powrotu do pasma.
- ◆ Oddzielnie transmitowana jest nośna, 8 x mniejsza, potrzebne są więc powielacze częstotliwości.

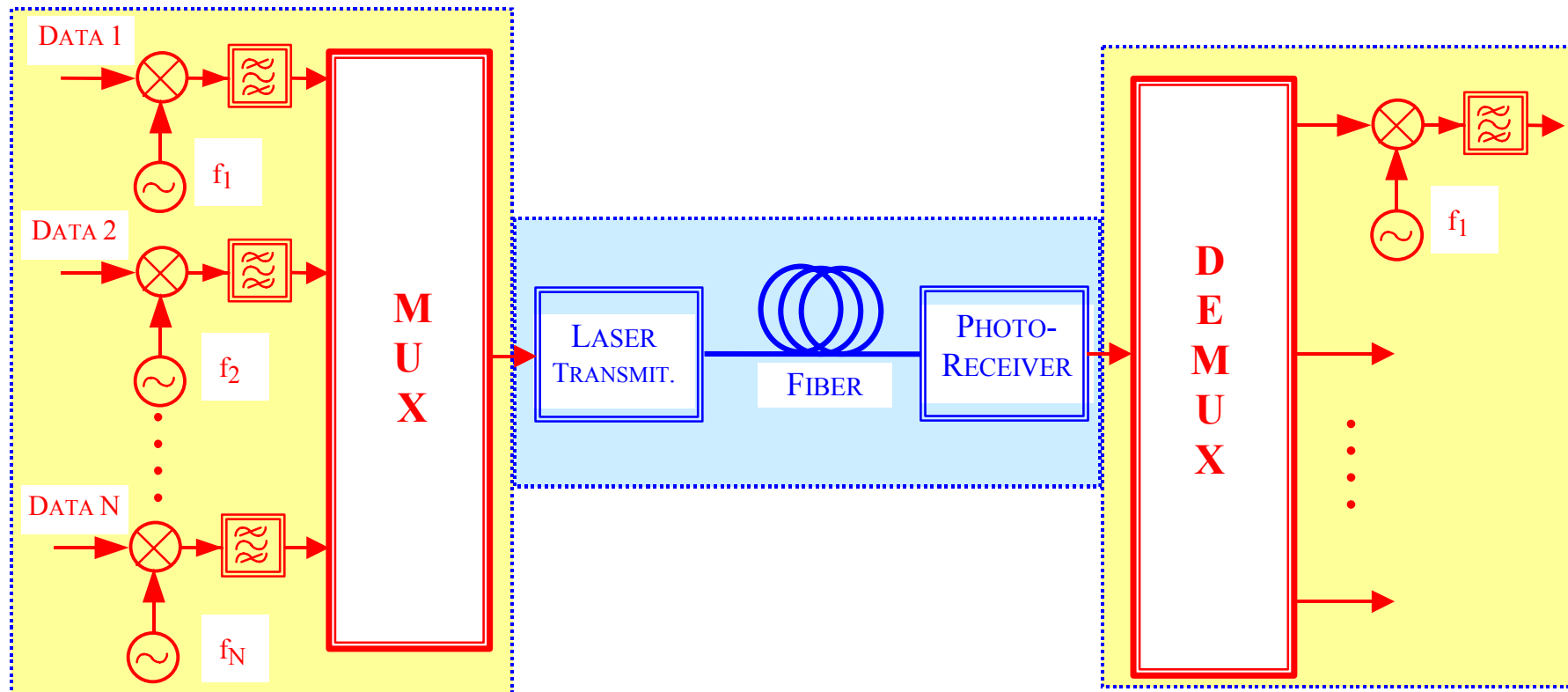


Rys.14.4G. Schemat blokowy układu do optycznej transmisji sygnałów mikrofalowych z pasma 40 – 58 GHz.



## 2. OPTYCZNA TRANSMISJA SYGNAŁÓW ... – MULTIPLEKSACJA NA PODNOŚNYCH

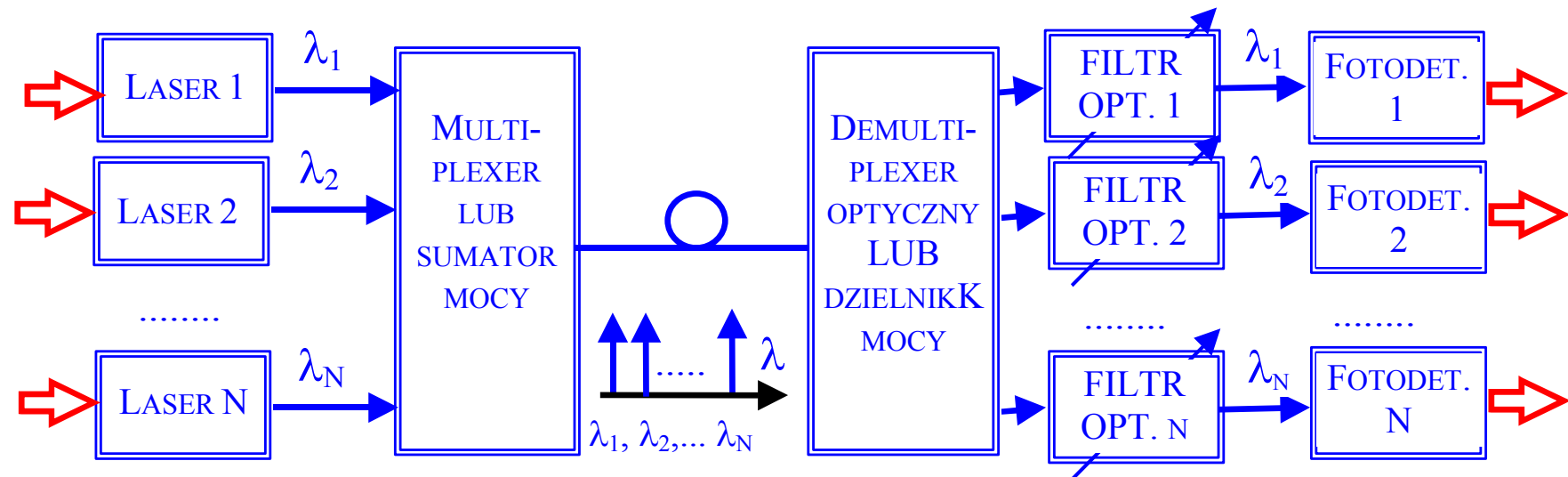
- Modulacja z wykorzystaniem podnośnych (**subcarrier multiplexing**) jest chętnie stosowana w transmisji kanałów telewizyjnych w sieciach CATV.
- W tej technice wszystko, co możliwe jest realizowane z wykorzystaniem układów elektronicznych, łącze optyczne służy jedynie do transmisji.



Rys.14.5A. Przypomnienie idei transmisji sygnałów mikrofalowych z wykorzystaniem podnośnych.

## 2. OPTYCZNA TRANSMISJA SYGNAŁÓW ... – WDM I MULTIPLEKSACJA NA PODNOŚNYCH

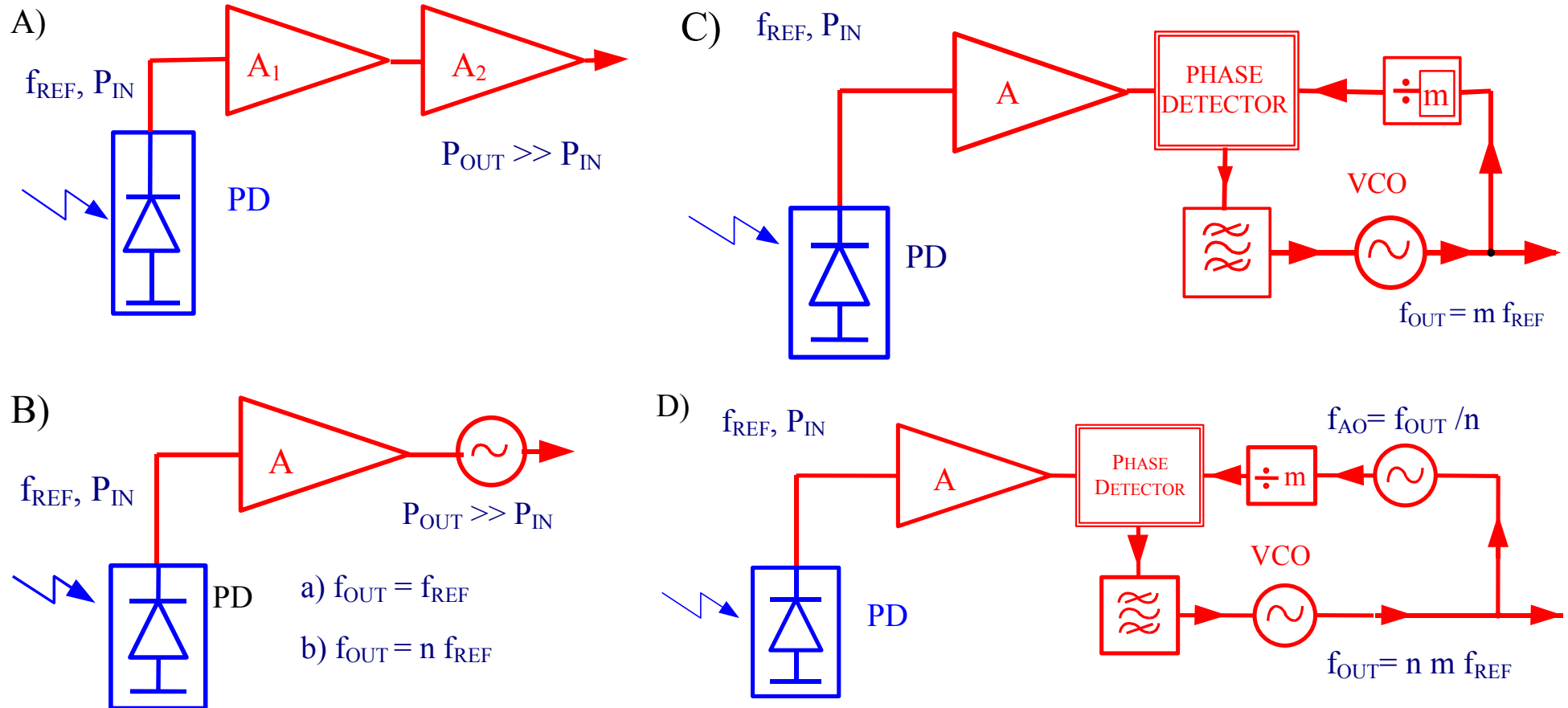
- ◆ Każdy laser emituje inną długość fali, sygnały po połączeniu transmitowane są światłowodem.
- ◆ Każdy z laserów modulowany jest oddzielnie.
- ◆ Po stronie odbiorczej sygnały są kierowane do fotodetektorów. Przed detekcją sygnały są filtrowane przez optyczne filtry.
- ◆ Sieć optyczna WDM może zawierać wzmacniacze optyczne, wzmacniające wszystkie lub tylko niektóre długości fali.



