

4 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SIGNÁLOVÉ PROCESORY

Dr.h.c. Prof. Ing. RNDr. Ján Turán, DrSc.

4 Úvod

- **Optické spracovanie signálov**
 - a) Analógové procesory pre spracovanie priestorových optických signálov
 - b) Analógové procesory s využitím oneskorovacích vedení
 - c) Číslicové procesory
- **Sú zostavené s využitím diskretných optických prvkov, optických vlákien, alebo integrovanej optiky**

4.1 ROZDELENIE A ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH SIGNÁLOVÝCH PROCESOROV

- **Realizácia Fourierovej transformácie**
Použitím spojnej šošovky
- **Obraz $H(x,y)$ - dvojrozmerná Fourierová transformácia**

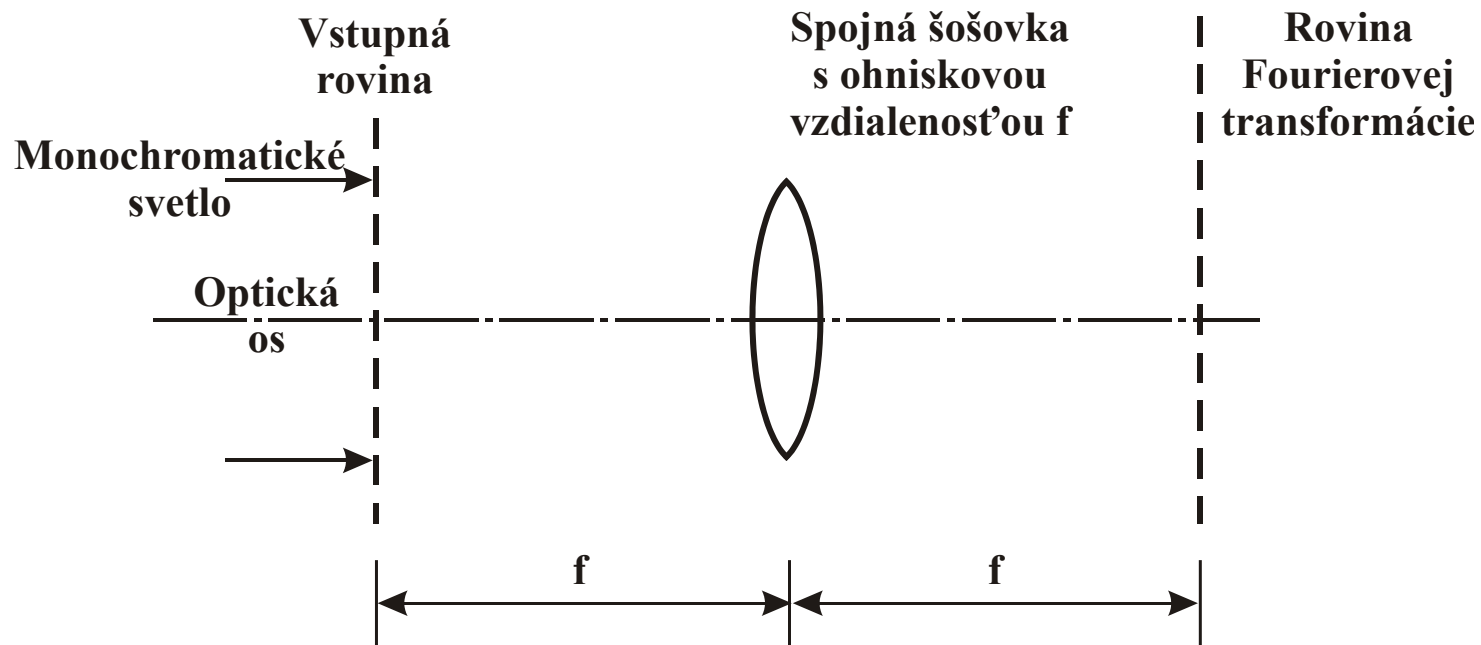
$$F(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(x, y) e^{-j2\Pi(f_x x + f_y y)} dx dy$$

kde f_x a f_y sú priestorové frekvencie v smere x a y

- **Priestorové frekvencie** $f_x = \frac{x'}{\lambda f}$ $f_y = \frac{y'}{\lambda f}$

kde x' , y' sú súradnice v transformovanej oblasti, λ je vlnová dĺžka a f je ohnisková vzdialenosť šošovky

- **Korelačné a konvolučné procesory**
- **Optické korelátory**
 - **S integráciou v priestorovej**
 - **S integráciou časovej oblasti**



Obr. 4.1 Realizácia Fourierovej transformácie optického signálu spojnou šošovkou.

Systemové požiadavky OSP

- **Malé rozmery**

- tok údajov 1 **Gbits⁻¹**, rýchlosť šírenia signálu $3 \cdot 10^8$ **ms⁻¹** - kocka o hrane asi 20 **cm**

- **Malá spotreba výkonu na jednu operáciu**

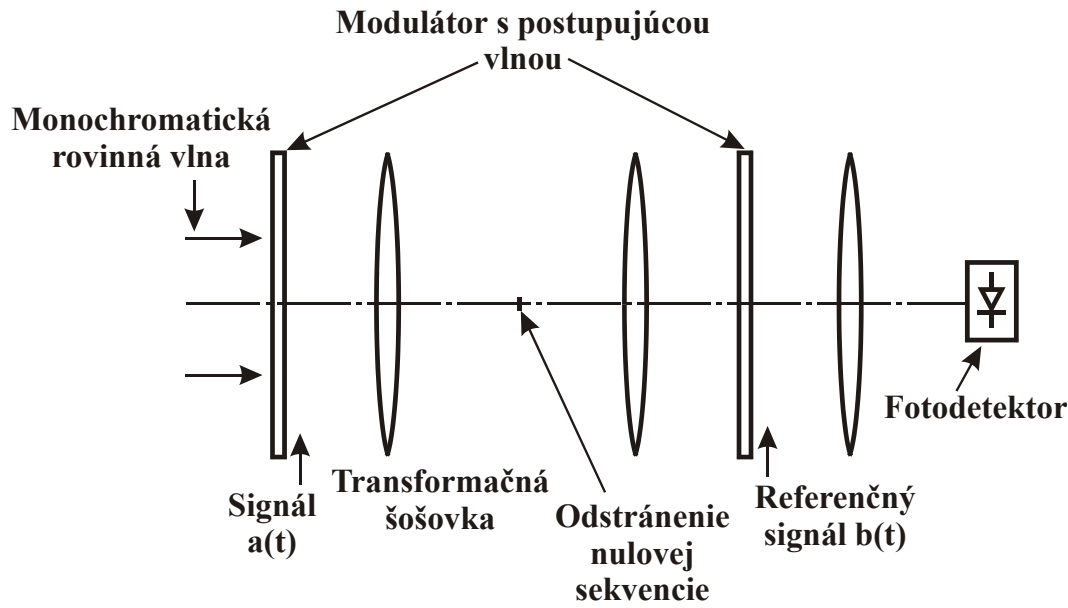
- procesor s tokom údajov 1 **Gbits⁻¹**

- 10^{11} spínacích operácií za jednu sekundu v kocke o hrane 20 **cm**

- rozptýlenie výkonu 100 až 1000 **W**

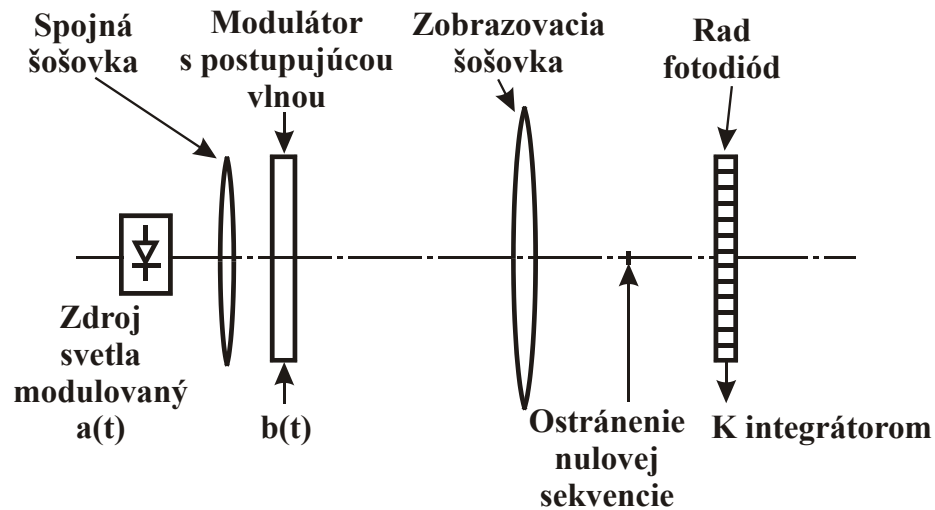
- rozptýlenie výkonu 10^{-8} **W**, menej na jednu spínaciu operáciu za jednu sekundu

Nutná nová výrobná technológia GaAs, alebo prvky – pasívne



(a)

Obr. 4.2 Optické korelátoory s integráciou v (a) priestorovej, (b) časovej oblasti.



(b)

4.1.1 ROZDELENIE OVSP

- **Optické vlákna** pre širokopásmové systémy oproti iným vedeniam (koaxiálne vedenie, **CCD, SAW, MSW**) majú **tlmenie nezávislé od frekvencie modulačného signálu**
- **TB** = 10^5 až 10^6
- **Dynamický rozsah** je ohraničený nelineárnymi útlmovými mechanizmami (najmä stimulovaným Ramanovým rozptylom)

4.1.1 ROZDELENIE OVSP

Ďalšie výhodné vlastnosti

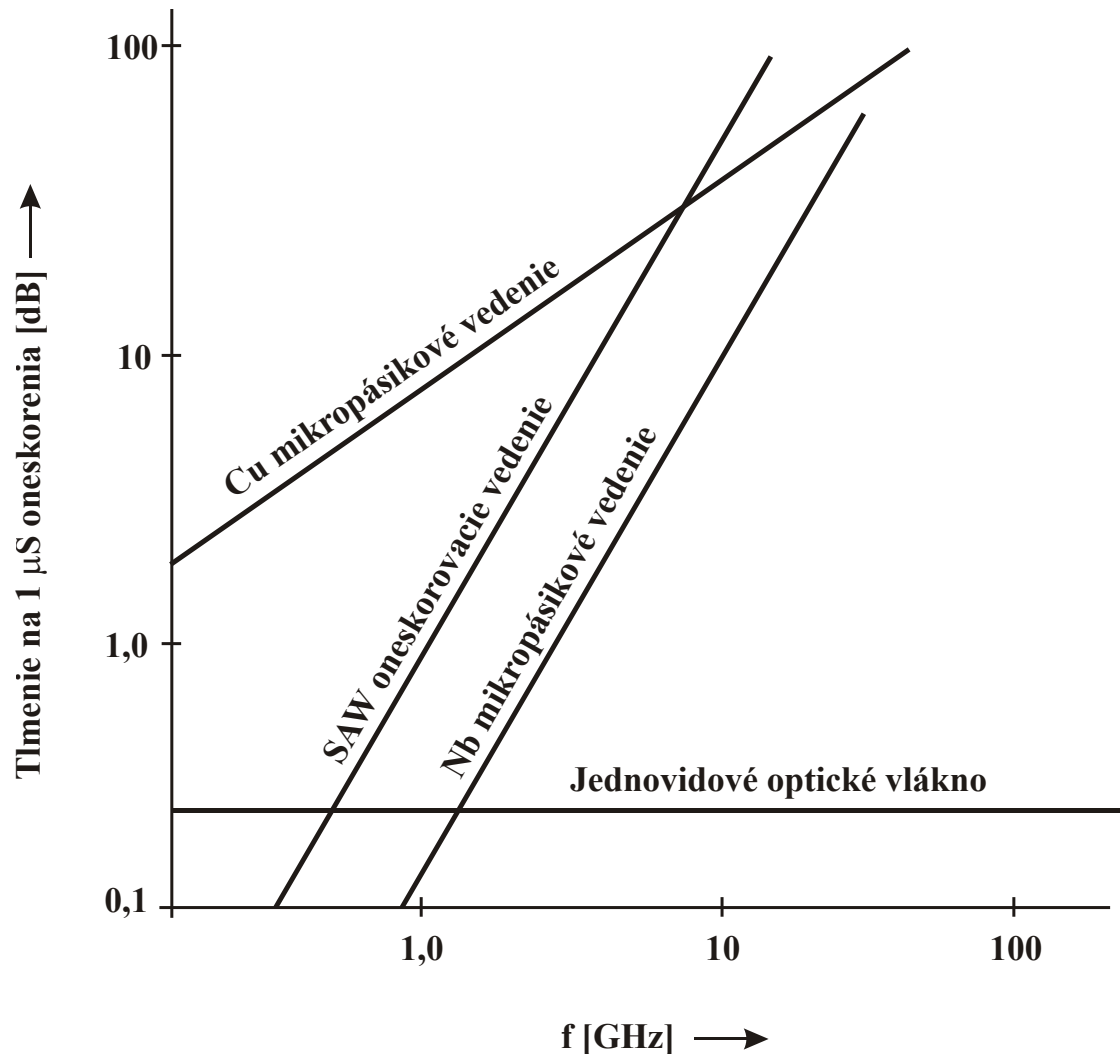
Malé rozmery, flexibilita, presnosť nastavenia časových intervalov medzi odbočnicami, malá citlivosť voči vplyvu okolitého prostredia, odolnosť voči elektromagnetickému rušeniu

