

## Daugiamodžių šviesolaidžių sujungimo nuostolių tyrimas

J. Anilionienė, R. Anilionis

Taikomosios matematikos katedra, elektronikos inžinerijos katedra Kauno technologijos universitetas  
Studentų g. 50, LT-3031 Kaunas, Lietuva, tel. +370 37 300503; el.paštas romualdas.anilionis@tef.ktu.lt

### Įvadas

Šiuolaikinės optinės sistemos tampa nacionalinių ir tarptautinių telekomunikacijų tinklų pagrindu. Skaidulinių šviesolaidžių perduodant bangas daugiamodžiu režimu vieno tipo modos gali virsti kito tipo modomis arba jos išspinduliuojamos. Toks reiškinys vadinamas modų transformacija. Jos priežastys yra įvairios: šviesolaidžio ir lūžio rodiklio fliktuacijos, optinių komponentų sujungimai tarpusavyje bei su fideriu ir pan. Todėl kiekvienas šviesolaidis optiniame kabelyje yra nereguliarus. Įvairūs nurodyti nereguliarumai sukelia sklindančių modų laukų iškraipymus, atsiranda ryšiai tarp modų ir perduodamų bangų ryšiai su išspinduliuojamais laukais.

Esant mažiems nereguliarumams jų analizei taikomi apytiksliai metodai [1]. Surištųjų bangų teorija [2] teikia informaciją apie kiekvienos modos amplitudę ir fazę, bet gaunama labai sudėtinga lygčių sistema. Tokios teorijos paprastesnis variantas yra surištųjų galių teorija [3], kuri leidžia surasti kiekvienos modos vidutinę galią. Kadangi optinis imtuvas reaguoja į modų sumos vidutinę galią, o kvazišisigimusių modų grupės galios nuokrypis nuo vidutinės reikšmės yra nedidelis, tai surištųjų galių teoriją galima laikyti adekvačia optinių signalų perdavimo procesui.

### Metodas

Jei modų perdavimo funkcija yra stacionari ir nekoreliuota, tai šviesolaidis yra tiesinė sistema [4]. Tada galia šviesolaidžio išėjime su galia jo įėjime yra susijusios tiesine priklausomybe

$$(P_i)_{I\delta} = (m_{ij}^T)(P_j)_{IN}; \quad (1)$$

čia  $m_{ij}^T$  - modų transformacijos koeficientų matrica.

Jei šviesolaidžiai sujungti, tai elektrinis laukas pirmojo fiderio įėjime išreiškiamas išėjimo fiderio modų suma:

$$E_{IN} = \sum_i \rho_i e_i; \quad (2)$$

čia  $\rho_i$  -  $i$ -tosios modos perdavimo koeficientas.

Kai šviesolaidžiais sklinda tik pagrindinė moda,

$$P_{IN} = \frac{1}{2} \int_S E_{IN} H_{IN}^* ds, \quad (3)$$

$$P_{I\delta} = \frac{1}{2} |\rho_0|^2 \int_S E_0 H_0^* ds. \quad (4)$$

Čia  $s$ - šviesolaidžio skerspjūvis,  $E_0, H_0^*, \rho_0$  - pagrindinės modos elektrinis, magnetinis laukai ir perdavimo koeficientas,  $H_{IN}^*$  - įėjimo šviesolaidžio magnetinis laukas.

Baigtinei šviesolaidžio atkarpai  $\Delta z$  (1) kiekvienai modai išreiškiama šitaip:

$$P_i(z + \Delta z) = \sum_j m_{ij}^T P_j(z). \quad (5)$$

Paėmę pirmuosius Teiloro eilutės (5) narius, gauname

$$P_i(z) + \frac{dP_i}{dz} \Delta z = \sum_j m_{ij}^T P_j(z). \quad (6)$$

$P_i(z)$  gali būti išreiškiama taip:

$$P_i(z) = \sum_j m_{ij}^T P_j(z) + A_i P_i(z); \quad (7)$$

čia  $A_i$  yra modos  $i$  nuostolių faktorius. (7) lygybė įvertina  $i$  modos virsmą į  $j$  modą ir į išspinduliuojamas modas. Įrašę (7) į (6), gauname:

$$\frac{dP_i}{dz} = \sum_j \frac{m_{ij}^T}{\Delta z} P_j - \sum_j \frac{m_{ij}^T}{\Delta z} P_i - 2 \frac{A_i}{\Delta z} P_i. \quad (8)$$