Rys.14.5B. Podstawowa struktura układu z multipleksacją WDM, z transmisją „z punktu do punktu”, point-to-point.

### 3. OPTYCZNA GENERACJA SYGNAŁÓW MIKROFALOWYCH – SYNCHRONIZACJA

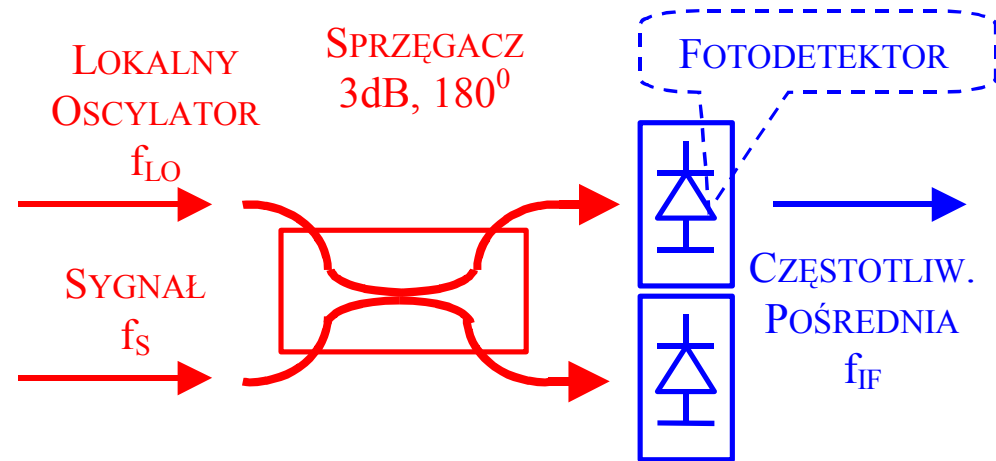
◆ Można wykorzystać proces synchronizacji do generacji sygnałów mikrofalowych.



Rys.14.6. Stopnie odbiorcze przy transmisji sygnałów mikrofalowych: ze wzmacniaczami (A), z oscylatorem VCO synchronizowanym bezpośrednio (B), z oscylatorami synchronizowanymi przez detektory fazy (C) i (D).

### 3. OPTYCZNA GENERACJA SYGNAŁÓW MIKROFALOWYCH – MIESZANIE OPTYCZNE (A)

- ◆ Do fotodetektora kierowane są 2 sygnały optyczne o różnych częstotliwościach.
- ◆ Detektor nie jest czuły na fazę sygnału optycznego a rejestruje docierającym do niego strumieniem fotonów.
- ◆ Proces taki nazywany jest:
  - koherentną detekcją optyczną,
  - mieszaniem optycznym,
  - optyczną detekcją heterodynową.



Rys.14.7. Układ mieszacza optycznego ze sprzęgaczem i dwiema fotodiodami.

- ◆ Pierwszy sygnał o mocy  $P_S$  natężeniu pola EM, przy czym amplituda  $|A_S|$  i faza  $\varphi_S$  mogą być modulowane i nieść informację:

$$E_S = \text{Re}\{A_S e^{j2\pi f_S t}\} = \text{Re}\{A_S |e^{j(2\pi f_S t + \varphi_S)}\}$$

- ◆ Drugi sygnał optyczny o parametrach:  $P_{LO}$ ,  $E_{LO}$ ,  $|A_{LO}|$ ,  $f_{LO}$  i  $\varphi_{LO}$ .
- ◆ Jeżeli oba sygnały są falami płaskimi o **identycznych polaryzacjach** to  $E = E_S + E_{LO}$ ;
- ◆ Moce sygnałów optycznych  $P_S$  i  $P_{LO}$  są proporcjonalne do kwadratów amplitud natężeń pól:

$$P = P_S + P_{LO} + 2\sqrt{P_S P_{LO}} \cos[2\pi f_{IF} t + (\varphi_S - \varphi_{LO})];$$

### 3. OPTYCZNA GENERACJA SYGNAŁÓW MIKROFALOWYCH – MIESZANIE OPTYCZNE (B)

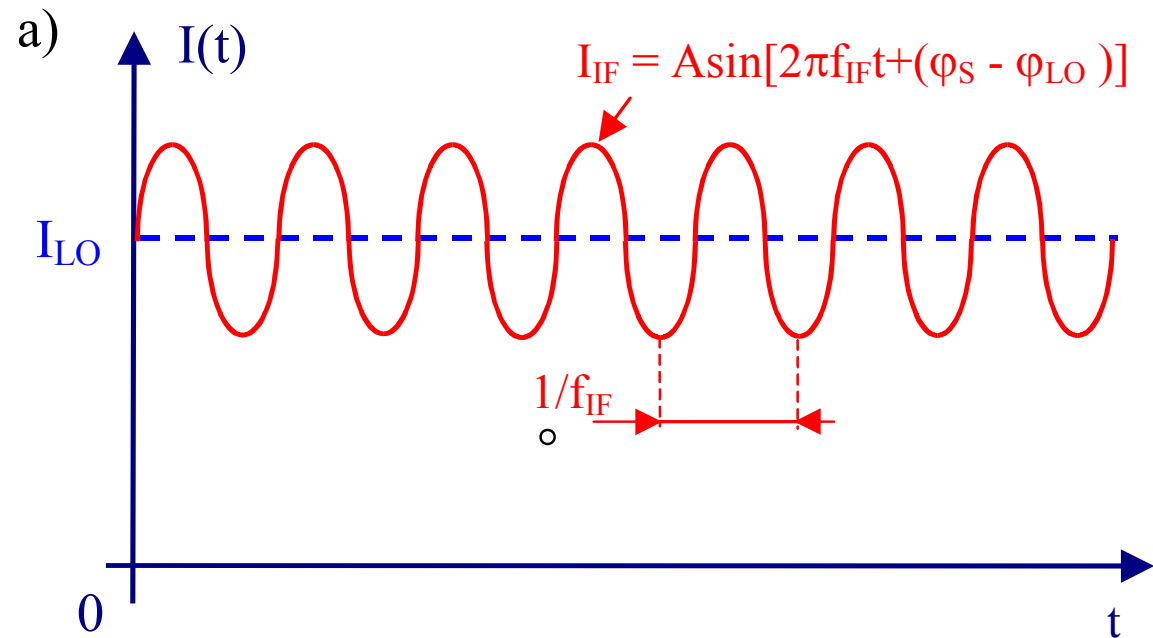
- ◆ Prąd wyjściowy fotodetektora jest sumą 3 składników (R – czułość detektora):

$$I = I_S + I_{LO} + 2R\sqrt{P_S P_{LO}} \cos[2\pi f_{IF}t + (\varphi_S - \varphi_{LO})];$$