OVSP rozdelujeme

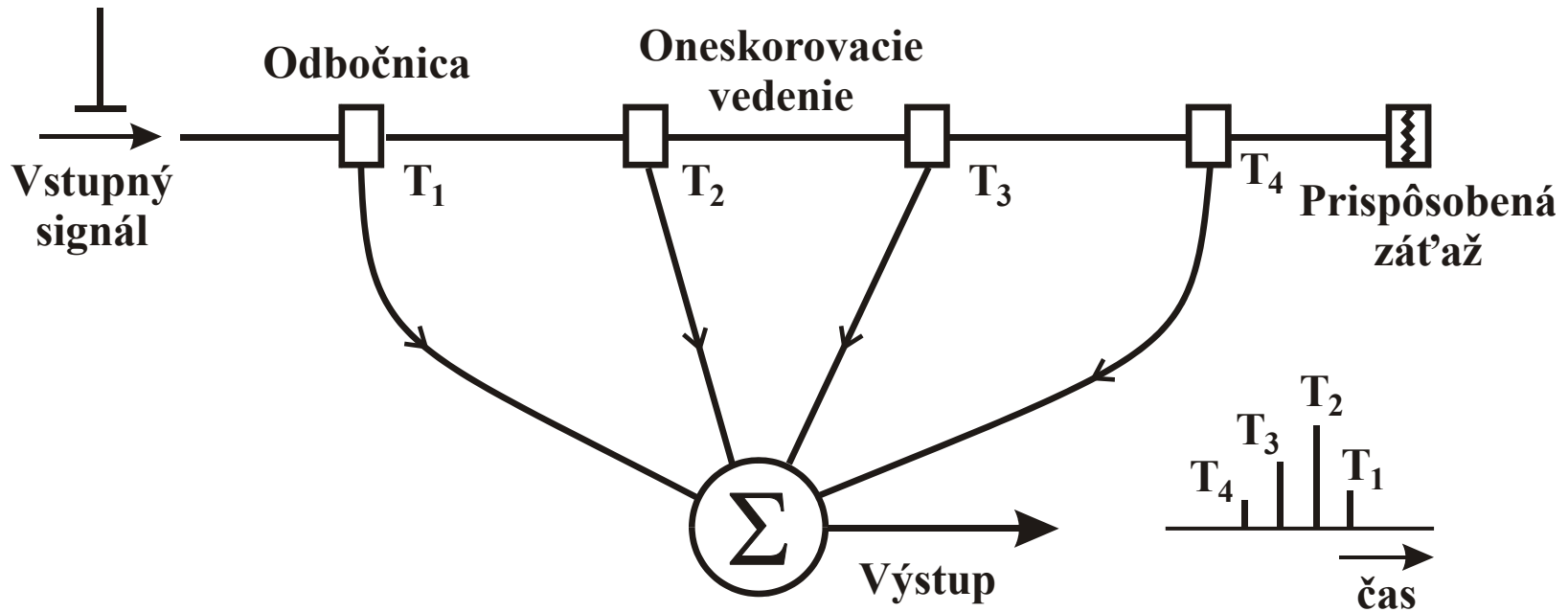
A) OVSP s využitím oneskorovacích vedení

- Recirkulačné oneskorovacie vedenie
- Nerecirkulačné oneskorovacie vedenie

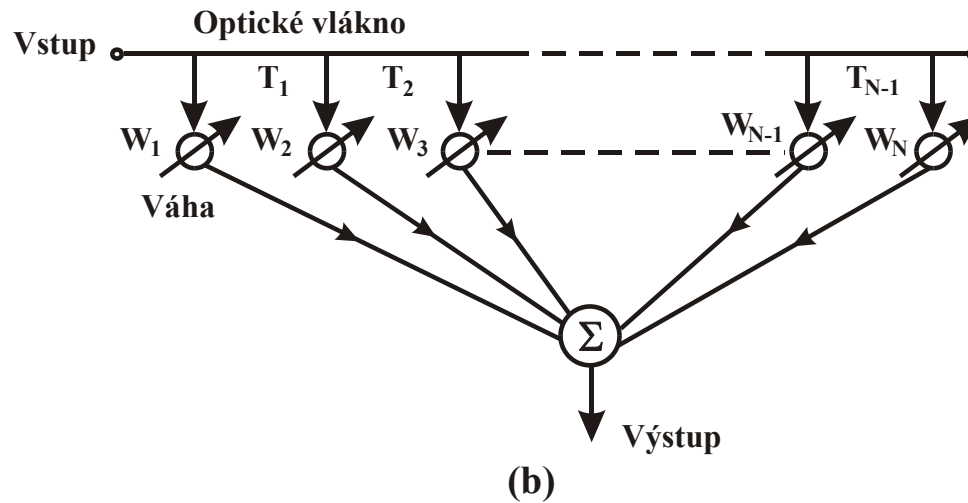
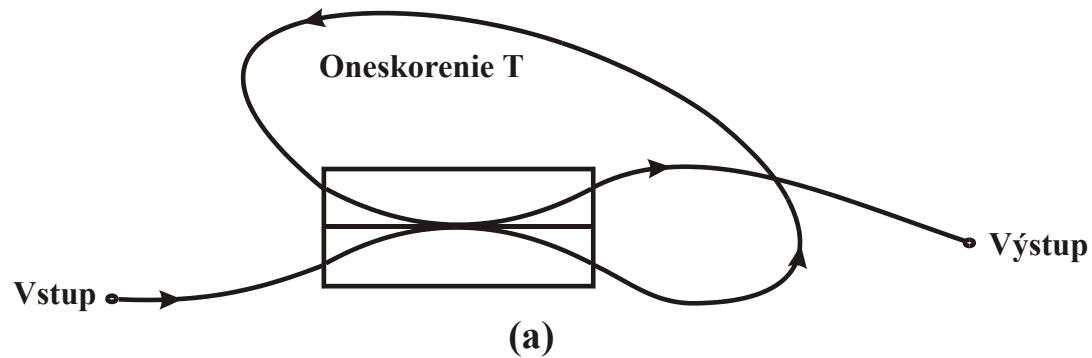
B) OVSP na spracovanie priestorových signálov



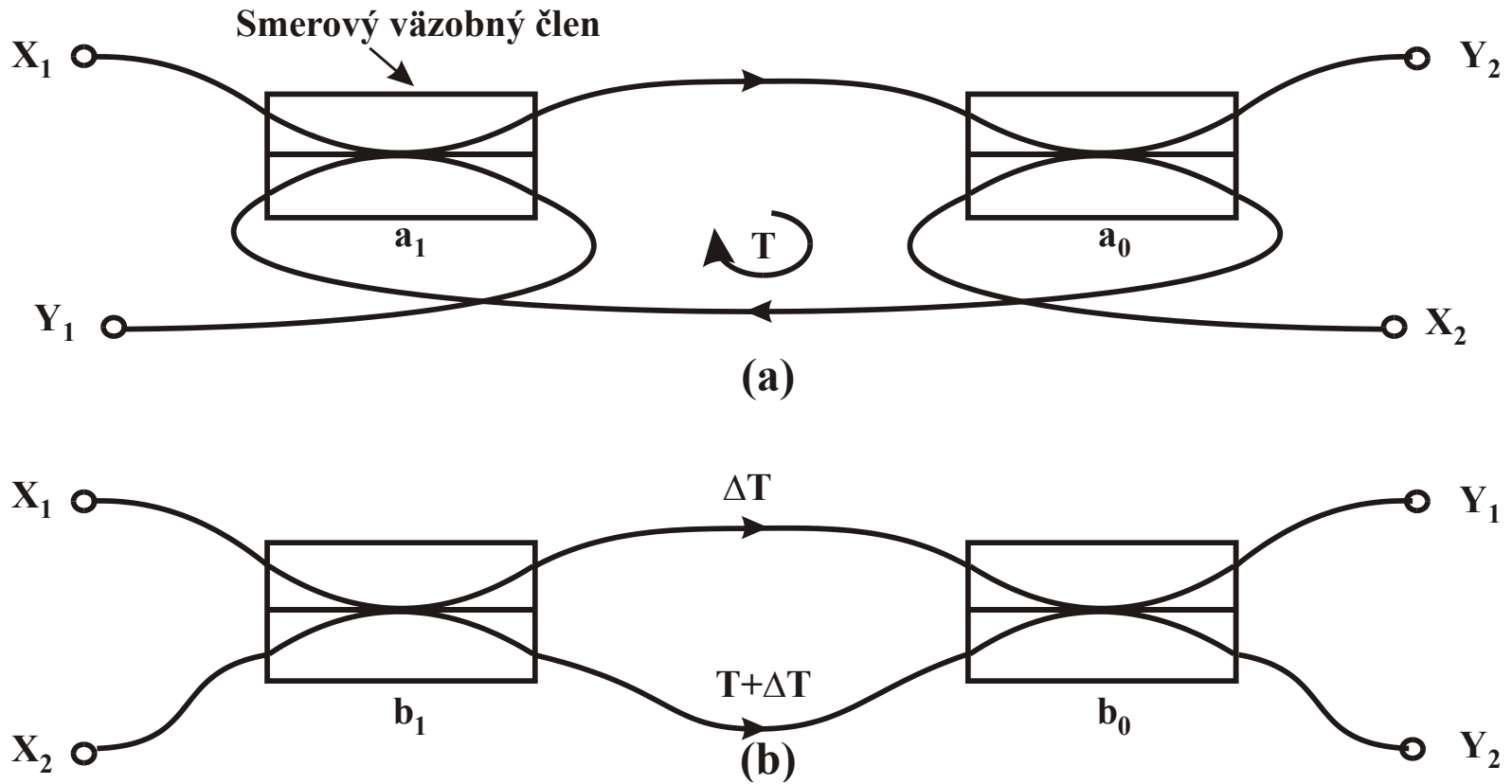
Obr. 4.3 Tlmenie na 1μ s oneskorenia ako funkcia frekvencie pre jednotlivé optické vlákno a iné oneskorovacie vedenia.



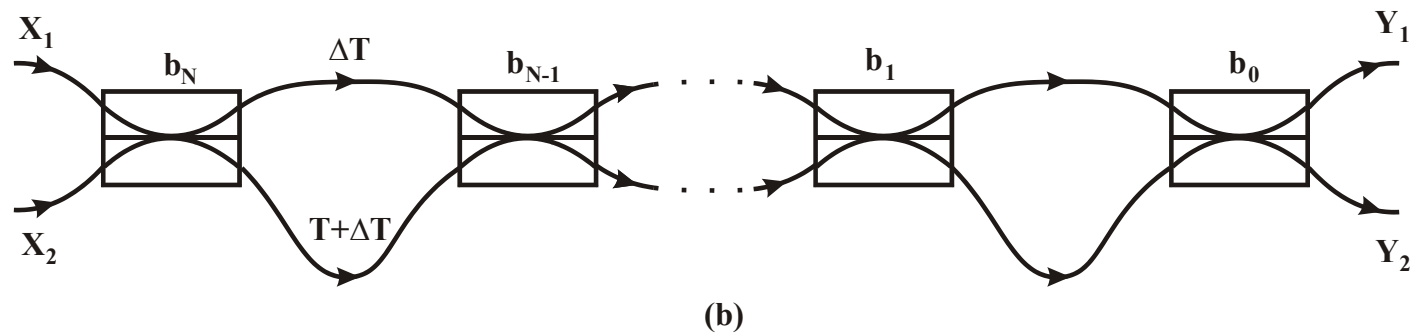
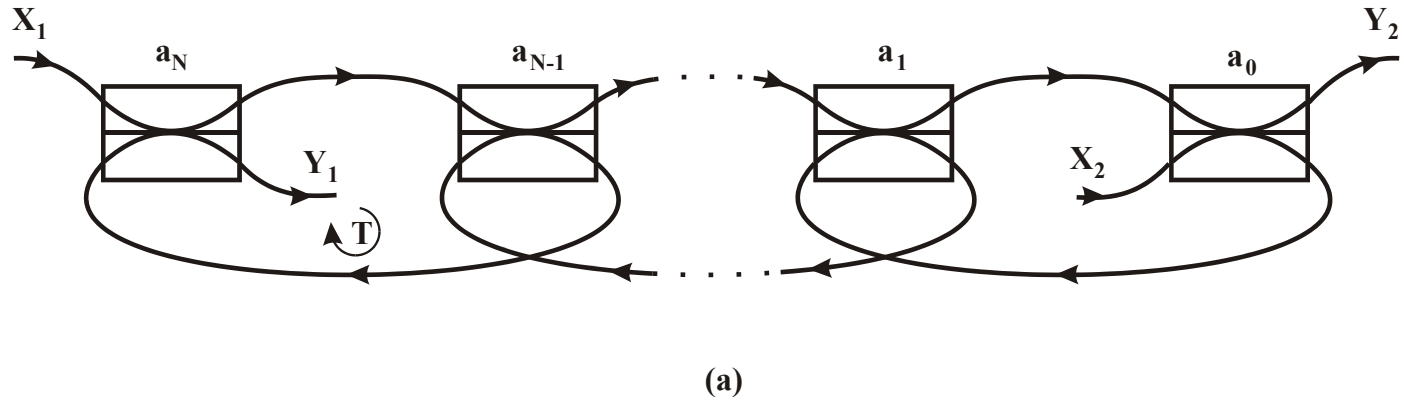
Obr. 4.5 Štruktúra transverzálneho filtra s využitím oneskorovacieho vedenia s odbočnicami.