Kiekvienos modos galia priklauso nuo dviejų kintamųjų:  $z, t$ . Todėl (8) kairioji pusė tokia:

$$\frac{dP(z,t)}{dz} = \frac{\partial P(z,t)}{\partial z} + \frac{\partial P(z,t)}{\partial t} \cdot \frac{dt}{dz} = \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial P}{\partial t}; \quad (9)$$

čia  $v = \frac{dz}{dt}$  - modos grupinis greitis.

Tada (8) perrašome taip:

$$\frac{\partial P_i}{\partial z} + \frac{1}{v_i} \frac{\partial P_i}{\partial t} = \left( - \sum_j c_{ij}^T - 2\alpha_i \right) P_i + \sum_j c_{ij}^T P_j; \quad (10)$$

čia  $c_{ij}^T$  ir  $\alpha_i$  atitinkamai  $m_{ij}^T$  ir  $A_i$  ilgio vienetui.

Tai surištujų galių diferencialinės formos lygtis. Surištujų galių metodo pagrindinė lygtis turi akivaizdžią fizikinę prasmę:  $i$ -osios modos galia  $P_i$  arba kvazišsigimusių modų grupės galia mažėja dėl jos slopinimo reguliariame šviesolaidyje ir dėl galios apsikeitimo su kitomis modomis arba grupėmis.

### Analitiniai sprendimai

Surištujų galių metodą taikysime, kad įvertintume ir palygintume nuostolius, susidariusius sujungiant optines gijas.

Naudojami du optinių gijų sujungimo būdai: skaidulos sujungiamos tiesiogiai ir suvirinamos arba dedamos į V formos griovelius, o paskui kljuojamos. Abiem atvejais dėl modų transformacijos pakinta modų režimas, padidėja slopinimo koeficientas ir atsiranda papildomi signalo iškraipymai. Darbe surištujų galių analizės metodu įvertinsime ir palyginsime modų transformaciją ir perėjimo nuostolius, naudodami šiuos du optinių gijų sujungimo būdus.

Įvertinus sujungimą, lūžio rodiklis

$$n(x, y, z) = n_F(x, y) + n_s(x, y, z), \quad (0 \leq z \leq z_s), \quad (11)$$

$$n_F(x, y) = n_0(1 - \Delta((x^2 + y^2)/a^2)); \quad (12)$$

čia  $n_F(x, y)$ ,  $n_s(x, y, z)$  – sujungiamų fiderių ir jungties vietos lūžio rodikliai (LR);  
 $n_0$  – LR išilgai šerdies ašies;  
 $a$  – šerdies spindulys.

Normuotas šerdies ( $n_1$ ) ir apvalkalo ( $n_2$ ) LR skirtumas

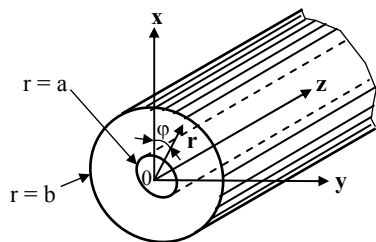
$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \leq 1.$$

Sujungimo vietos plotis  $z_s$  mažas ir

$$|n_s/n_F| \ll 1. \quad (13)$$

Tarkim, kad sujungiamieji fideriai yra identiški.

Laukų analizę šviesolaidyje geriausia atlikti cilindrinėje koordinačių sistemoje ( $r, \varphi, z$ ) [1]. Ašis  $z$  nukreipta bangų sklaidimo kryptimi (1 pav.).