- ◆ Interesującym nas składnikiem jest drugi z nich, o częstotliwości pośredniej

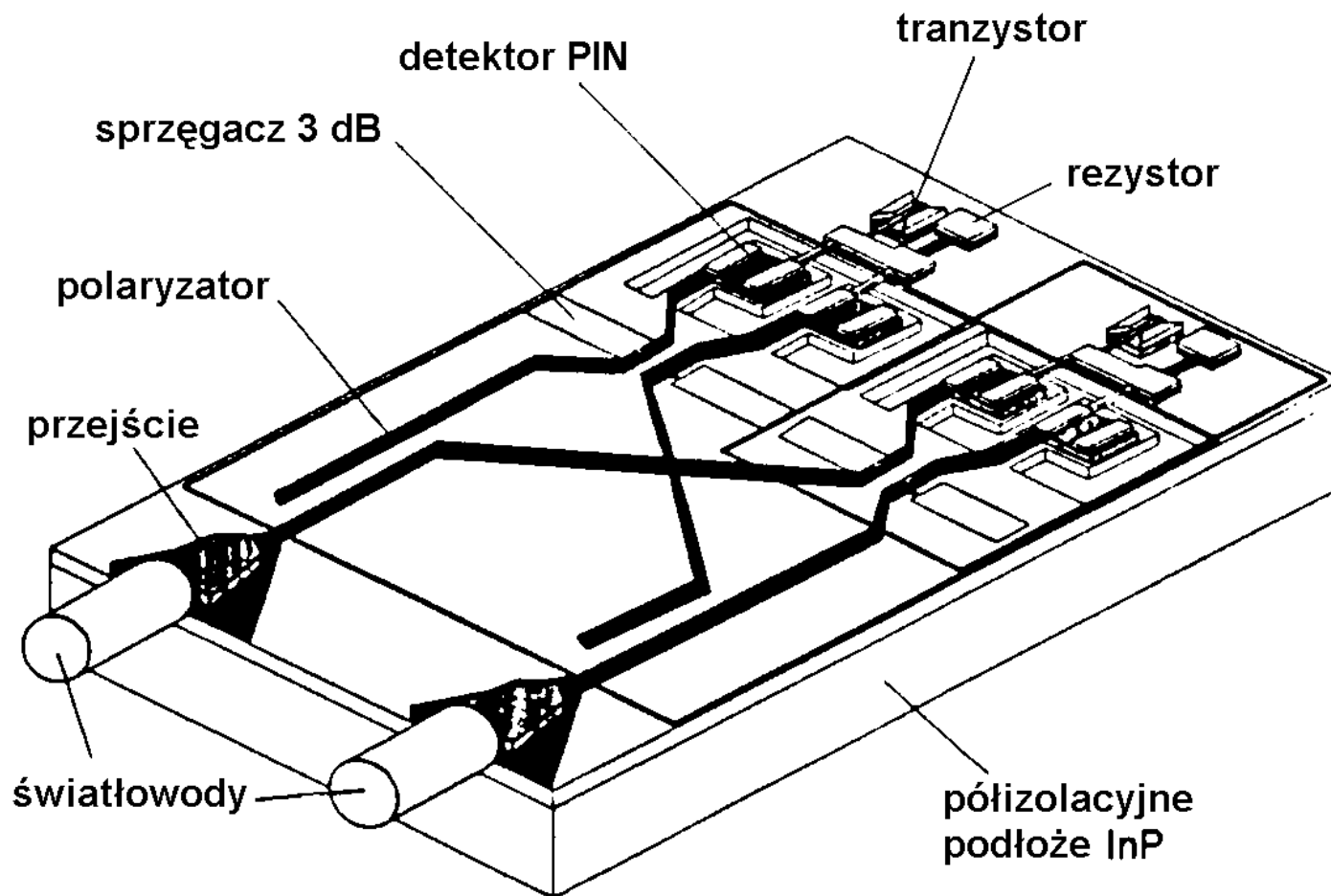
$$I_{IF} = 2R\sqrt{P_S P_{LO}} \cos[2\pi f_{IF}t + (\varphi_S - \varphi_{LO})];$$

- ◆ Informacja przy transmisji heterodynowej może być zawarta w amplitudzie, fazie i częstotliwości sygnału.
- ◆ **Detekcja heterodynowa** może być wykorzystana do otrzymania sygnału o częstotliwości w paśmie fal milimetrowych i submilimetrowych.



Rys.14.8. Przebiegi prądu uzyskane w procesie mieszania optycznego.

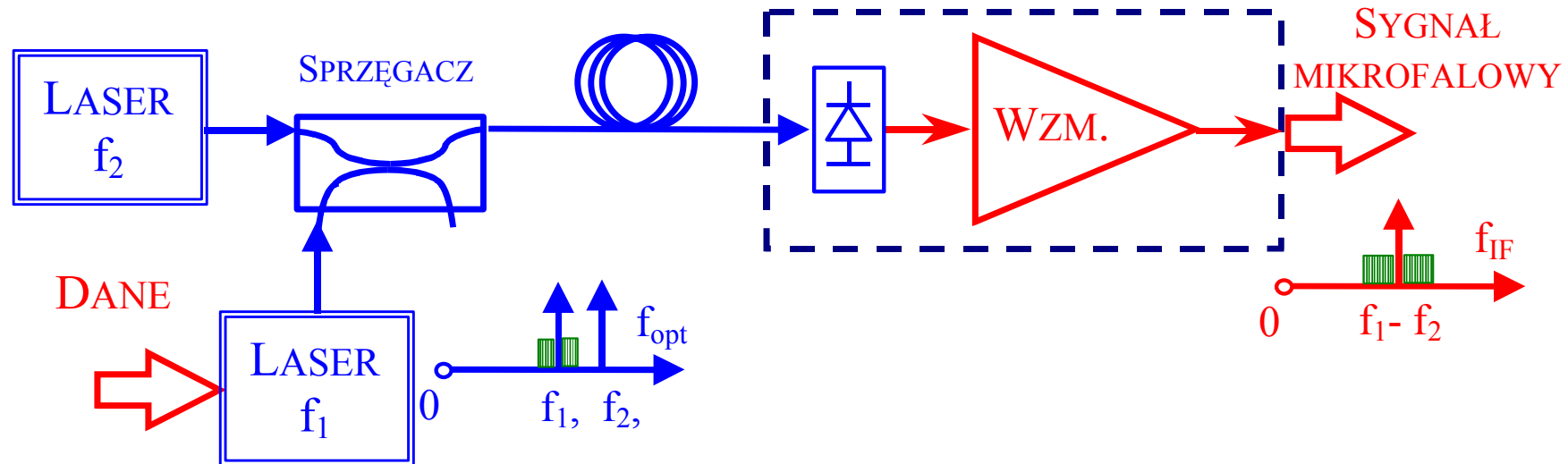
### 3. OPTYCZNA GENERACJA SYGNAŁÓW MIKROFALOWYCH – MIESZANIE OPTYCZNE (C)



*Rys.14.9. Mieszacz sygnałów optycznych doprowadzonych oddzielnymi światłowodami.*

### 3. OPTYCZNA GENERACJA SYGNAŁÓW – SYSTEM Z DWIEMA NOŚNYMI OPTYCZNYMI (A)

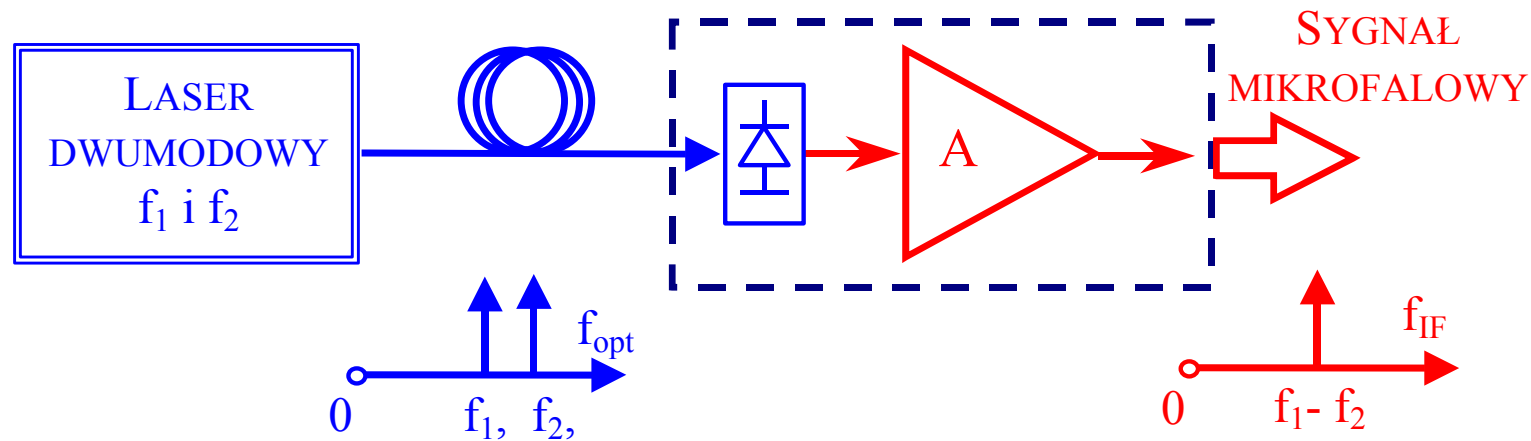
- ◆ Proces mieszania optycznego może być użyty do generacji sygnału mikrofalowego.
- ◆ Rozróżniane są dwie techniki:
  - z dwiema optycznymi częstotliwościami nośnymi,
  - z jedną optyczną częstotliwością nośną.
- ◆ Najprostszy sposób by wykorzystać mieszanie optyczne jako źródła sygnału mikrofalowego to:
  - Wykorzystać 2 lasery o częstotliwościach  $f_1$  i  $f_2$ ,
  - Za pomocą sprzęgacza zsumować oba sygnały,
  - Przesłać sygnały światłowodem do fotodetektora,
  - Po zmieszanii wybrać częstotliwość różnicową.



Rys.14.10. Mieszanie optyczne użyte jako źródło sygnału mikrofalowego.