Obr. 4.6 Základné konfigurácie oneskorovacích vedení:
 (a) recirkulačné oneskorovacie vedenie s oneskorením T ,
 (b) oneskorovacie vedenie s odbočnicami s oneskoreniami T_i ($i = 1, 2, \dots, N-1$) a
 váhami w_i ($i = 1, 2, \dots, N$).



Obr. 4.7 Základne (a) rekurzívne, (b) nerekurzívne prvky OVSP.



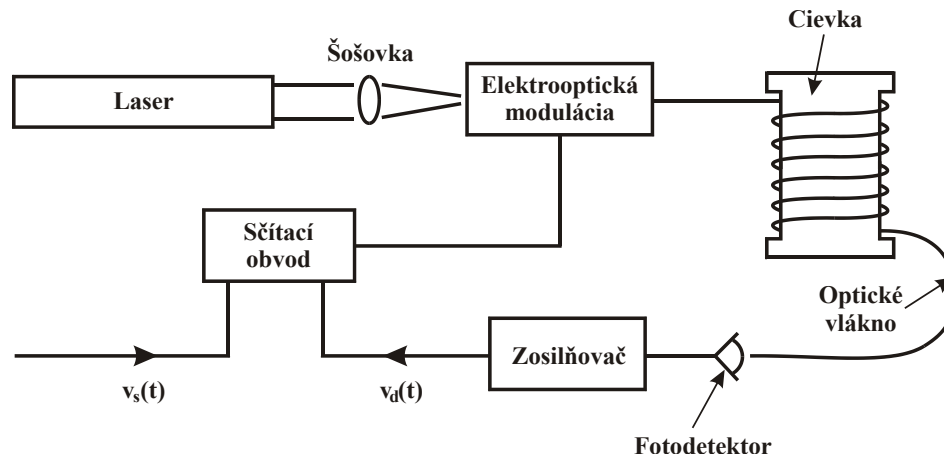
Obr. 4.8 Základné mriežkové štruktúry:
(a) štruktúra N-tého rádu so zápornou spätnou väzbou,
(b) štruktúra N-tého rádu s kladnou spätnou väzbou.

4.2 OVSP S VYUŽITÍM ONESKOROVACÍCH VEDENÍS ODBOČNICAMI

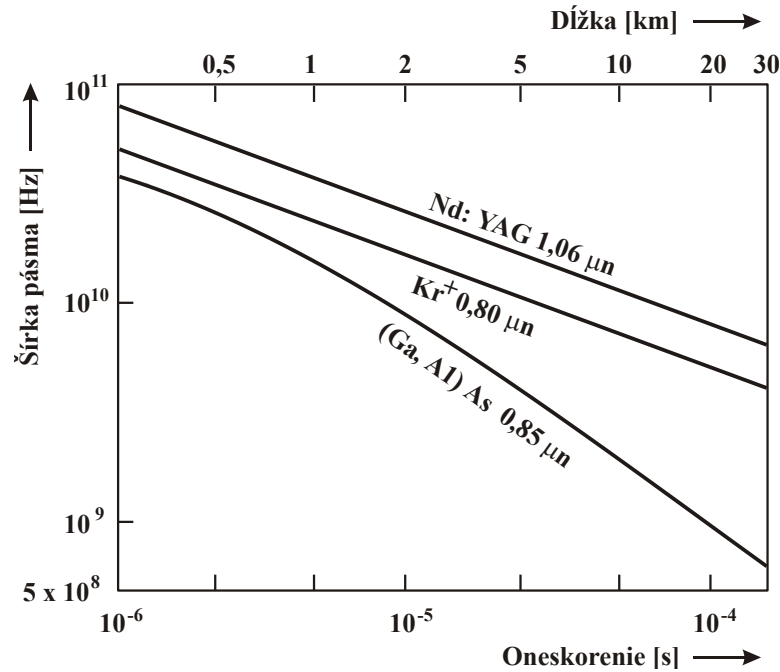
- **Oneskoro vacie vedenie - recirkulačná pamäť**
- **Optické vlákna na báze SiO_2 - hodnota oneskorenia $5 \mu\text{skm}^{-1}$**
- **Optické vláknové oneskorovacie vedenie s premennou dĺžkou**
- **Čas prepnutia integrovaných optických prepínačov je veľmi malý ($\sim 1 \text{ ns}$)**

4.2 OVSP S VYUŽITÍM ONESKOROVACÍCH VEDENÍS ODBOČNICAMI

- **Flexibilný a programovateľný optický vláknový transverzálny filter**
 - **Odbočnice realizované elektronicky**
 - **Oneskorenie medzi jednotlivými odbočnicami 500 ps**
 - **Realizácia konvolúcie a vzájomnej konvolúcie signálov s prenosovou rýchlosťou Gbits⁻¹**
 - **Frekvenčné filtre v pásme od 0 do 1,3 GHz**

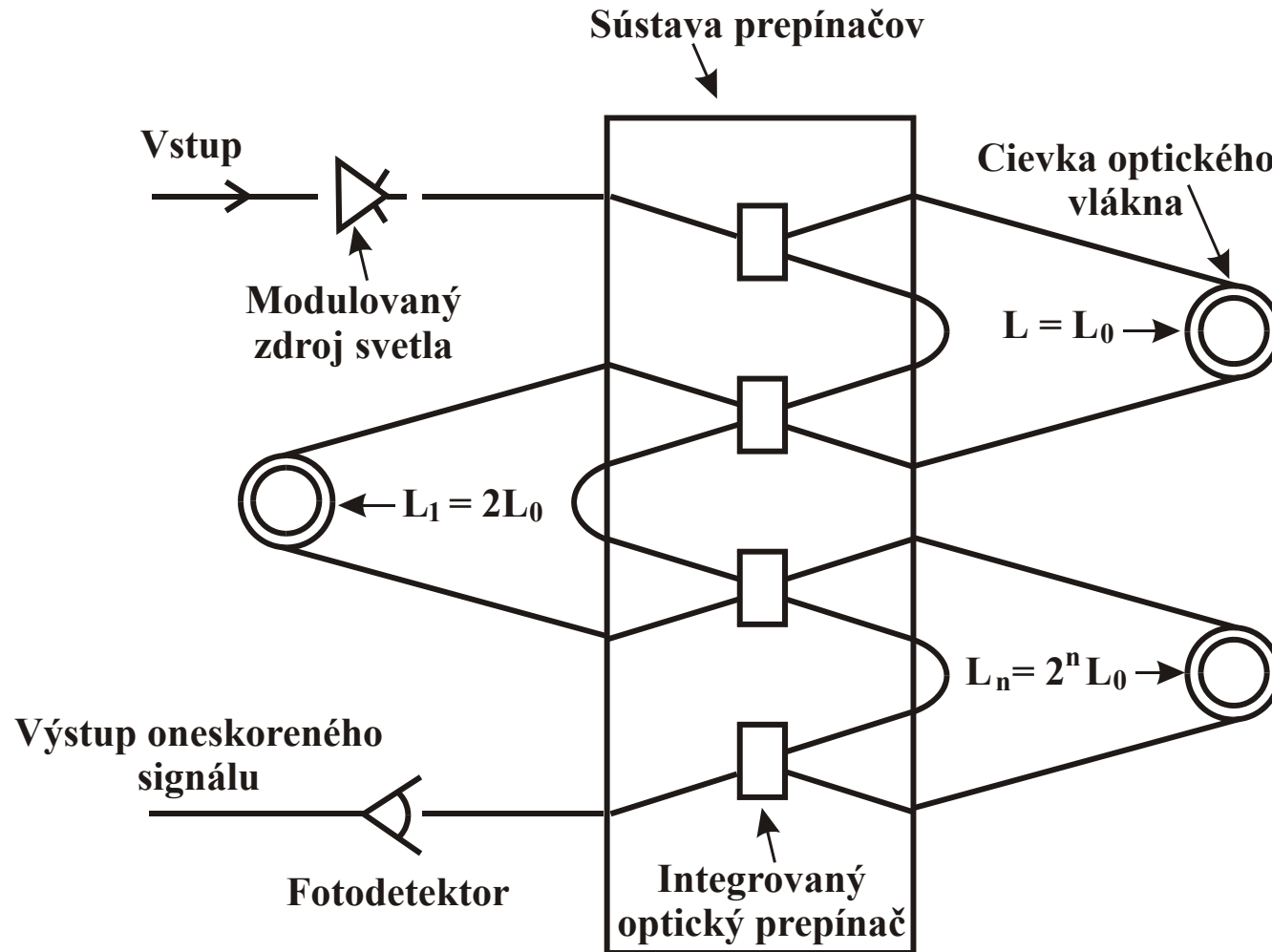


Obr. 4.9 Zapojenie recirkulačného oneskorovacieho vedenia tvoreného optickým vláknom.

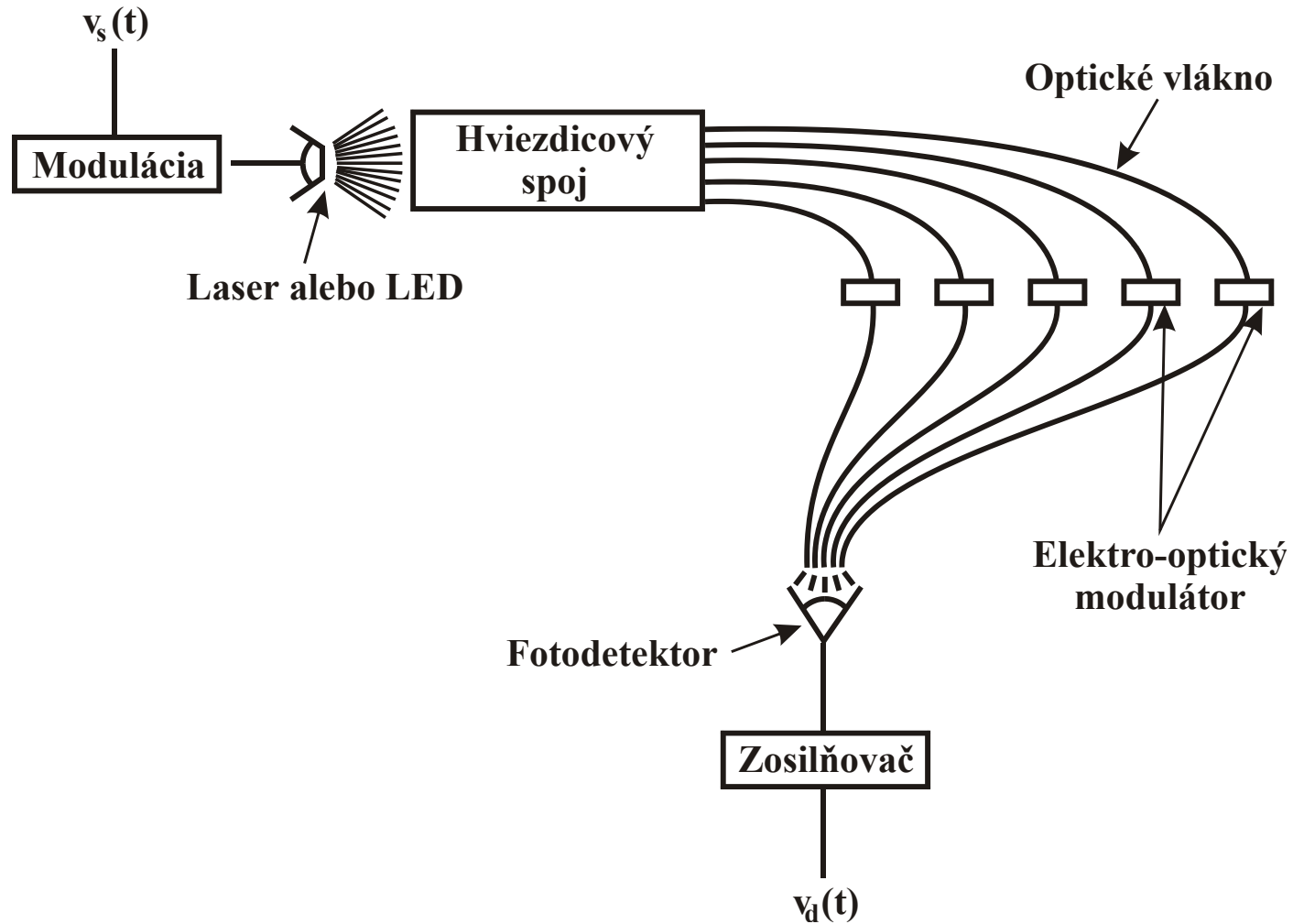


Obr. 4.10 Oneskorenie ako závislosť šírky frekvenčného pásma, dĺžky OV a typu zdroja svetla.