1 pav. Optinės gijos struktūros geometrija

Tada banginė lygtis tokia:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2} + (k^2(r) - \beta^2) \Psi = 0; \quad (14)$$

čia  $\Psi$  yra elektrinis (E) arba magnetinis (H) laukai,  $k(r) = n(r)k$ ,  $k = 2\pi/\lambda = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$  – banginis skaičius vakuume,  $\lambda$  – bangos ilgis,  $\epsilon_0, \mu_0$  – vakuomo dielektrinė ir magnetinė skverbtys,  $\omega$  – kampinis dažnis,  $\beta$  – fazės koeficientas,  $n$  – lūžio rodiklis.

Sujungimo vietoje elektrinis laukas išreiškiamas sujungiamų fiderių kompleksiniu elektriniu lauku:

$$E = \sum_i \eta_i(z) \underline{E}_i \exp(-j\beta_i z); \quad (15)$$

čia  $\eta_i$  –  $i$  modos koeficientas;

$\beta_i$  –  $i$  modos fazės koeficientas;

$\sum_i$  – tai visų perduodamų modų suma.

Iš Maksvelo lygties [9]

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + k^2 n^2 E = 0. \quad (16)$$

Įrašę (15) į (16), gauname lygtį:

$$\sum_i \eta_i(z) \left( \frac{\partial^2 \underline{E}_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{E}_i}{\partial y^2} + k^2 n^2 \underline{E}_i \right) + \sum_i \left( \frac{\partial^2 \eta_i}{\partial z^2} - 2j\beta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial z} - \beta_i^2 \eta_i \right) \underline{E}_i = 0. \quad (17)$$

Panaudoję  $\underline{E}_i$ , kuris yra (18) lygties sprendinys, ir aproksimavę (19), šią lygtį užrašome kitu būdu (20):

$$\frac{\partial^2 \underline{E}_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{E}_i}{\partial y^2} + (k^2 n_F^2 - \beta_i^2) \underline{E}_i = 0; \quad (18)$$

$$n^2 - n_F^2 \approx 2n_F n_s; \quad (19)$$

$$\sum_i \left( \frac{\partial^2 \eta_i}{\partial z^2} - 2j\beta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial z} + 2n_F n_s k^2 \eta_i \right) \underline{E}_i = 0. \quad (20)$$

Padauginę (20) lygtį iš  $\underline{H}_j^*$  ir suintegravę, gauname:

$$\frac{\partial^2 \eta_i}{\partial z^2} - 2j\beta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial z} + \frac{k^2}{P} \sum_i \eta_i \int_S n_F(x, y) n_s(x, y) \underline{E}_i \underline{H}_j^* ds = 0; \quad (21)$$

čia  $P$  – modos galia;  $S$  – šviesolaidžio skerspjūvio plotas.

Sprendinys išskaidomas į dvi dalis:

$$\eta_i(z) = \eta_{i1}(z) + \eta_{i2}(z); \quad (22)$$

čia  $\eta_{i1}(z)$ ,  $\eta_{i2}(z)$  – sklindančių ir grįžtančių srityje  $z_s$  bangų amplitudės.

Modų transformacijos iš  $j$  į  $i$  koeficientas išreiškiamas taip:

$$m_{ij}^T = |\eta_{i1}(z_s)|^2. \quad (23)$$

Įrašę gautą  $\eta_i(z)$  išraišką iš (21) lygties į (23), gauname:

$$m_{ij}^T = F(i, j) \quad (i \neq j), \quad (24)$$

$$m_{ij}^T = (1 - F(j, j))^2 (1 + F(j, j)). \quad (25)$$

Čia

$$F(i, j) = \frac{k^2 \beta_i^2}{4P^2 \beta_j^2 \omega^2 \mu_0^2} \left| \int_0^{z_s} dz \int_s n_F(x, y) n_s(x, y) \underline{E}_i \underline{H}_j^* ds \right|^2. \quad (26)$$