### 3. OPTYCZNA GENERACJA SYGNAŁÓW – SYSTEM Z DWIEMA NOŚNYMI OPTYCZNYMI (B)

- ◆ Oba sygnały optyczne powinny być możliwie „czyste widmowo”, aby widmo częstotliwości różnicowej było odpowiednio „czyste”.
- ◆ Istnieje możliwość takiego zaprojektowania lasera typu DFB, aby generował jednocześnie na dwu częstotliwościach. Jest to rozwiązanie bardzo wygodne w wielu zastosowaniach.
- ◆ W rozwiązaniu z rys.14.10 jeden z laserów mógł być modulowany i na wyjściu fotodetektora uzyskiwalibyśmy nośną mikrofalową ze wstęgami modulacji.
- ◆ W rozwiązaniu z rys.14.11 modulacja nie jest możliwa.
- ◆ Najważniejszym problemem rozwiązania jest stabilizacja różnicy częstotliwości między modami.



Rys.14.11. Nowoczesne rozwiązanie z laserem dwumodowym.



### 3. OPTYCZNA GENERACJA SYGNAŁÓW – SYSTEM Z JEDNĄ NOŚNĄ OPTYCZNĄ

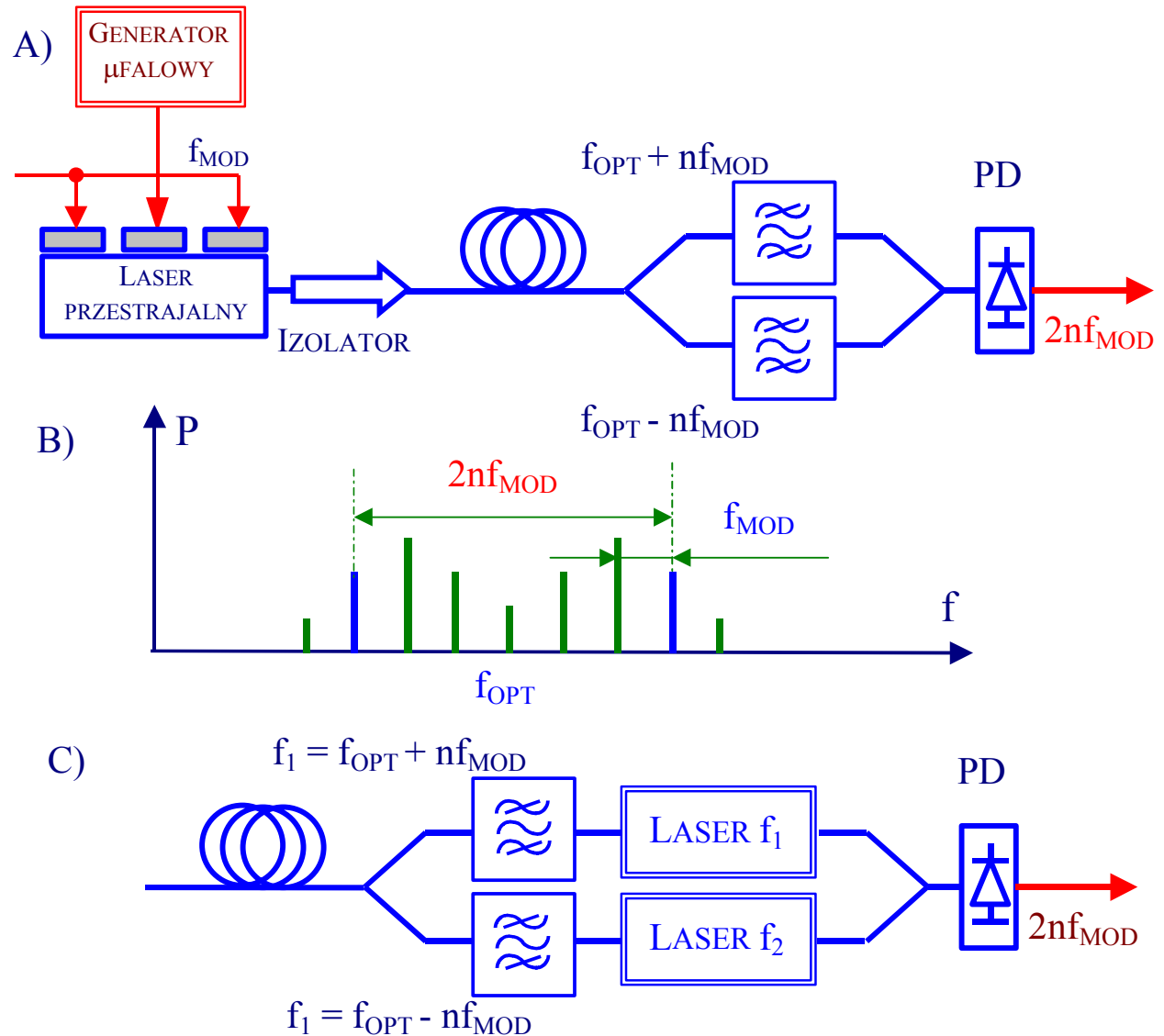
Rys.14.12. Generacja sygnału w paśmie fal milimetrowych.

A) Układ z laserem przestrajalnym wytwarza wielką liczbę wstęg bocznych.

Dwie z nich są filtrowane przez filtry optyczne.

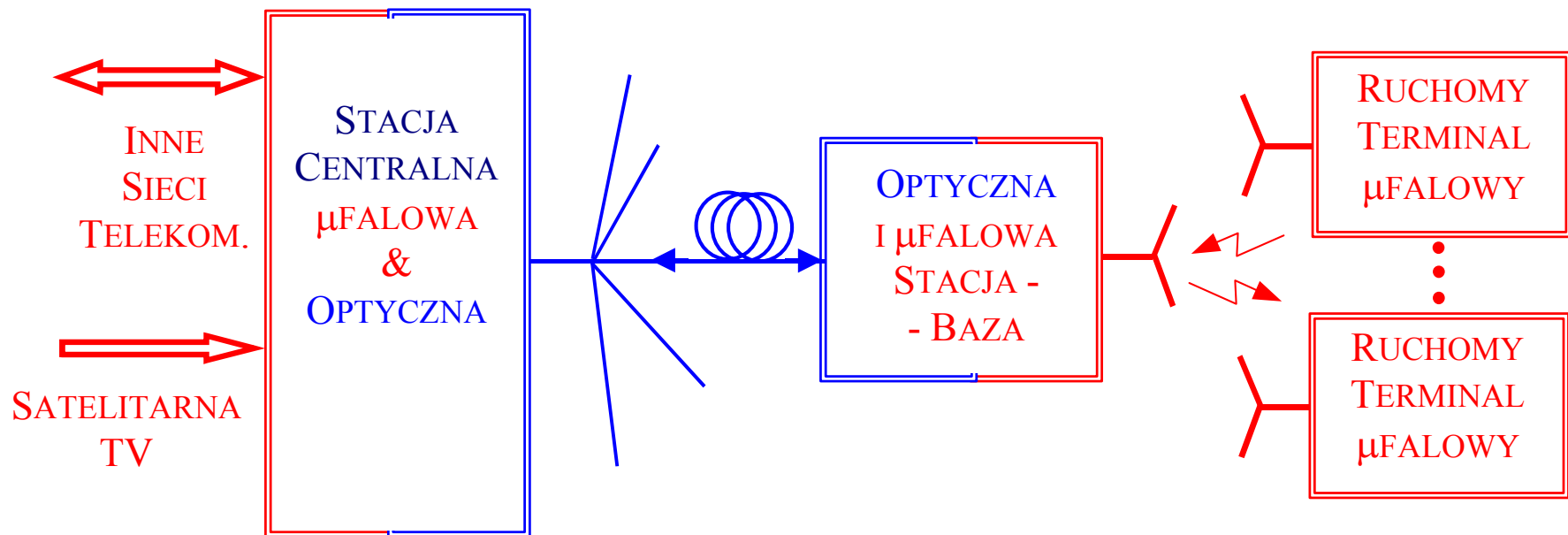
B) Widmo sygnału optycznego z wieloma wstęgami.

C) Wyfiltrowane wstęgi synchronizują 2 lasery, aby wzmocnić moce wyjściowe sygnałów optycznych i podnieść moc wyjściową sygnału mikrofalowego.