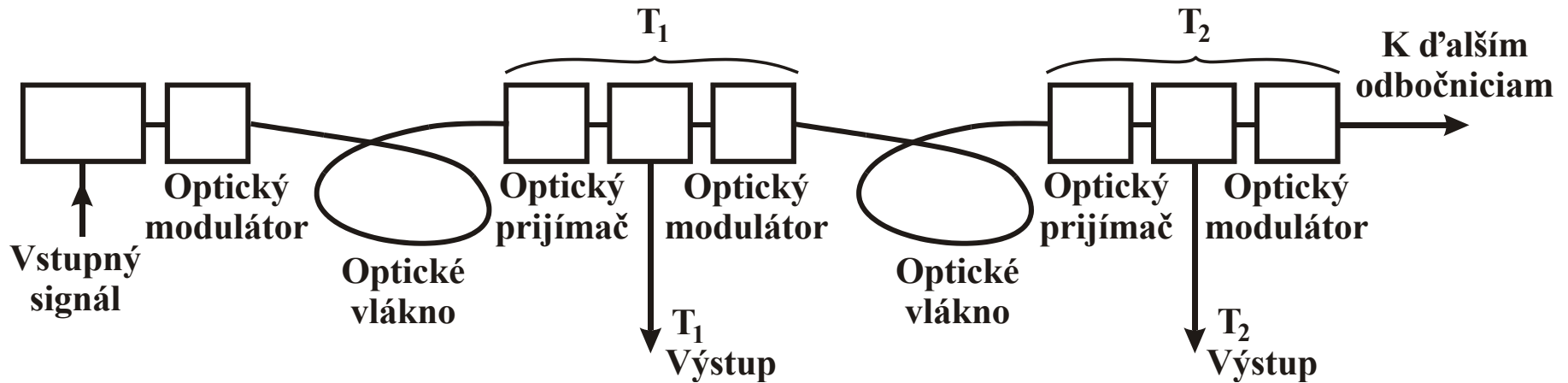
- **Optická odbočnica s využitím V-drážok**
- **Principiálnym ohraničením OVSP s optickými odbočnicami je, že ich váhové koeficienty sú reálne a kladné**
- **Odbočnice sú realizované ultrazvukovými fázovými modulátormi**
- **Využitie - Smart Antény**
 - **Pamäť rádiolokačného signálu**
 - **Riadenie fázy fázovaných anténových sústav**
 - **Spracovanie signálov z jednotlivých prvkov anténovej sústavy**
 - **Zisťovanie uhla dopadu rovinatej elektromagnetickej vlny (t.j. smeru príchodu signálu)**
 - **Zisťovanie polohy, smeru a rýchlosti cieľa**
- **Generátor kódu**



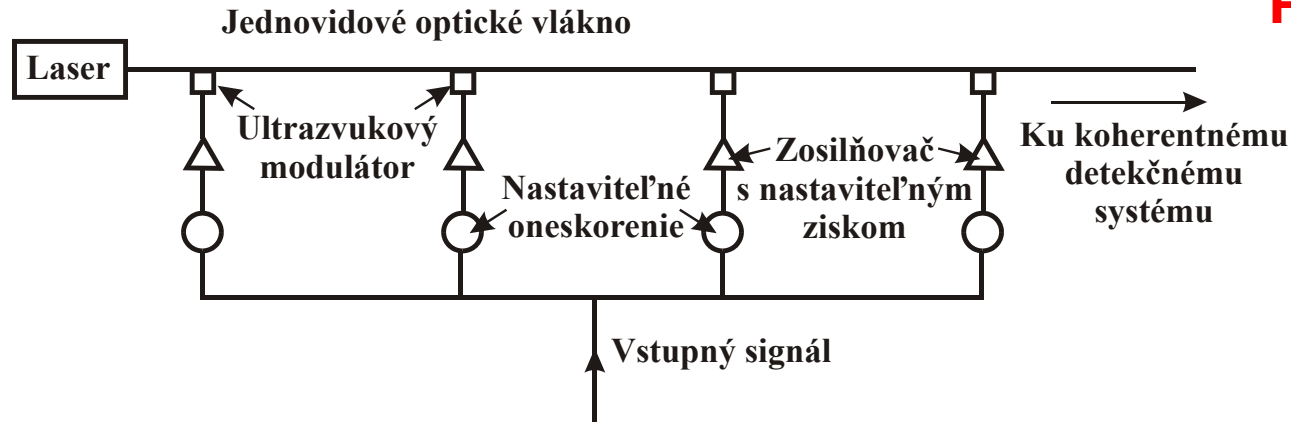
Obr. 4.11 Optické vláknové oneskorovacie vedenie s meniteľným oneskorením.



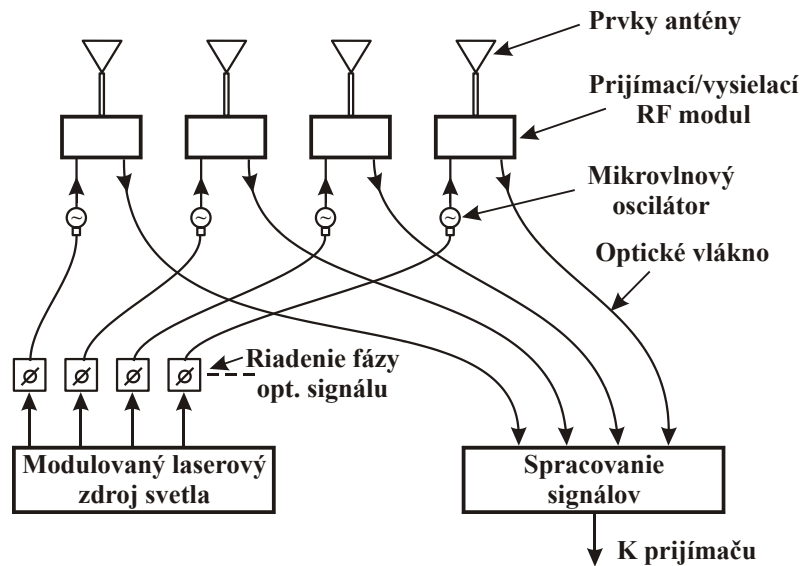
Obr. 4.12 Optický vláknový transverzálny filter.



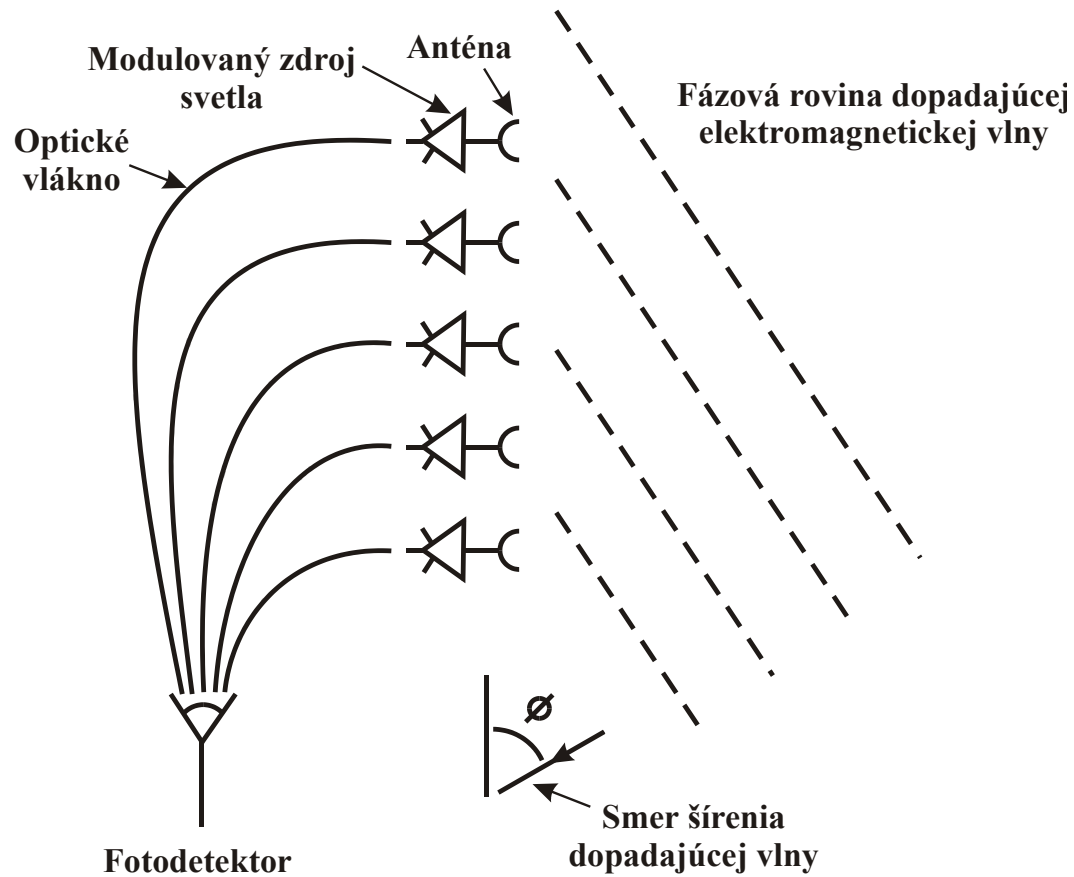
Obr. 4.13 Optické vláknové oneskorovacie vedenie s elektronickými odbočnicami.



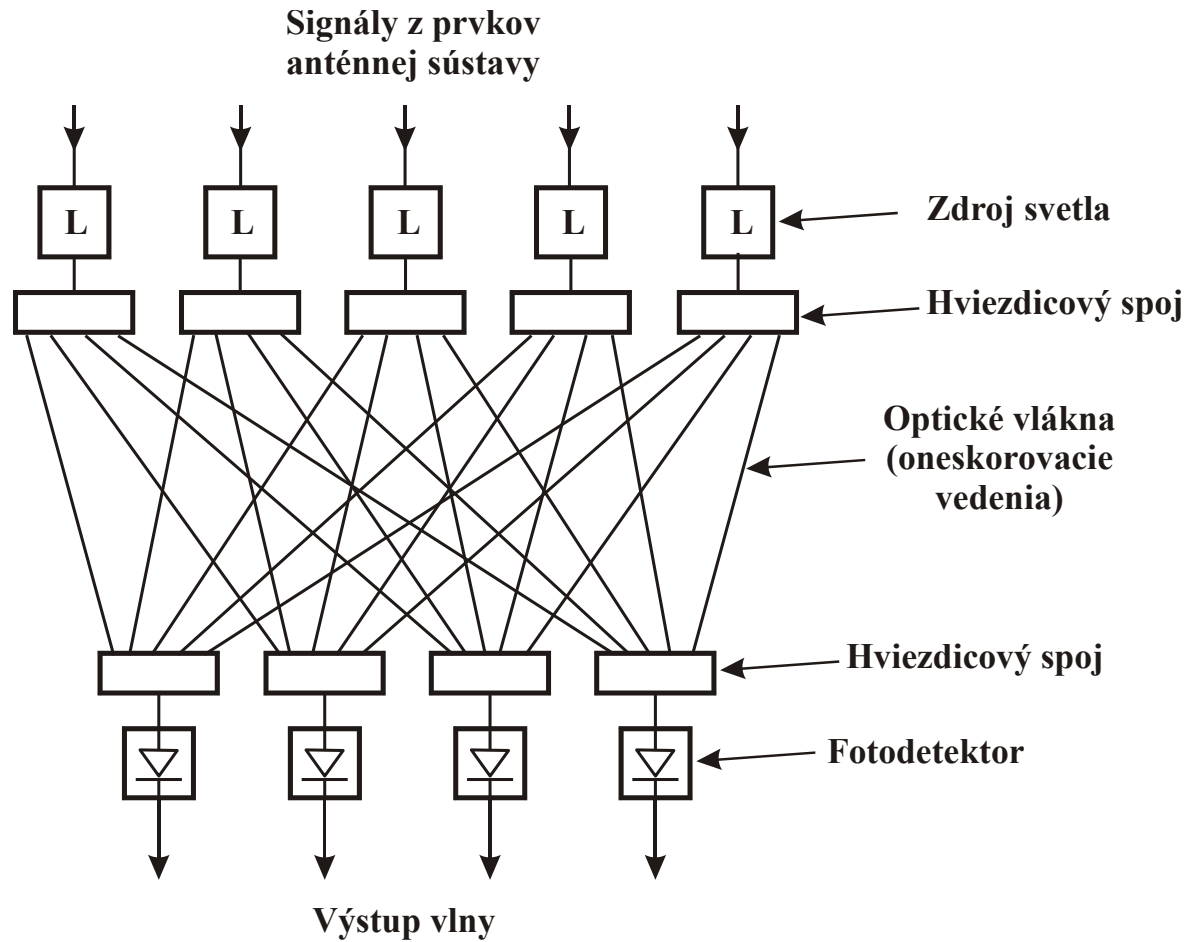
Obr. 4.14 Optický vlákňový transversálny filter s ultrazvukovou moduláciou.



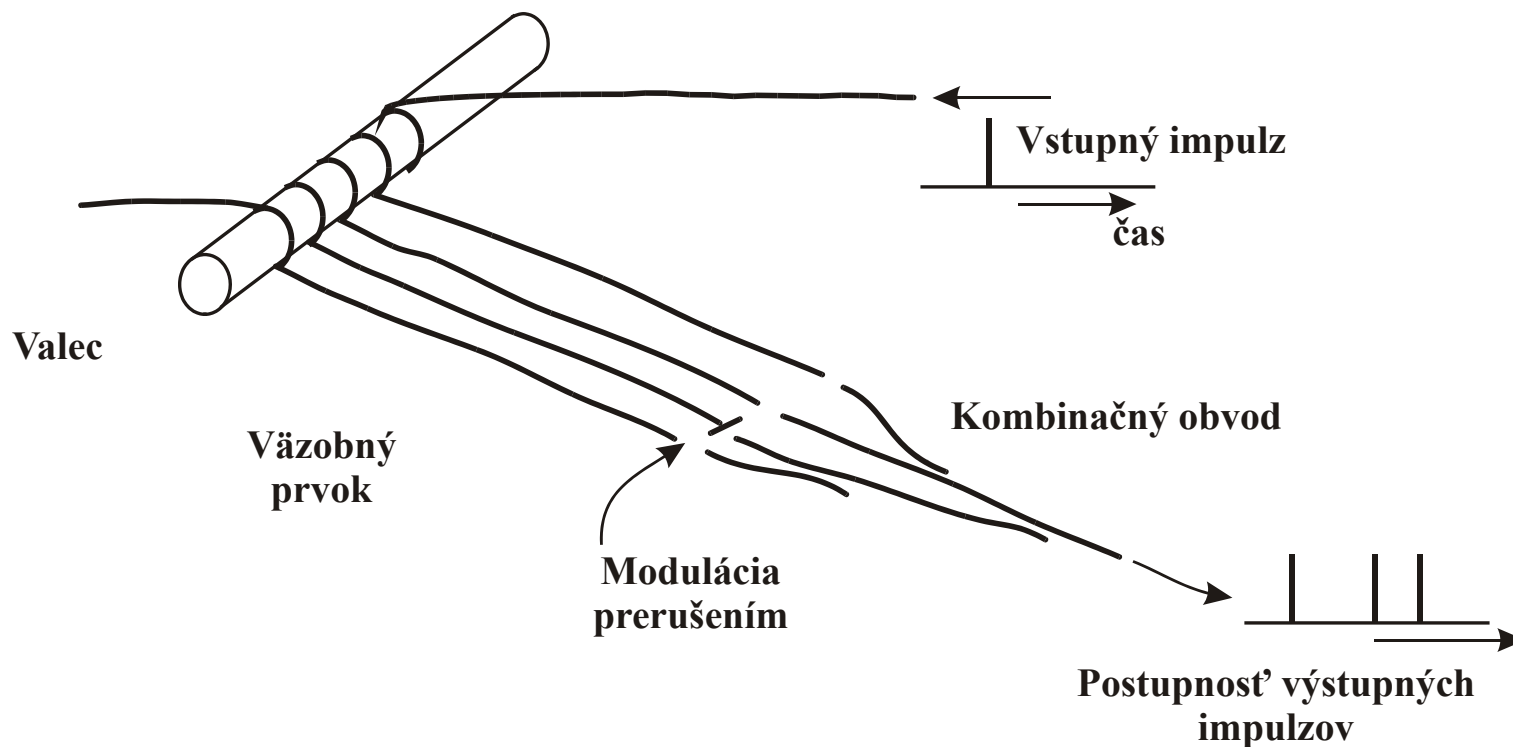
Obr. 4.15 Použitie optických vlákien na riadenie fázy vyžarovacích (prijímacích) prvkov anténovej sústavy radaru.



Obr. 4.16 OVSP použitý na zistenie uhlu dopadu rovinnej elektromagnetickej vlny.



Obr. 4.17 OVSP použitý na spracovanie signálov z anténovej sústavy.



Obr. 4.18 Číslicový optický vláknový generátor kódu.

4.3 RECIRKULAČNÉ OVSP

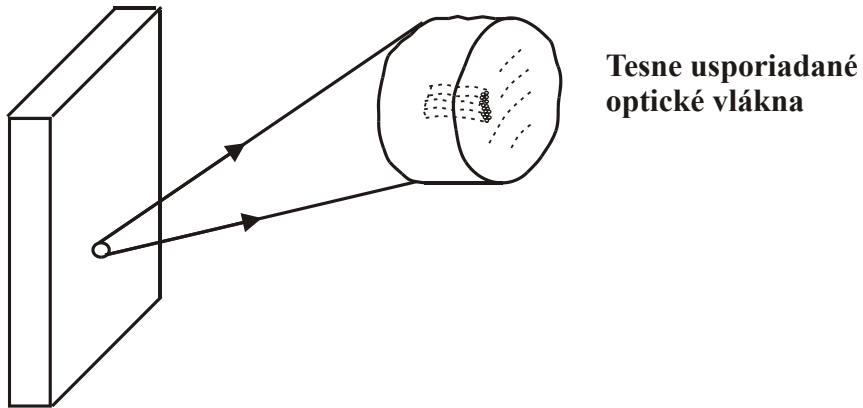
- **Jednoduchý recirkulačný OVSP**
Pozostáva zo smerovej odbočnice a zo spätnoväzobnej recirkulačnej slučky optického vlákna
- **Aplikácie OVSP**
 - **Generácia postupnosti veľmi rýchlych rovnakých impulzov**
 - **Frekvenčná filtrácia**
 - **Hrebeňová filtráciu signálov**
 - **Hlboké zárezy (-55 dB)**
 - **S rovnomerným odstupom asi 1 GHz**

4.4 OVSP S MRIEŽKOVOU ŠTRUKTÚROU

- **Rekurzívne**
- **Nerekurzívne prvky**
- **Mriežkové štruktúry** so zápornou alebo kladnou spätnou väzbou vznikajú kaskádnym zapojením elementárnych rekurzívnych alebo nerekurzívnych prvkov
- **Modulárna konštrukcia**

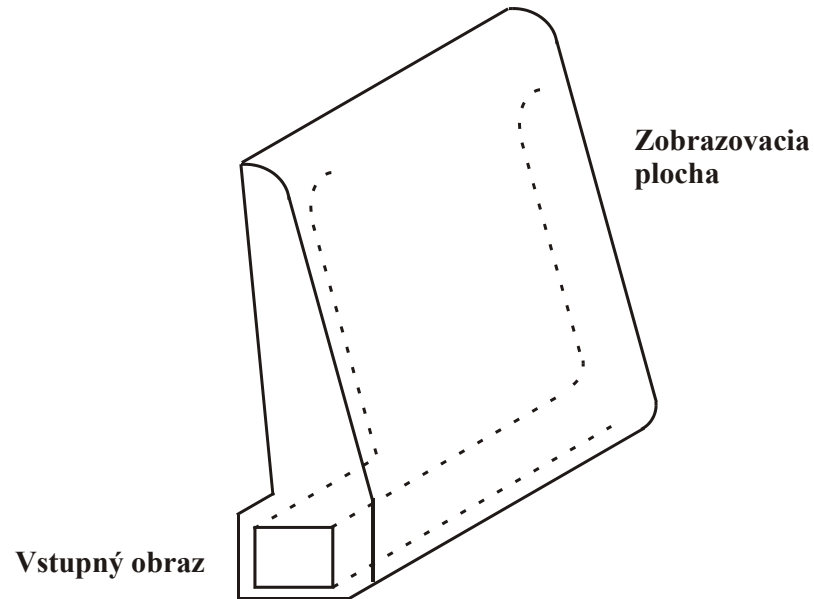
4.5 OVSP NA SPRACOVANIE PRIESTOROVÝCH SIGNÁLOV

- **Jednoduchá diskretná optická vláknová obrazová rovina tzv. faseta**
- **Geometrické korekcie obrazu**
- **Realizácia geometrickej transformácie**
 - **Optický Fourierov procesor**
 - **Realizácia iných diskretných transformácii signálov**



Tesne usporiadané
optické vlákna

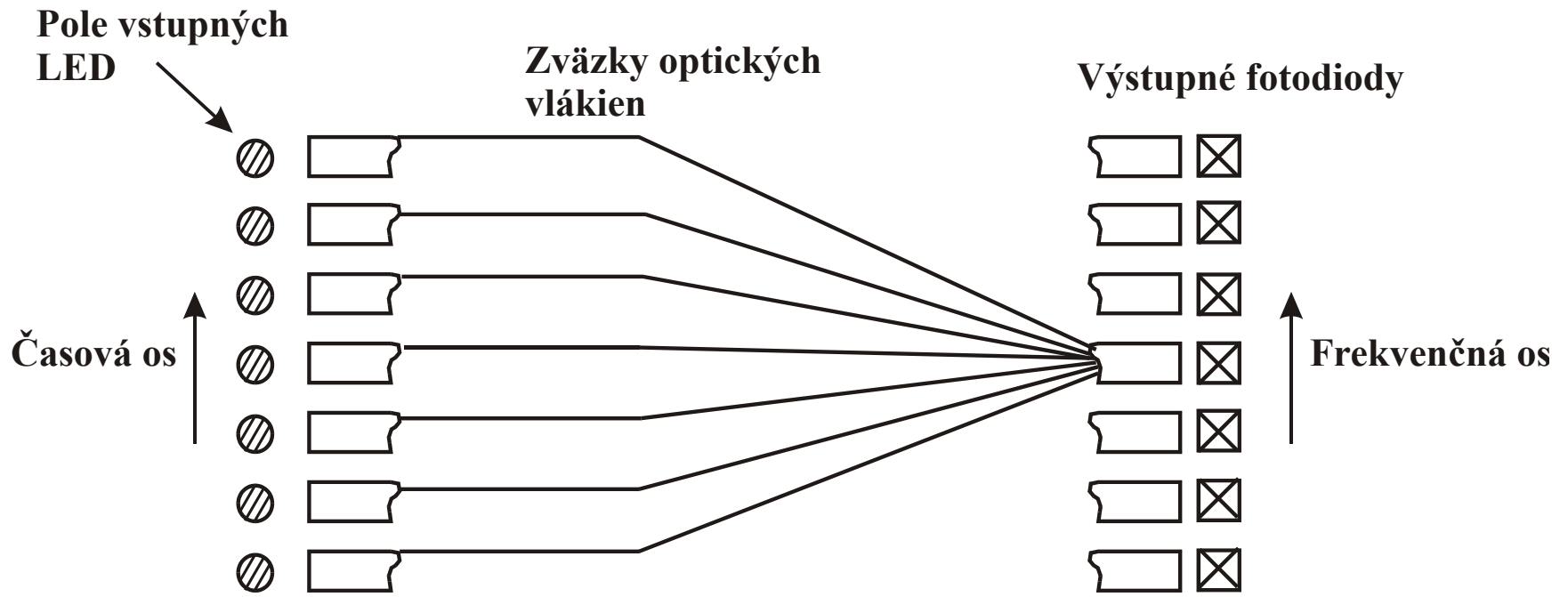
Obr. 4.19 Jednoduchá diskretná optická vláknová obrazová rovina.