## 4. SYSTEMY RADIOWO-ŚWIATŁOWODOWE – IDEA STRUKTURY

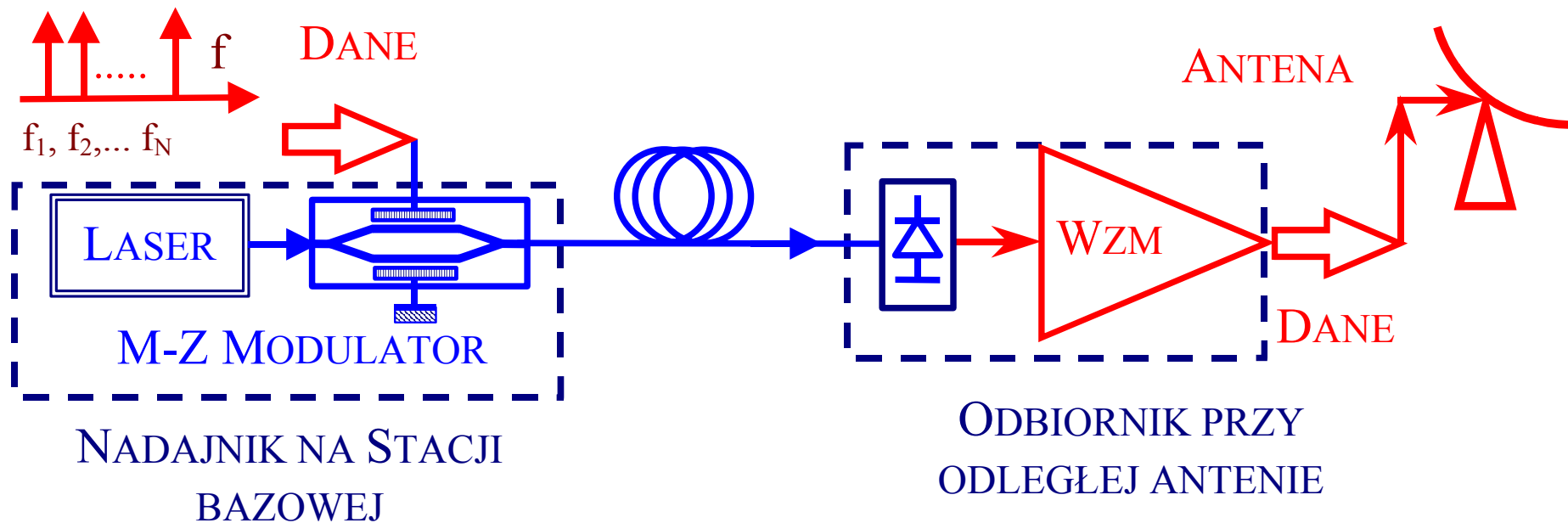
- ◆ Transmisja danych między stacją-bazą a ruchomymi terminalami odbywa się na drodze radiowej. Zasięgi są zależne od mocy wyjściowej nadajników i czułości odbiorników. Z reguły w paśmie fal milimetrowych nie są one duże.
- ◆ Stacja centralne połączona jest z wieloma stacjami-bazami. Wszystkie połączenia są zwykle dwukierunkowe.
- ◆ Można w tych systemach z powodzeniem stosować multipleksację typu WDM.



Rys.10.13. Jeszcze raz podstawowa struktura układu.

## 4. SYSTEMY RADIOWO-ŚWIATŁOWODOWE – PRZYKŁAD 1

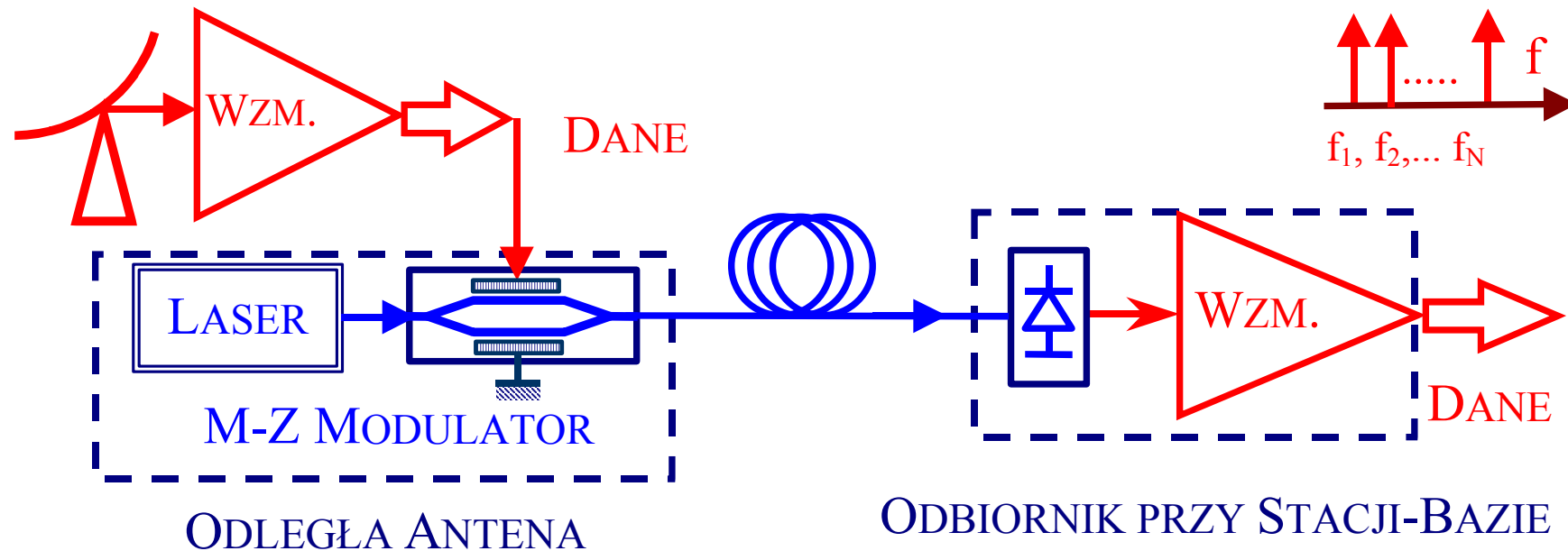
- ◆ W szczególnych przypadkach łącze może być jednokierunkowe, np. do odległej anteny transmitowany jest zestaw kanałów telewizyjnych.
- ◆ Poziom sygnału mikrofalowego po detekcji optycznej jest mały i konieczne jest wzmocnienie przed skierowaniem sygnału do anteny.



Rys.10.14. Łącze optyczne między siecią telekomunikacyjną a odległą anteną.

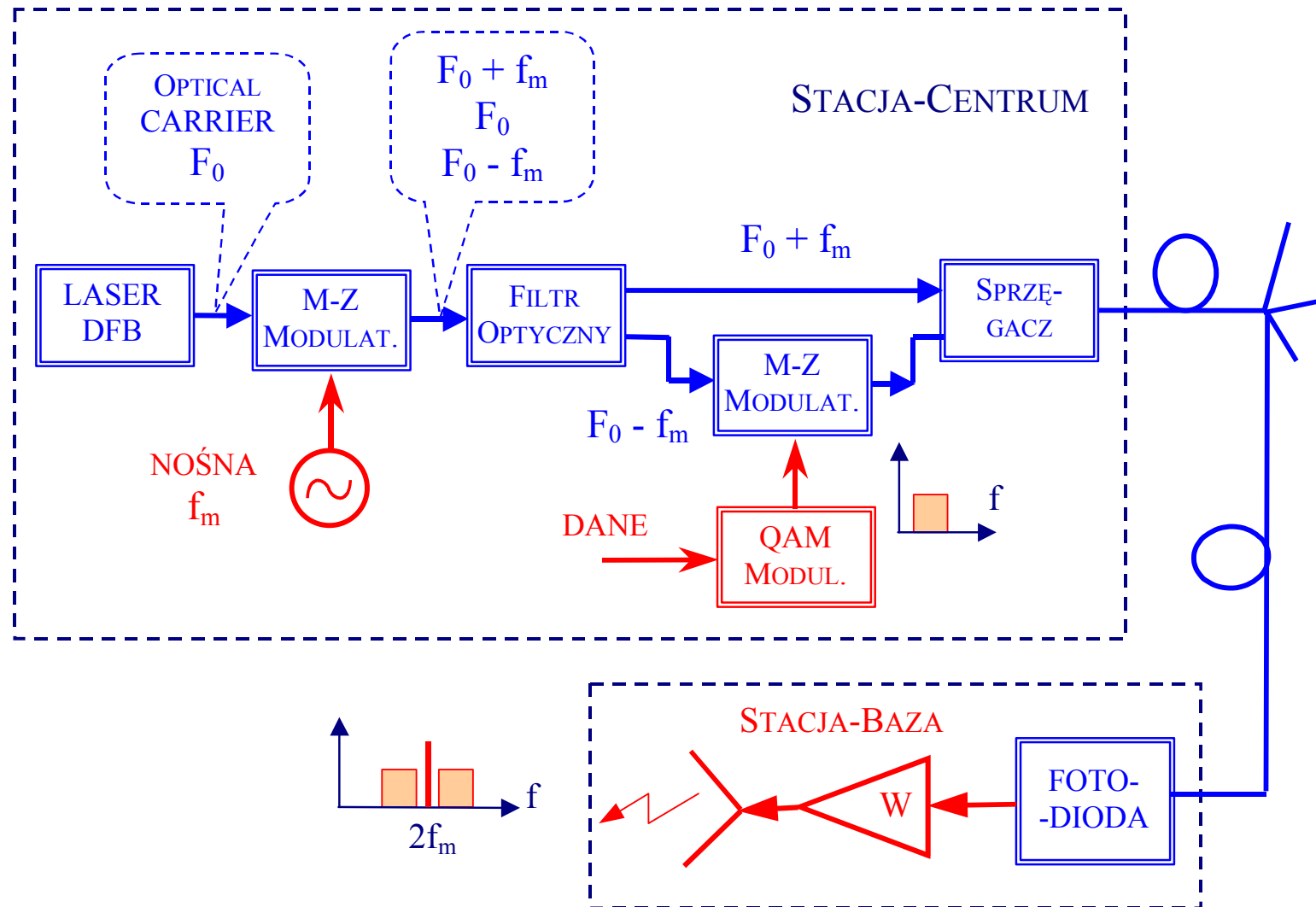
## 4. SYSTEMY RADIOWO-ŚWIATŁOWODOWE – PRZYKŁAD 2

- ◆ Na rys.10.15 pokazano odwrotny problem: z odległej anteny mikrofalowej trzeba dostarczyć łączem optycznym złożony sygnał mikrofalowy do stacji-bazy.
- ◆ Zewnętrzny modulator elektrooptyczny zapewnia dobrą liniowość i niski poziom zniekształceń intermodulacyjnych.
- ◆ Stacja-baza może po detekcji optycznej sygnał transmitować do wielu odbiorców drogą radiową.



Rys.10.15. Optyczne połączenie odległej anteny z siecią telekomunikacyjną.