Zobrazovacia
plocha

Vstupný obraz

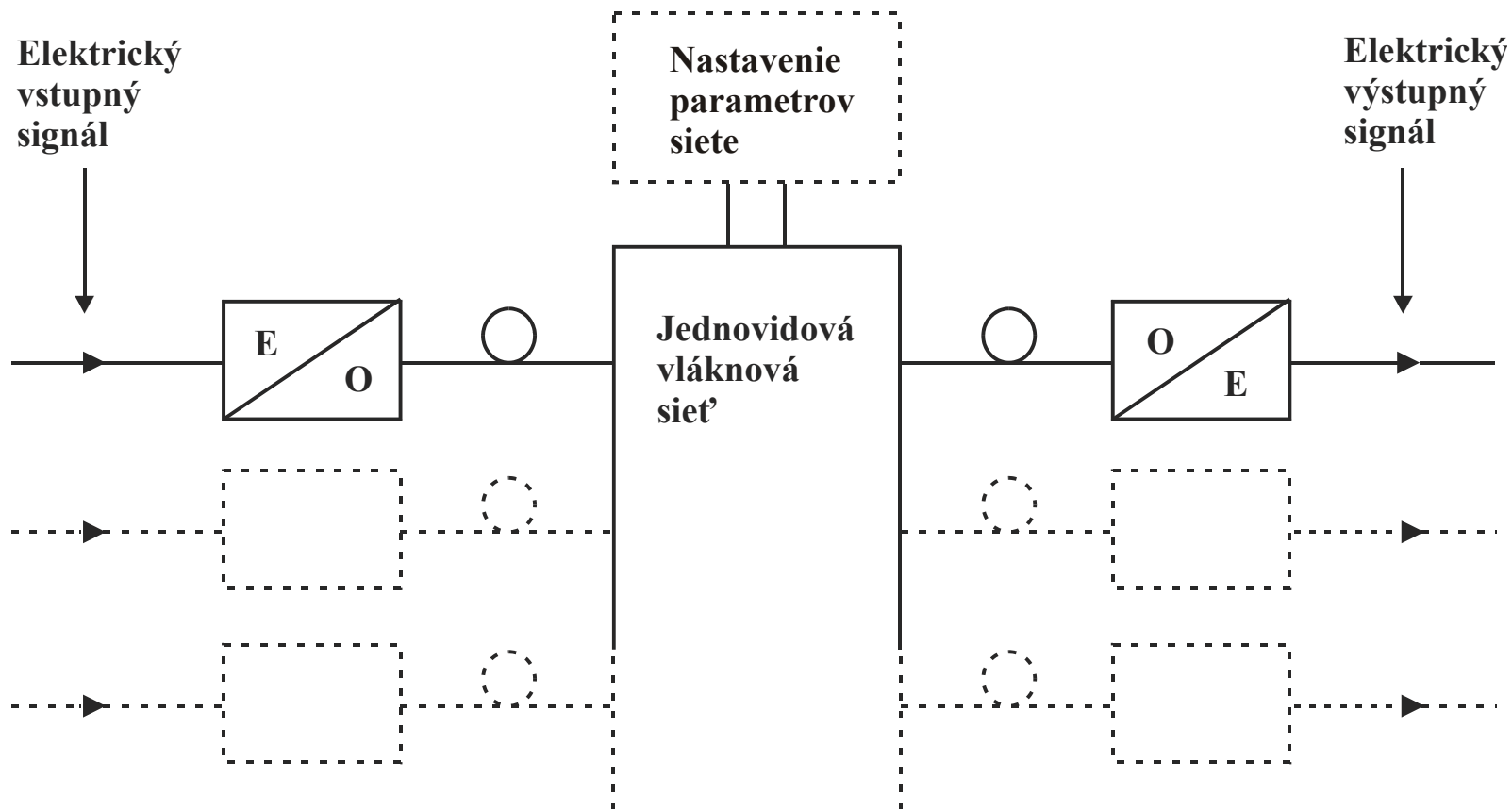
Obr. 4.20 Optický vláknový displej.



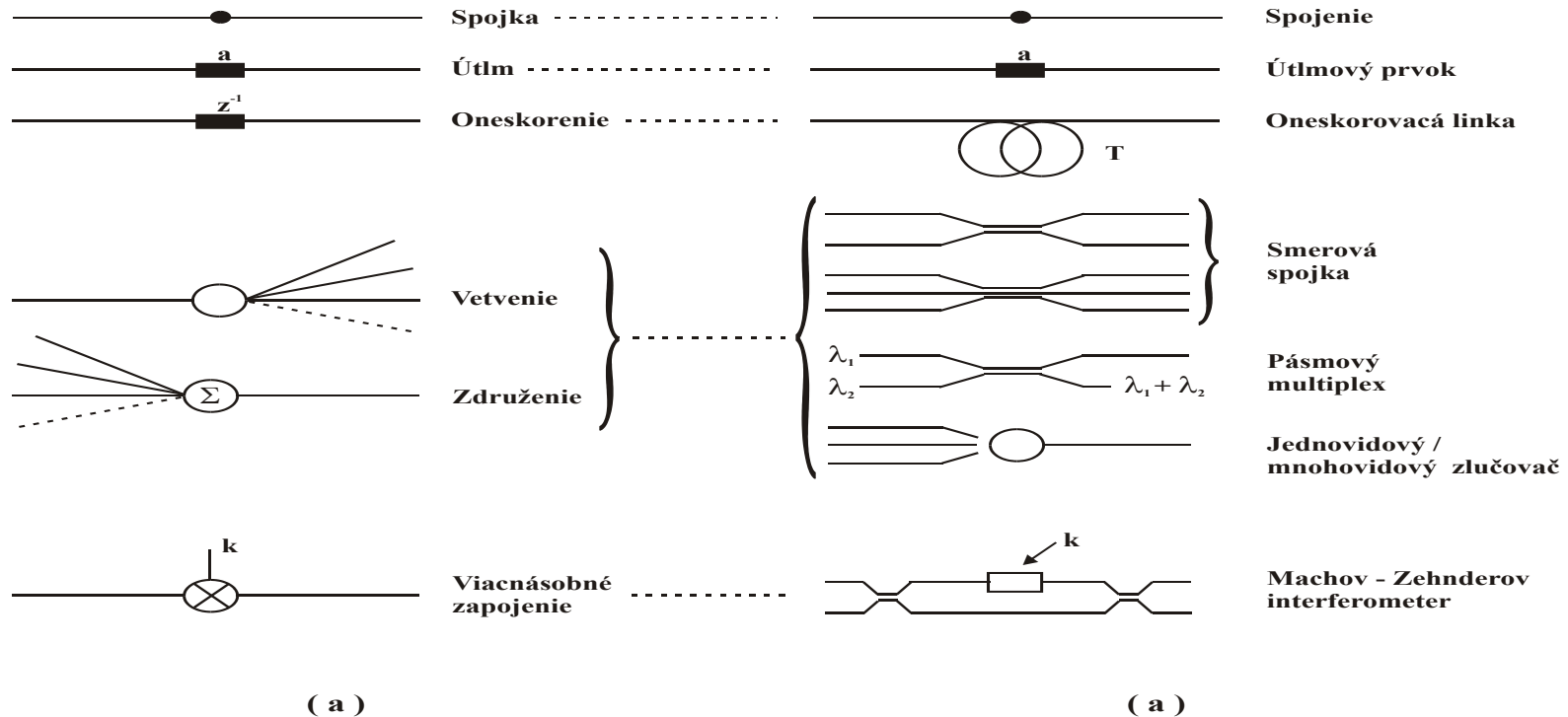
Obr. 4.21 Diskrétny Fourierov transformačný procesor s využitím optického vláknového transformačného systému.

4.6 ZOVŠEOBECNENÁ ARCHITEKTÚRA OVSP

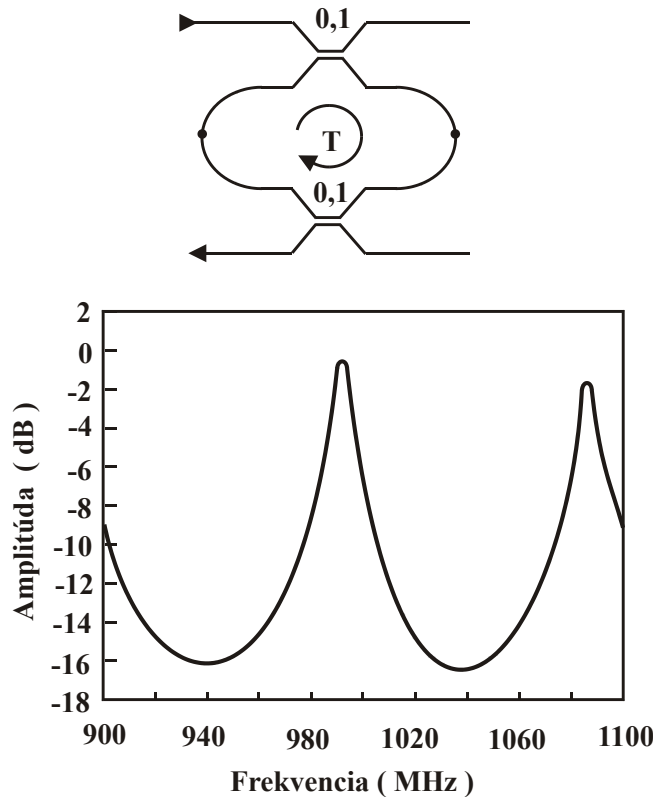
- **Architektúra zovšeobecneného OVSP s využitím siete jednovidových OV**
- **E/O, O/E prevodníky**
- **Optické vláknové analógy prvkov spracovania signálov**
- **Spätnoväzbový filter, hrebeňový filter**
- **Optický vláknový Machov-Zehnderov interferometer - Preladiteľný hrebeňový filter**
- **Násobenia vektora maticou**
- **Aplikácie**
 - **Spracovanie signálov z fázovanej anténovej sústavy**
 - **Prispôsobený filter**
 - **Rýchly generátor kódu**
 - **Korelátor**



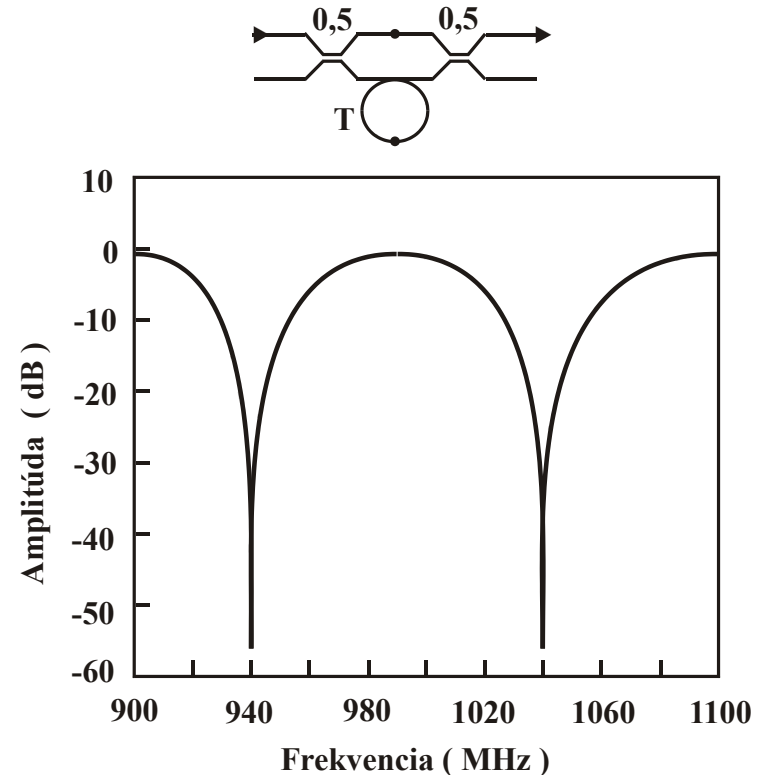
Obr. 4.22 Architektúra zovšeobecneného OVSP.



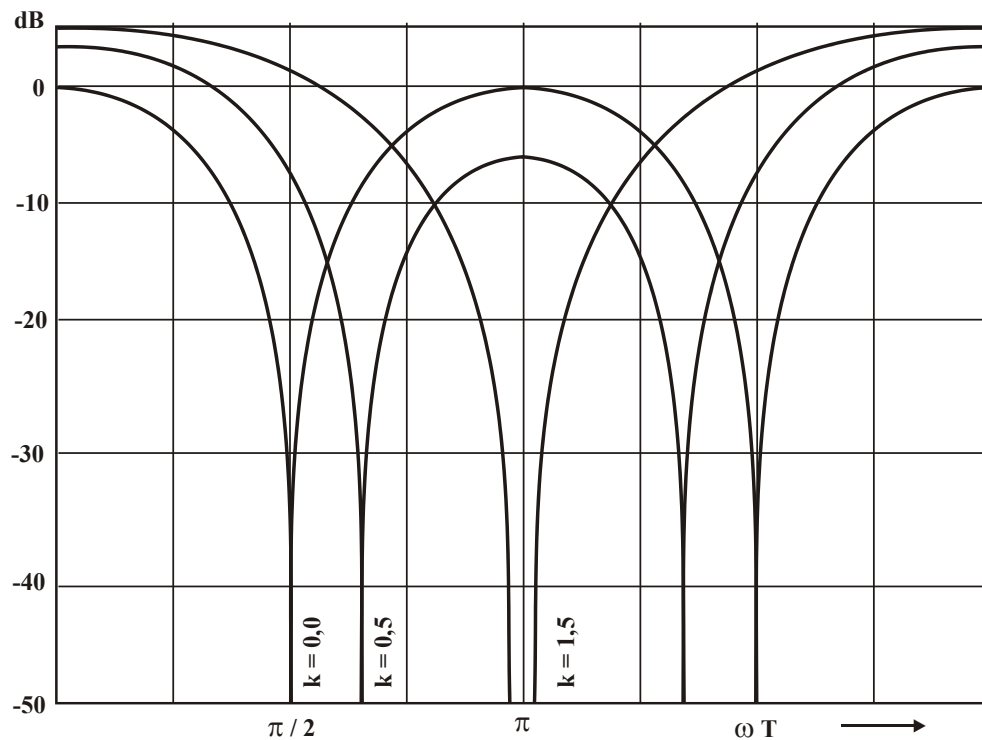
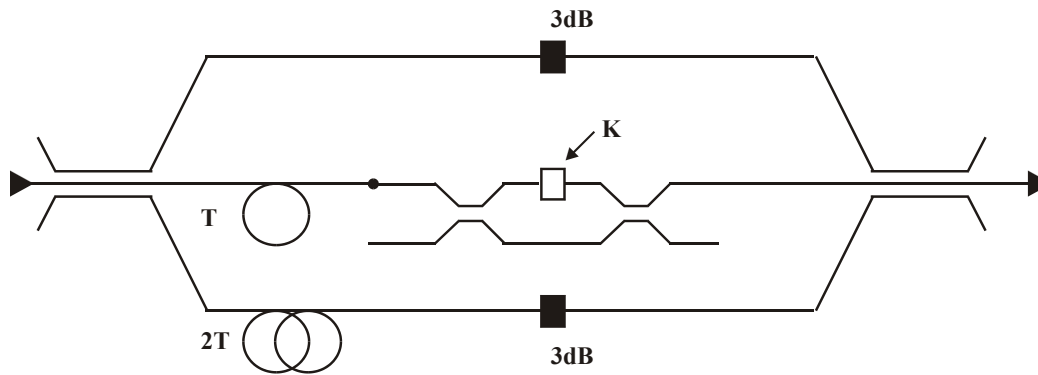
Obr. 4.23 Funkčné prvky spracovania signálov (a) a ich optické vláknové analógy (b).



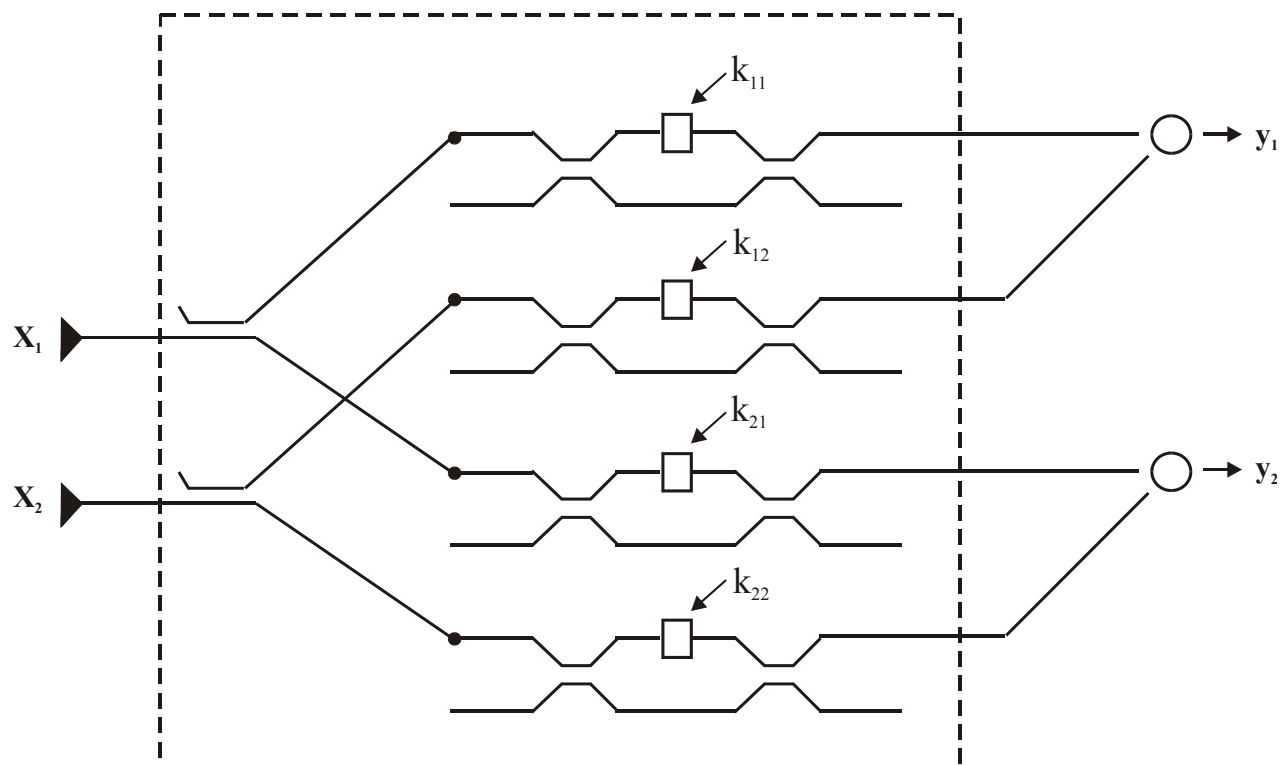
Obr. 4.24 Optický vláknový spätnoväzobný filter.



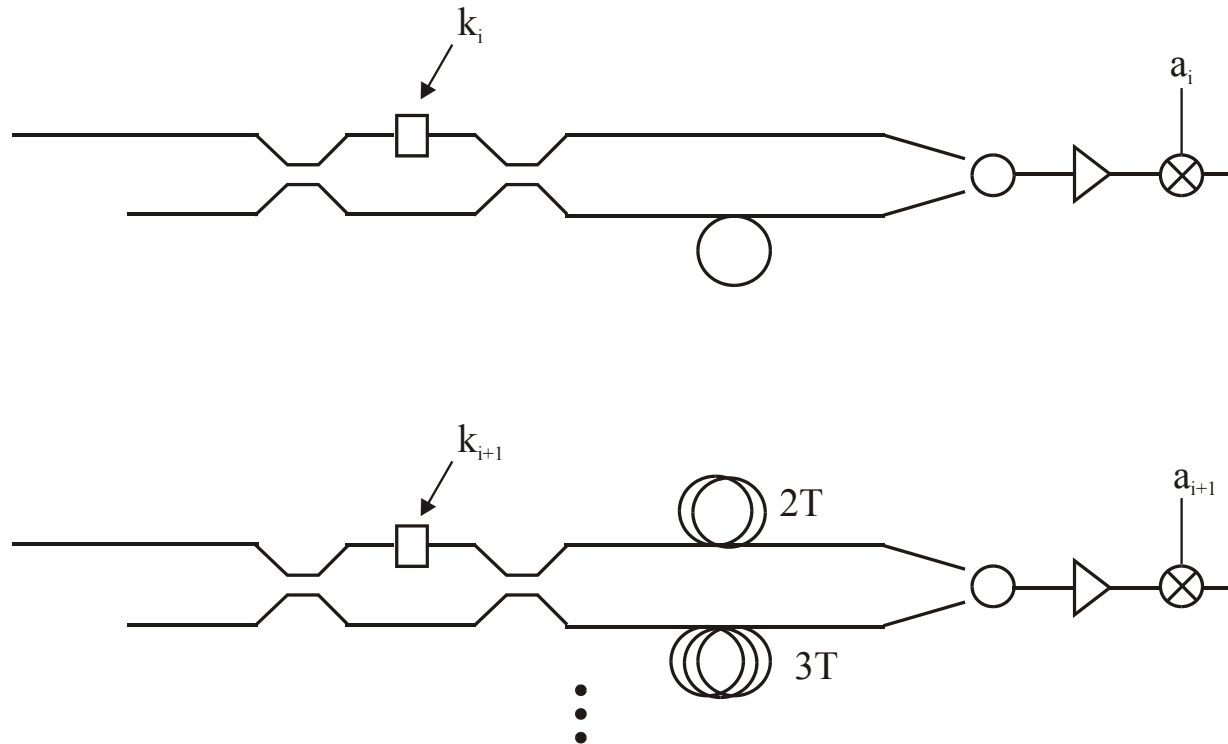
Obr. 4.25 Optický vláknový hrebeňový filter.



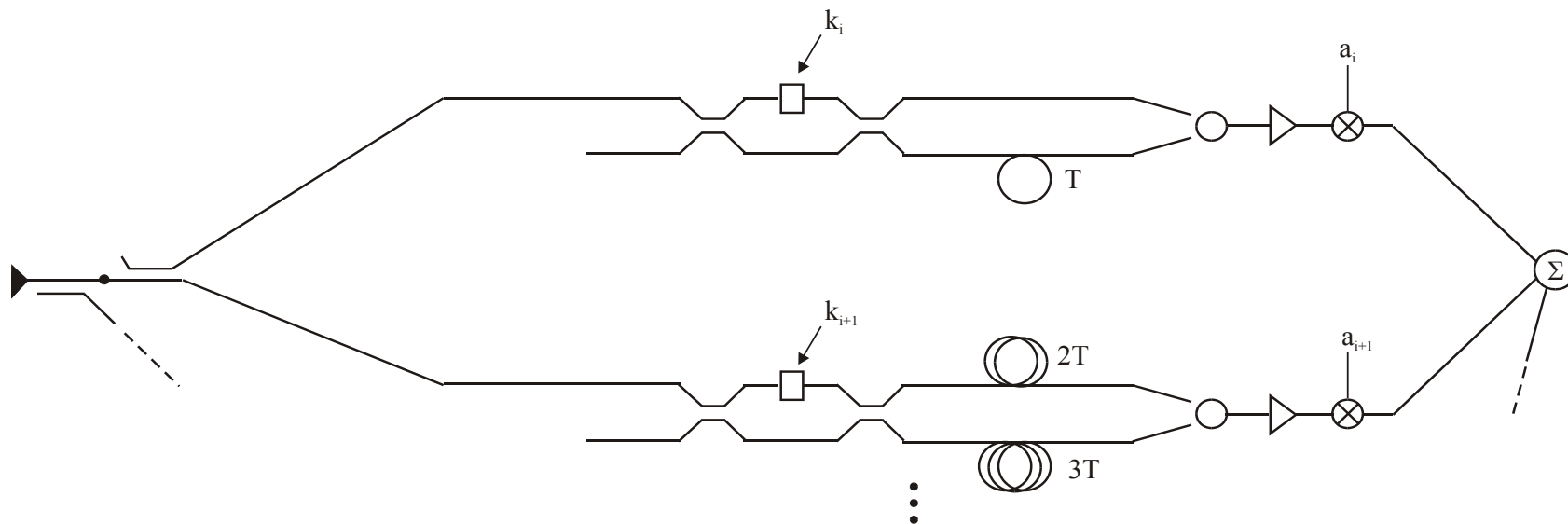
Obr. 4.26 Preladiteľný optický vláknový hrebeňový filter.



Obr. 4.27 Optická vláknová násobička vektora maticou.



Obr. 4.28 OVSP na spracovanie signálov z fázovanej anténovej sústavy.



Obr. 4.29 Optický vláknový prispôsobený filter.

4. 7 ANALÝZA OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH OBVODOV

4.7.1 JONESOVA MATICOVÁ REPREZENTÁCIA

- **Jonesova maticová reprezentácia**
- Vzťah medzi vstupným E_i a výstupným E_o vektorom

$$E_o = [J] E_i \quad (4.7.1)$$

- **Jonesova matica optického prvku**

$$[J] = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} \quad (4.7.2)$$

- **Vektor intenzity elektrického poľa**

$$E_i = \begin{bmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ix} e^{j\phi_{ix}} \\ A_{iy} e^{j\phi_{iy}} \end{bmatrix} \quad (4.7.3)$$

$$E_o = \begin{bmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{0x} e^{j\phi_{0x}} \\ A_{0y} e^{j\phi_{0y}} \end{bmatrix} \quad (4.7.4)$$

4.7.2 VLASTNOSTI JONESOVEJ MATICE

- **Kaskádne zapojenie**

$$[J] = [J_m][J_{m-1}] \dots [J_1] \quad (4.7.5)$$

- **Lineárny a bezstratový optický systém**
- **Prenosové matice sú unitárne**

$$[J] = \begin{bmatrix} J_{xx} & -J_{yx}^* \\ J_{yx} & J_{xx}^* \end{bmatrix} \quad (4.7.6)$$

$$|J_{xx}|^2 + |J_{yx}|^2 = 1 \quad (4.7.7)$$

- **Všeobecný tvar**

$$[U(\alpha, \phi_A, \phi_B)] = \begin{bmatrix} \cos \alpha \exp j\phi_A & -\sin \alpha \exp -j\phi_B \\ \sin \alpha \exp j\phi_B & \cos \alpha \exp -j\phi_A \end{bmatrix} \quad (4.7.8)$$

- **Tri reálne parametre (α, ϕ_A, ϕ_B)**

- Optický komponent **reciproký** v zmysle Lorentzovho teorému reciprocity

$$[J_{21}] = [J_{12}]^T \quad (4.7.9)$$

T označuje transponovanú maticu

- **Prenosová matica optického prvku je nereciproká**
 - **Sagnacov jav**
 - **Faradayov jav**

$$[J_{21}(\phi_F)] = [J_{12}(-\phi_F)] \quad (4.7.10)$$

- **Prenosové médium s časovo premennými parametrami**
- **Nelineárne optické javy**

4.7.3 PRENOSOVÉ MATICE JEDNOVIDOVÝCH OPTICKÝCH VLÁKIEN

- **Dve funkcie optického vlákna**

- **Prenosová linka (médium)**
- **Optický komponent realizujúci určitú funkciu**

- Elektrické pole optickej vlny

$$E(x, y, z) = [E_1(z)e_1(x, y) + E_2(z)e_2(x, y)] \exp\{j\beta z\} \quad (4.7.11)$$

$e_1(x, y)$ a $e_2(x, y)$ elektrické polia dvoch normovaných ortogonálnych vlastných vidov

$$e_k(x, y)e_l(x, y) = \delta_{kl}, \quad k, l = 1, 2 \quad (4.7.12)$$

E_1, E_2 sú komplexné amplitúdy

- **Polarizačný stav**
$$E(z) = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \exp\{j\beta z\} \quad (4.7.13)$$