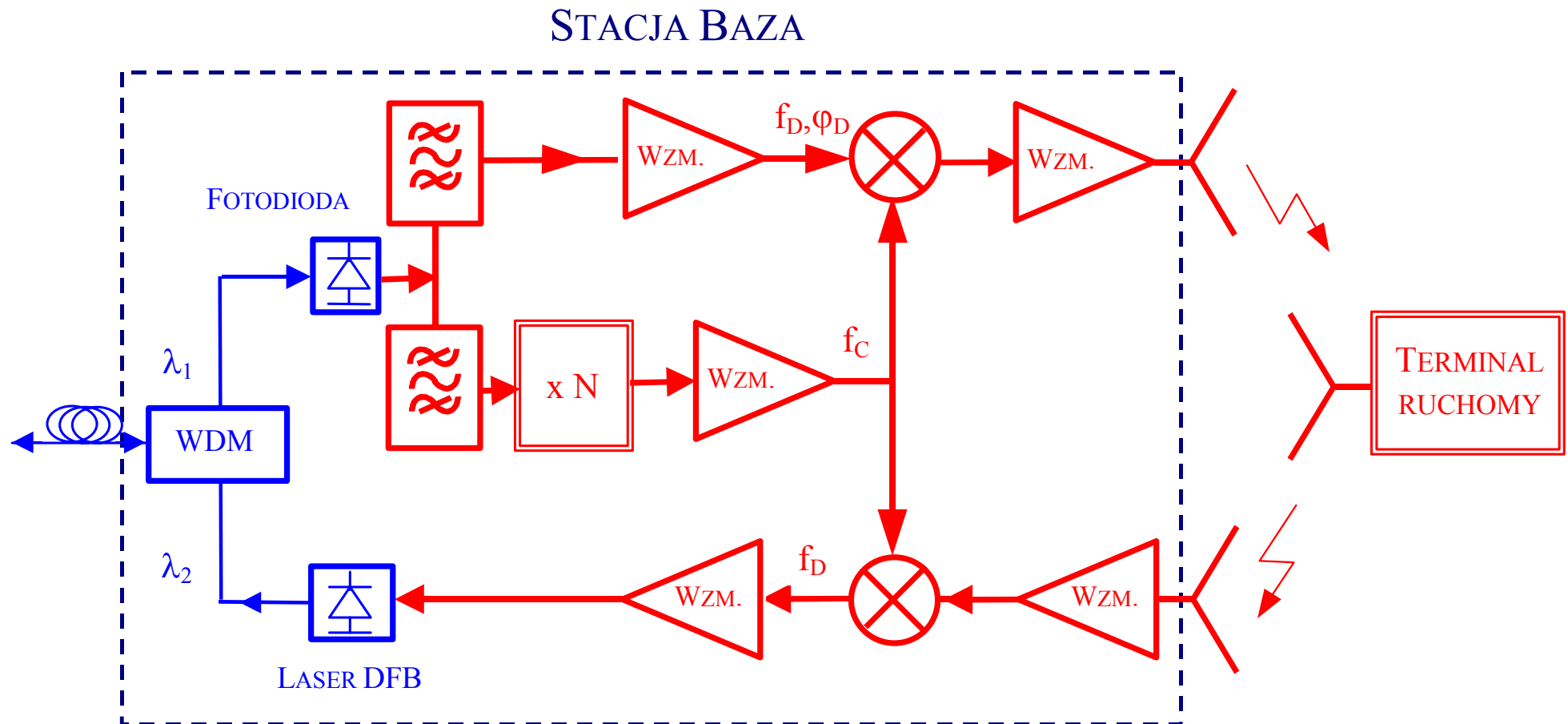
## 4. SYSTEMY RADIOWO-ŚWIATŁOWODOWE – PRZYKŁAD 3



Rys.10.16. Schemat blokowy systemu radiowo-optycznego, w którym dzięki zastosowaniu oddzielnej filtracji optycznej uzyskano podwojenie częstotliwości nośnej i możliwość transmisji danych.

## 4. SYSTEMY RADIOWO-ŚWIATŁOWODOWE – PRZYKŁAD 4

- ◆ Schemat ideowy stacji-bazy z możliwością dwukierunkowej transmisji sygnału do terminalu ruchomego i z informacją odebraną od niego.
- ◆ Transmisje odbywają się na różnych długościach fali.

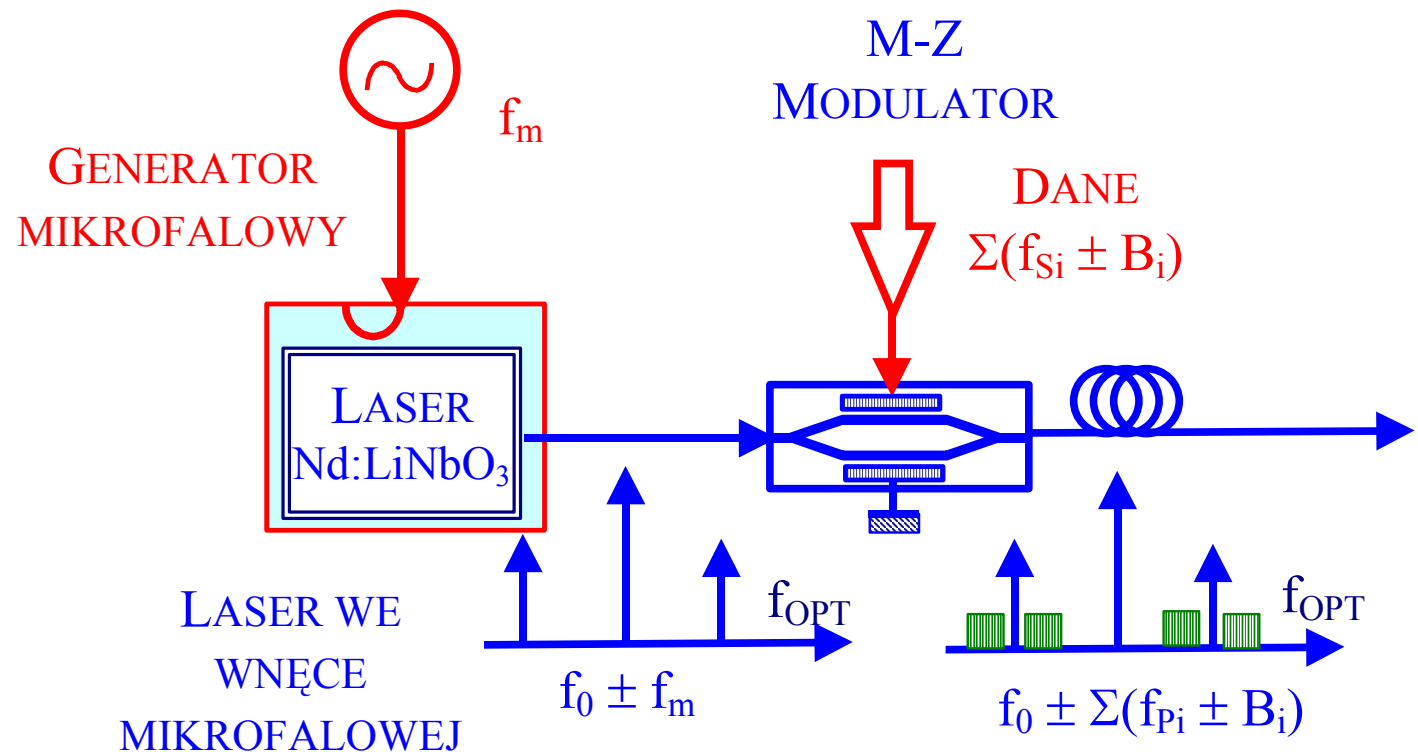


Rys.10.17. Schemat blokowy stacji bazowej z powielaniem mikrofalowej częstotliwości nośnej.

## 4. SYSTEMY RADIOWO-ŚWIATŁOWODOWE – PRZYKŁAD 5A

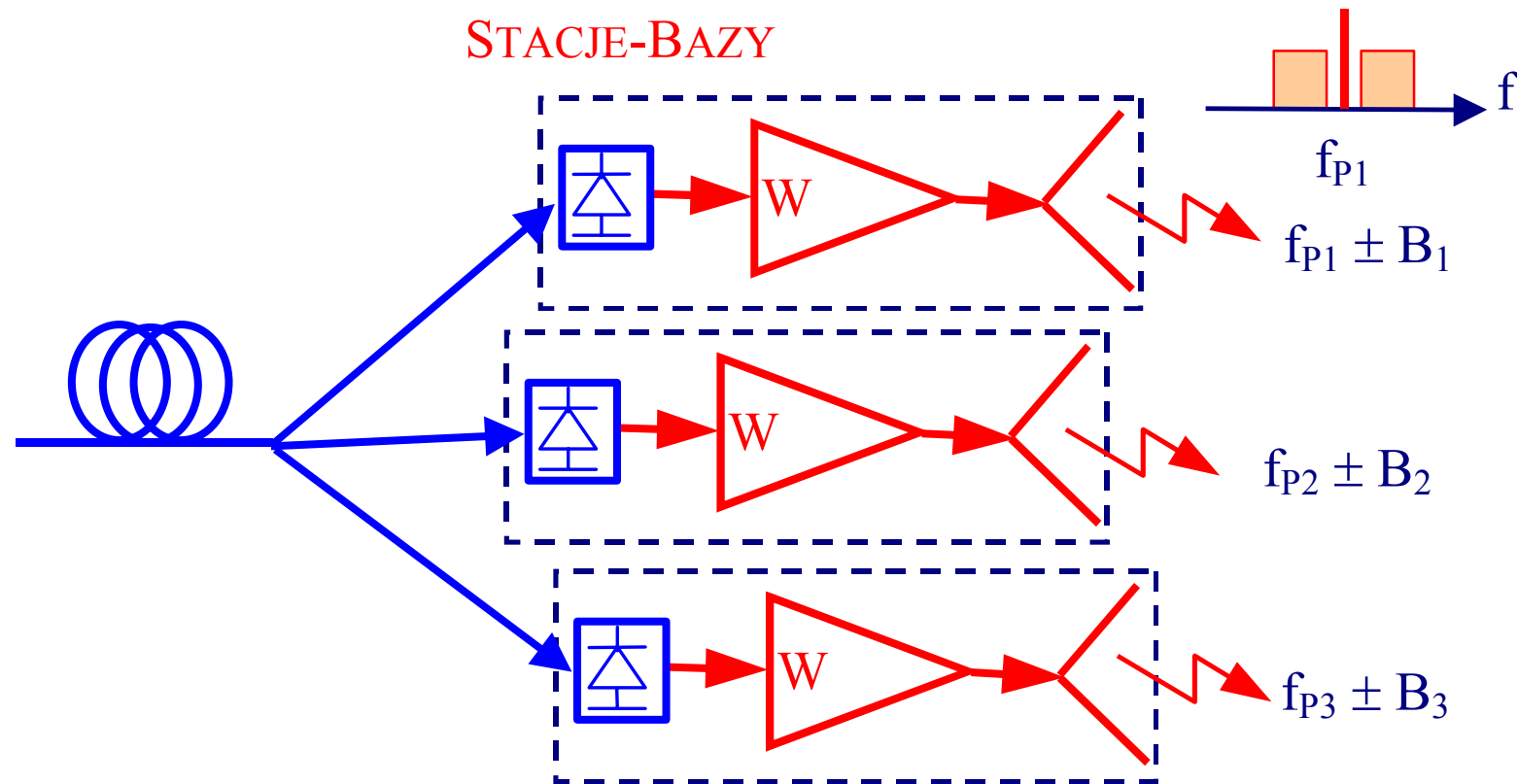
- ◆ Schemat ideowy nadajnika optycznego wykorzystującego modulację lasera wykonanego z materiału elektrooptycznego we wnęce mikrofalowej (modulacja współczynnika załamania Nd:LiNbO<sub>3</sub>) pobudzonej częstotliwością  $f_m$ .
- ◆ Modulacja złożonym sygnałem mikrofalowym z wieloma podnośnymi  $\Sigma(f_{Si} \pm B_i)$  wykonywana jest w zewnętrznym modulatorze elektrooptycznym.  $f_{Pi} = f_m + f_{Si}$

Rys.10.18. Nadajnik łącza światłowodowego z laserem w rezonatorze mikrofalowym. Częstotliwości podnośne z informacjami modulują sygnał optyczny w modulatorze zewnętrznym Mach-Zehndera.



## 4. SYSTEMY RADIOWO-ŚWIATŁOWODOWE – PRZYKŁAD 5B

- ◆ Sygnały optyczne nadajnika po transmisji światłowodem kierowane są do różnych pikokomórek z odbiornikami optycznymi.
- ◆ W odbiornikach sygnały mikrofalowe są filtrowane i tylko odpowiednia podnośna jest po wzmacnieniu kierowana do anteny i wysyłana drogą radiową.



Rys.10.19. Stacje bazy z pikokomórkami wykorzystują kolejne częstotliwości  $f_{P_i} = f_m + f_{Si}$ ;



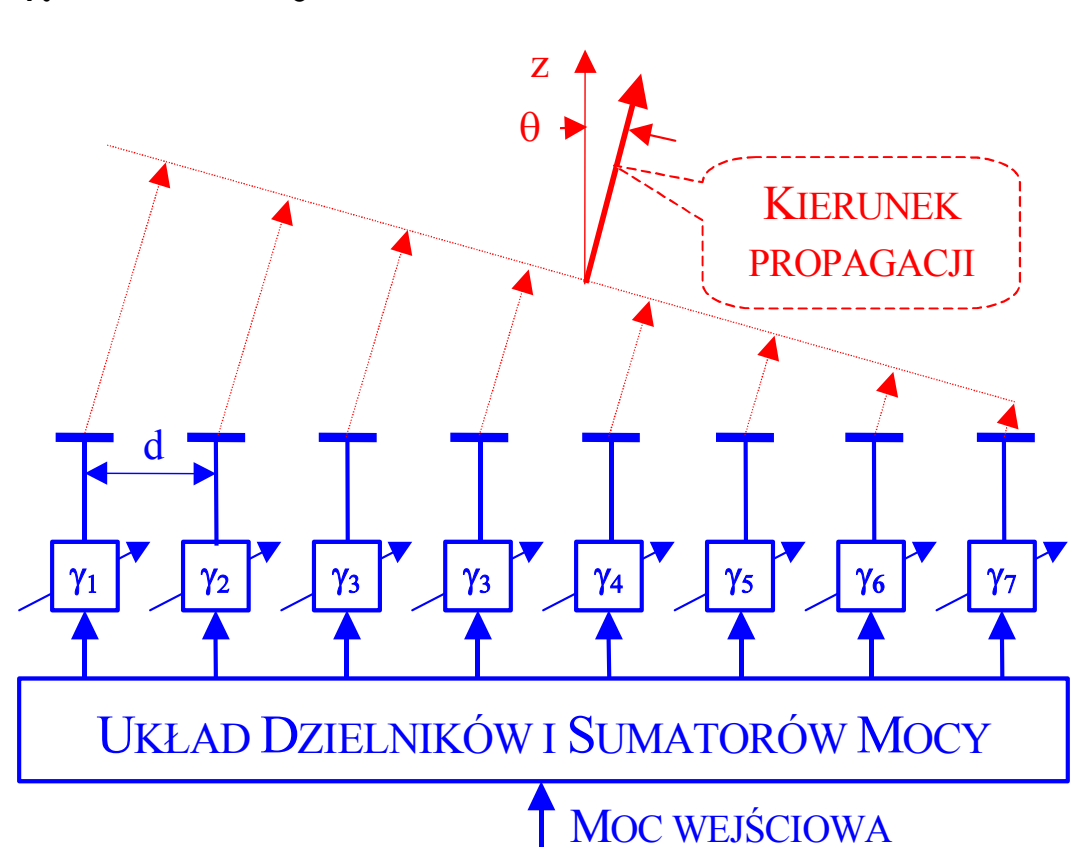
## 5. FOTONIKA W TECHNICIE RADAROWEJ – ANTENY FAZOWANE

- Anteny fazowane mają  $n$  kolumn,  $m$  rzędów i  $n \times m$  elementów promieniujących. Dla wszystkich tych elementów jest tylko jedno źródło sygnału mikrofalowego.
- Jeśli przesunięcie fazy między elementami promieniującymi równe jest  $\Delta\Phi$ , to wiązka propagowana jest pod kątem  $\Theta$ :

$$\Delta\Phi = 2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda} = 2\pi \frac{f_{\text{RF}} d \sin \theta}{c};$$

- Anteny fazowane umożliwiają ruch wiązki przy nieruchomej antenie.
- Problem: w jaki sposób zmieniać przesunięcie fazy między elementami?

*Rys.10.20. Podstawowa struktura elementów promieniujących anteny fazowanej. Moc wejściowa kierowana jest do elementów promieniujących przez układ dzielników mocy. Sygnał odebrany jest sumowany przez ten sam układ i kierowany do odbiornika.*

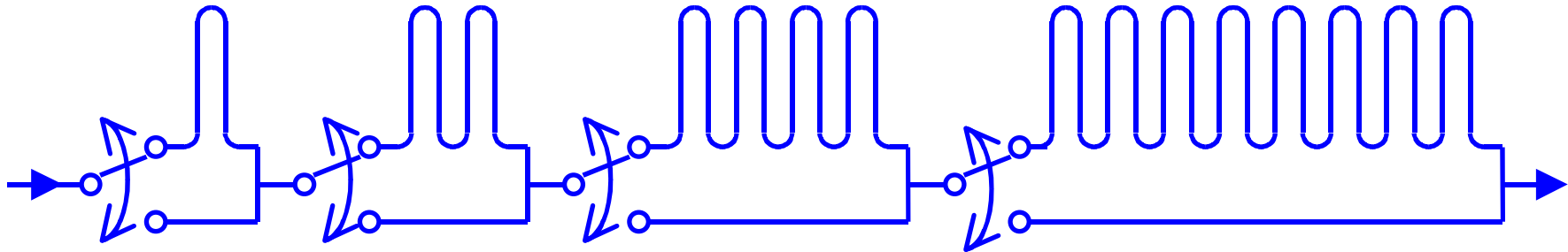


## 5. FOTONIKA W TECHNICIE RADAROWEJ – STEROWANIE WIĄZKĄ

1. Sterowanie za pomocą przesuwników fazy: Typowe systemy mikrofalowe sterują wiązką wykorzystując przesuwniki fazy umieszczone w modułach T/R. **Wada:**  $\Delta\Phi$  zmienia się z częstotliwością, powstaje efekt zezowania, *squinting effect*.