β je priemerná hodnota konštanty šírenia v optickom vlákne

- **Väzbová rovnica**

$$\frac{dE}{dz} = -j[N]E \quad (4.7.14)$$

- Pre zložky

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} N_{xx} & N_{xy} \\ N_{yx} & N_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (4.7.15)$$

$N_{k,l}$ ($k, l = x, y$) sú väzobné koeficienty

- Bezstratové vlákna - väzobné koeficienty reálne parametre

$$N_{yx} = N_{xy}^* = N_{xy} \quad (4.7.16)$$

- **Riešenie väzbovej rovnice**

$$E(z) = [J] E(0) \exp\{j\gamma z\} \quad (4.7.17)$$

$$\begin{bmatrix} E_x(z) \\ E_y(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(0) \\ E_y(0) \end{bmatrix} \exp\{j\beta z\} \quad (4.7.18)$$

$$J_{xx} = \cos(\Delta\beta z/2) - j \left[(N_{xx} - N_{yy}) / \Delta\beta \right] \sin(\Delta\beta z/2) \quad (4.7.19)$$

$$J_{yx} = -j (2N_{xy} / \Delta\beta) \sin(\Delta\beta z/2) \quad (4.7.20)$$

$$J_{xy} = -J_{yx}^* \quad , \quad J_{yy} = J_{xx}^* \quad (4.7.21)$$

$$\Delta\beta = \left[(N_{xx} - N_{yy})^2 + [2N_{xy}]^2 \right]^{1/2} \quad (4.7.22)$$

4.7.4 PRENOSOVÉ MATICE ZÁKLADNÝCH OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH PRVKOV

- **Lineárny optický prvok**- úsek jednovidového vlákna, oneskorovacia platnička, atenuátor, lineárny optický zosilňovač - základný lineárny transformačný komponent
- **Optický vetviaci komponent**
- **Optický zlučujúci komponent**
- **Kaskádne zapojenie**
- **Optická spätná väzba**

$$E_0 = [K] E_i \quad (4.7.23)$$

$$E_i' = E_i + E_f \quad (4.7.24)$$

$$E_f = [K_f] E_0 \quad (4.7.25)$$

$$E_0 = \left[[I] - [K][K_f] \right]^{-1} [K] E_i \quad (4.7.26)$$

kde [I] je jednotková matica

- **Fabryho-Perotov rezonátor**
- **Optický vláknový kruhový rezonátor**

- **Sagnacovom interferometer** - vláknová slučka
- Ak $[J_{12}]$ a $[J_{21}]$ sú prenosové matice **OV** opísané v súradnicovej sústave (X, Y, Z) pre prenos v priamom ($1 \rightarrow 2$) a v spätnom ($2 \rightarrow 1$) smere, potom prenosové matice zohnutého **OV** v súradnicovej sústave laboratória (x, y, z) budú pre prenos v smere pohybu hodinových ručičiek $[R][J_{12}]$ a proti smeru pohybu hodinových ručičiek $[J_{21}][R]$

$$[R] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7.27)$$

- **Optický vláknový väzbový prvok typu 2 x 2**

$$[K]_{2 \times 2} = t_c \begin{bmatrix} [K_{I1}] & [K_{I2}] \\ [K_{II1}] & [K_{II2}] \end{bmatrix} \quad (4.7.28)$$

kde K_{rs} ($r = I, II$ a $s = 1, 2$) sú komplexné matice typu 2×2 a t_c je celkový prenos prvku obsahujúci vložkové straty

- Vzhľadom na symetriu a reciprocitu

$$[K_{I1}] = [K_{II2}] \quad [K_{I2}] = [K_{II1}] \quad (4.7.29)$$

- **Prenosová matica väzobného prvku 2x2**

$$[K]_{2 \times 2} = t_c \begin{bmatrix} [K_t] & [K_c] \\ [K_c] & [K_t] \end{bmatrix} \quad (4.7.30)$$

kde k_t a k_c sú matice priamej a priečnej väzby

$$\begin{aligned} [K_t] &= (1 - K)^{1/2} [I] \\ [K_c] &= j\sqrt{K} [I] \end{aligned} \quad (4.7.31)$$

- **Optický vláknový väzobný prvok 3x3**

$$[K]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} [K_{I1}] & [K_{I2}] & [K_{I3}] \\ [K_{II1}] & [K_{II2}] & [K_{II3}] \\ [K_{III1}] & [K_{III2}] & [K_{III3}] \end{bmatrix} \quad (4.7.32)$$

kde $[k_{r,s}]$, $r = I, II, III$ a $s = 1, 2, 3$ sú komplexné matice 2x2

- **Väzobný prvok polarizačne nezávislý**

$$[K_{rs}] = K_{rs} \exp\{j\phi_{rs}\} [I] \quad (4.7.33)$$

kde k_{rs} a ϕ_{rs} sú reálne čísla

- **Väzobný prvok je ideálne symetrický a bezstratový**

$$K_{rs} = 1/3 \quad \forall r, s \quad (4.7.34)$$

$$\phi_{rs} = \pm\pi/3 \quad r \neq s \quad (4.7.35)$$

$$\phi_{rs} = 0 \quad r = s \quad (4.7.36)$$

4.7.5 ANALÝZA VYBRATÝCH OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH OBVODOV

- **Optický vláknový Sagnacov interferometer s väzobným prvkom 2x2**

$$\begin{bmatrix} E'_I \\ E'_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{I I} & J_{I II} \\ J_{II I} & J_{II II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_I \\ E_{II} \end{bmatrix} \quad (4.7.37)$$

$$[J_{I I}] = [K_c][R][J_{12}][K_t] \exp\{j\Delta\phi\} + [K_t][J_{21}][R][K_c] \quad (4.7.38)$$

$$[J_{II I}] = [K_f][R][J_{12}][K_t] \exp\{j\Delta\phi\} + [K_c][J_{21}][R][K_c] \quad (4.7.39)$$

$$[J_{I II}] = [K_c][R][J_{12}][K_c] \exp\{j\Delta\phi\} + [K_t][J_{21}][R][K_t] \quad (4.7.40)$$

$$[J_{II II}] = [K_t][R][J_{12}][K_c] \exp\{j\Delta\phi\} + [K_c][J_{21}][R][K_t] \quad (4.7.41)$$

kde $A\phi = \phi_{12} - \phi_{21}$ je fázový rozdiel medzi navzájom opačným smerom sa šíriacimi optickými vlnami v cievke **OV**

- Len jeden vstup (uvažujme vstup I)

$$E'_r = [J_{rI}] E_r \quad (r = I, II) \quad (4.7.42)$$

- Prenos optického výkonu z brány I na bránu r (r = I, II)

$$T_{Ir} = \frac{|E'_r|^2}{|E_I|^2} = \frac{E_I^+ [J_{rI}]^+ [J_{rI}] E_I}{|E_I|^2}, \quad r = I, II \quad (4.7.43)$$

- Kde + označuje komplexne združenú a transponovanú maticu

- **Optická reflektivita** (t. j. prenos z brány I do I)

$$T_{II} = K(1-K) \left\{ \left| (J_{12})_{XX} \exp\{j\Delta\phi\} + (J_{21})_{XX} \right|^2 + \left| (J_{21})_{YX} - (J_{12})_{YX} \exp\{j\Delta\phi\} \right|^2 \right\} \quad (4.7.44)$$

- **Prenos z brány I do brány II**

$$T_{II} = 1 - T_{II} \quad (4.7.45)$$

- **Stačí vyšetovať odraz alebo prechod**

- **Dva špeciálne prípady:**

- 1. Ideálne izotrópna cievka **OV** (nedvojzlomné jednovidové **OV**)

$$[J_{21}] = [J_{12}] = [I] \quad (4.7.46)$$

- **Optická reflektivita**

$$T_{II} = 2K(1-K) [1 + \cos(\Delta\phi)] \quad (4.7.47)$$

- **Optické vláknové Sagnacové gyroskopy**

- 2. Prenosová matica cievky **OV** je reciproká a cievka nepodlieha rotácii

$$[J_{21}] = [J_{12}]^T \quad (4.7.48)$$

$$\Delta\phi = \mathbf{O} \quad (4.7.49)$$

- **Optická reflektivita**

$$T_{II} = 4K(1-K) \left\{ 1 - \left| \text{Im} \left[(J_{12})_{YX} \right] \right|^2 \right\} \quad (4.7.50)$$

- Pre $k = 0,5$ (**3 dB odbočnica**)

$$T_{II} = 1 - \left| \text{Im} \left[(J_{12})_{YX} \right] \right|^2 \quad (4.7.51)$$

- **Optické vláknové Sagnacové fázové modulátory** s modulovaním dvojlomu cievky **OV**

- **Optické vláknové senzory prúdu** používajú konfiguráciu optického vláknového **Sagnacovho** interferometra s väzbovým prvkom 3 x 3

- Prenos optického výkonu

z brány I do brány I, II, III

$$T_{rI} = \frac{|E'_r|^2}{|E_I|^2} = \frac{E_r^+ [J_{Ir}]^+ [J_{Ii}] E_I}{|E_I|^2} \quad (4.7.52)$$

- **Fabryho - Perotove (FP) rezonátory** vytvorené z jednovidových OV sa používajú v mnohých optických vláknových systémoch na optickú filtráciu, spracovanie a snímanie signálov

- **Prenos optickej vlny**

$$E_t = [H_t] E_i \quad (4.7.53)$$

$$[H_t] = t_1 t_2' \left[[I] - r_1' r_2' \exp\{j2\phi\} [J_{12}] [J_{21}] \right]^{-1} [J_{12}] \exp\{j2\phi\} \quad (4.7.54)$$

kde r_s a t_s , $s = 1, 2$ sú amplitúdové odrazové a prechodové koeficienty na vstupných bránach **FP** rezonátora a $[J_{12}]$ a $[J_{21}]$ sú prenosové matice **FP** rezonátora (úseku **OV**) v priamom ($1 \rightarrow 2$) a spätnom ($2 \rightarrow 1$) smere

- **Odrazená vlna**

$$E_r = [H_r] E_i \quad (4.7.55)$$

$$[H_r] = r_1 [I] - t_1 t_1' r_2' [J_{21}] \left[[I] - r_1' r_2' \exp\{j2\phi\} [J_{12}] [J_{21}] \right]^{-1} [J_{12}] \exp\{j2\phi\} \quad (4.7.56)$$

- **Rezonátor vyplnený izotrónnym médium a zrkadlá majú rovnaké vlastnosti**

$$[J_{12}] = [J_{21}] = [I] \quad (4.7.57)$$

$$r_1 = r_2 = r \quad ; \quad r_1' = r_2' = r' \quad r' = -r \quad (4.7.58)$$

$$t_1 = t_2 = t \quad t_1' = t_2' = t' \quad (4.7.59)$$

$$[H_t] = \frac{T \exp\{j2\phi\}}{1 - R \exp\{j2\phi\}} \quad (4.7.60)$$

$$[H_r] = \frac{(1 - \exp\{j2\phi\})\sqrt{R}}{1 - R \exp\{j2\phi\}} \quad (4.7.61)$$

kde $T = t t$, $R = r^2 = r'^2$ a platí $T + R = 1$

- **Prenos T_{12} a odraz R_{11} FR interferometra**

$$T_{12} = |H_t|^2 = \frac{(1 - R)^2}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2 \phi} \quad (4.7.62)$$

$$R_{11} = |H_r|^2 = \frac{4R \sin^2 \phi}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2 \phi} \quad (4.7.63)$$

- **Optický vláknový kruhový rezonátor**

$$E_I = [K_f] E_I + [K_c] E_{II} \quad (4.7.64)$$

$$E_{II} = [J] \exp\{j\phi\} E_2 \quad (4.7.65)$$

$$E_2 = [K_{12}] E_I + [K_{22}] E_{II} = [K_{12}] E_I + [K_{22}] [J] \exp\{j\phi\} E_2 \quad (4.7.66)$$

Elimináciou E_2 a E_{II}
$$E_I = [J_{1I}] E_{II} \quad (4.7.67)$$

- **Prenosová matica**

$$[J_{11}] = [K_{11}] + [K_{21}][J] \exp\{j\phi\} [[I] - [K_{22}][J] \exp\{j\phi\}]^{-1} [K_{12}] \quad (4.7.68)$$

- **Ideálne izotrópne a polarizáciu zachovávajúceho OV**

$$[J_{11}] = t_c \frac{(1-K)^{1/2} - t_c t_f \exp\{j\phi\}}{1 - (1-K)^{1/2} t_c t_f \exp\{j\phi\}} \quad (4.7.69)$$

kde t_c a t_f sú celkové prenosy väzobného prvku a vlákna

- **Prenos optického výkonu**

$$T_{11} = \frac{|E_I|^2}{|E_1|^2} = t_c^2 \frac{\alpha^2 - 2\alpha t \cos \phi + t^2}{1 - 2\alpha t \cos \phi + (\alpha t)^2} \quad (4.7.70)$$

$$\alpha = (1-K)^{1/2} \quad (4.7.71)$$

$$t = t_c t_f \quad (4.7.72)$$