2. Sterowanie z wykorzystaniem linii opóźniających: Różnica fazy  $\Delta\Phi$  uzyskiwana jest przez wydłużenie drogi transmisji fali do elementu promieniującego:  $\Delta t = \frac{d \sin \theta}{c}$ ;

- Wykorzystanie techniki światłowodowej ułatwia: transmisję mocy do elementu T/R i wprowadzenie opóźnienia czasowego przez wydłużenie drogi transmisji – Rys.14.21.



Rys.10.21. Przełączany optyczny układ linii opóźniających.

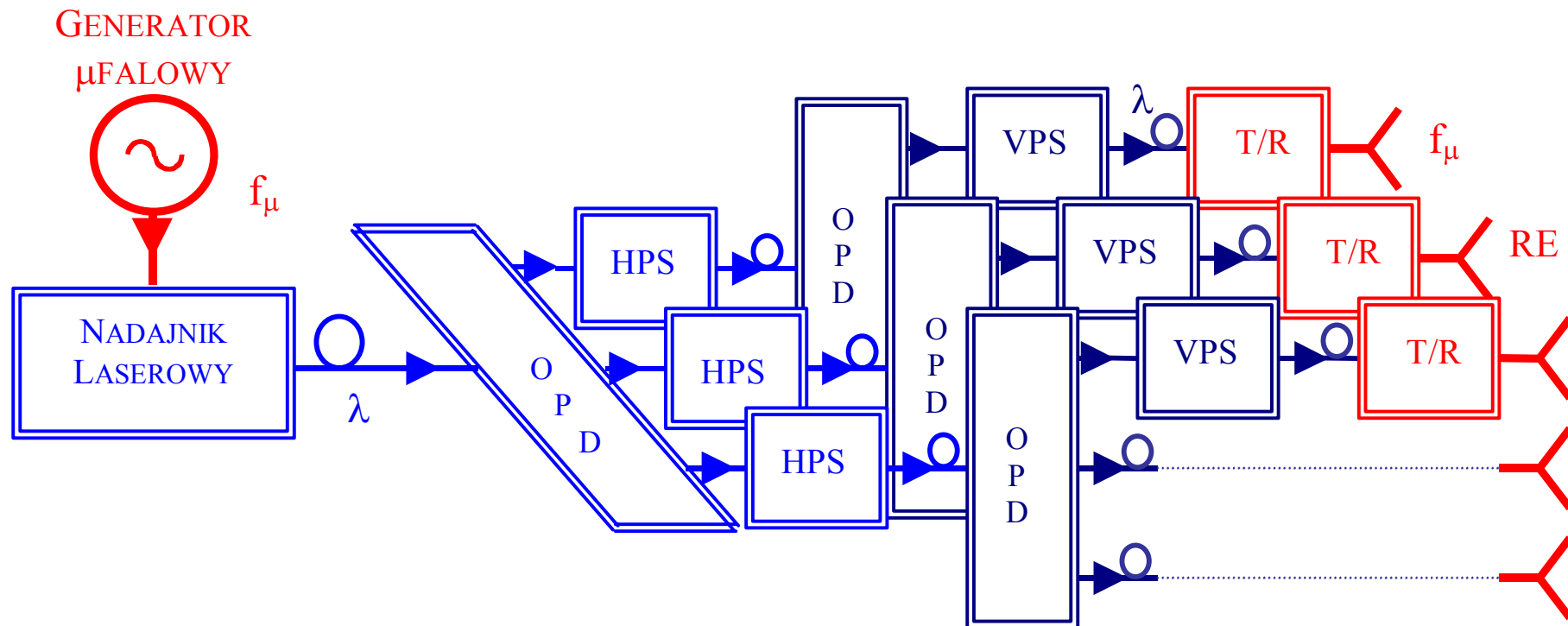
- Moc lasera modulowana jest z częstotliwością sygnału mikrofalowego, a różnica fazy  $\Delta\Phi$  między kolejnymi T/R zmieniana jest przez wydłużenie drogi transmisji  $l_f$  światłowodem:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi n f_{\mu} l_f}{c};$$

- gdzie  $n$  jest współczynnikiem załamania a  $c$  jest prędkością światła.

## 5. FOTONIKA W TECHNICIE RADAROWEJ – STRUKTURA SYSTEMU

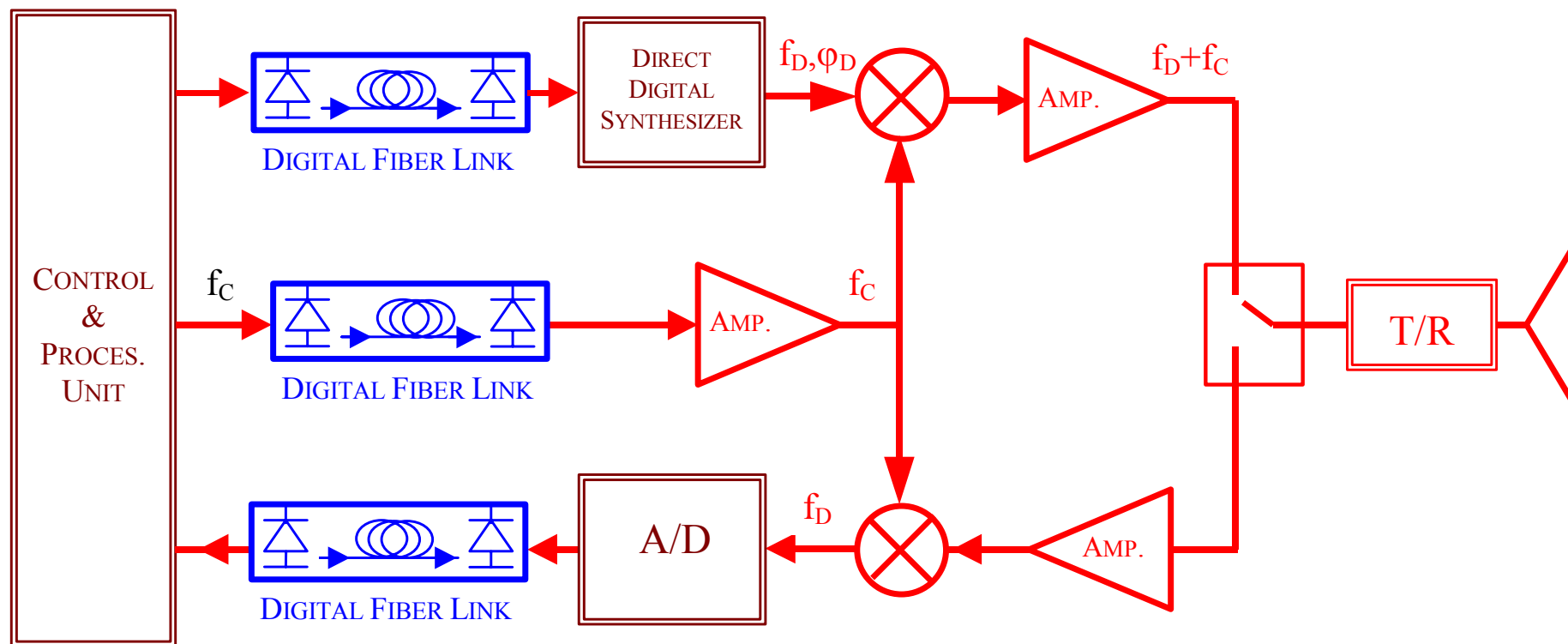
- ◆ System optycznego formowania wiązki ma dwie istotne korzyści:
  - System światłowodowy jest lekki, wnosi małe straty, jest odporny na zakłócenia.
  - Układy przełączanych linii opóźniających skutecznie sterują wiązką przy zmianie częstotliwości mikrofalowej w szerokich granicach, gdyż  $\Delta\Phi/f_{RF}$  ma stałą wartość.



Rys.10.22. Podział sygnału mikrofalowego i transmisja drogą optyczną do elementów T/R.

## 5. FOTONIKA W TECHNICIE RADAROWEJ – NOWOCZESNY SYSTEM CYFROWY

- W nowoczesnych radarach sygnał mikrofalowy wytwarzany jest przy antenie przez syntezer z przetwornikiem D/A, do którego informacja transmitowana jest cyfrowo światłowodem.
- Fala nośna o częstotliwości  $f_c$  transmitowana jest łączem analogowym. Sygnał ten wykorzystywany jest w mieszaczach górno- i dolnowstęgowych.
- Sygnał odebrany transmitowany jest cyfrowo (przetwornik A/D) do analizatora.



Rys.10.23. Wykorzystanie współczesnej techniki cyfrowej z przetwornikami D/A i A/D.

## 6. PODSUMOWANIE

- ◆ Poszukiwane są coraz to nowe pasma mikrofalowe do transmisji coraz to większej liczby informacji.
- ◆ W pasmach fal milimetrowych wykluczona jest transmisja sygnałów mikrofalowych na dłuższe odległości ze względu na tłumienie falowodów. W grę wchodzi albo radiolinia, albo transmisja światłowodem.
- ◆ Ograniczone pasmo modulacji sygnału optycznego zmusza do stosowania pomysłowych technik powielania mikrofalowej częstotliwości nośnej.
- ◆ Wykorzystanie pasm fal milimetrowych wymaga opanowania technologii wytwarzania półprzewodnikowych elementów aktywnych, aby możliwa była realizacja procesów generacji, wzmacniania i obróbki sygnałów elektronicznych.
- ◆ Fotonika znajduje zastosowanie w wielu rozmaitych działach elektroniki, radiolokacja jest tu bardzo dobrym przykładem.