Modų transformacija sujungimo vietoje dėl atspindžių pasireiškia kaip nuostoliai:

$$A = -10 \lg \left( \frac{\sum_i \sum_j m_{ij}^T P_j}{\sum_j P_j} \right), \quad (dB), \quad (27)$$

nes  $j$  – tosios modos įėjimo ir išėjimo galios atitinkamai lygios:

$$P_{iN} = \sum_j P_j \quad (28)$$

ir

$$P_{iS} = \sum_j \sum_i m_{ij}^T P_j. \quad (29)$$

čia  $P_j$  – modų  $j$  galia.

Dažninė charakteristika

$$H(f) = \frac{\left( \sum_i \exp(-2j\pi\tau_i f z_2) \right) \left( \sum_j m_{ij}^T P_j \exp(-j2\pi\tau_j f z_1) \right)}{\sum_j P_j}. \quad (30)$$

čia  $\tau_i, \tau_j$  – atitinkamai modų  $i$  ir  $j$  vėlinimo trukmės,

$z_1$  ir  $z_2$  – sujungiamų fiderių ilgiai,  $f$  – dažnis.

Skaičiuojant nuostolius dėl modų transformacijos reikia įvertinti, kad lūžio rodikliai priklauso nuo fiderių sujungimo būdo ir yra atitinkamai lygūs:

$$n_s(x, y, z) = n_v - n_F(x, y) \quad (\text{klijuojant fiderius}); \quad (31)$$

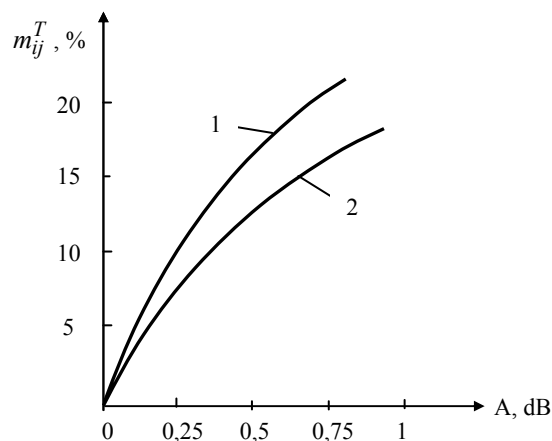
$$n_s(x, y, z) = n_0 (-c_1 + c_2 \Delta(r/a)^2 + c_3 \Delta(r/a)^4 \sin(\pi z / z_s)) \quad (32)$$

(fiderius suvirinant).

Čia  $n_v, c_1, c_2, c_3$  yra konstantos ( $n_v$  – medžiagos, panaudotos klijuojant fiderius, lūžio rodiklis).

2 pav. pateiktos modų transformacijos ir nuostolių priklausomybės. Skaičiuojant įvertinti tokie šviesolaidžio

parametrai:  $2a = 30 \mu m$ ,  $\Delta = 1\%$ , lūžio rodiklio profilis – parabolė ( $\alpha = 2$ ).



2 pav. Modų transformacijos ir sujungimo nuostolių priklausomybės: 1- optines gijas suvirinant, 2- klijuojant

Nepriklausomai nuo sujungimo būdo didesnė modų transformacija pasireiškia sujungimuose su didesniais sujungimo nuostoliais. Sujungiant optines gijas tiesiogiai modų transformacija didesnė nei klijuojant jas V formos grioveluose.

## Išvados

1. Optinių gijų sujungimų analizei panaudotas surištuųjų galių metodas leidžia paprasčiau įvertinti šviesolaidžio nereguliarumą nei surištuųjų bangų metodas.
2. Sujungiant šviesolaidžius tiesiogiai pasireiškia didesni nuostoliai nei juos klijuojant V formos grioveluose.

## Literatūra

1. **Kłowski D.** Transmission of Digital Information in the Wireless Channels. –Moscow, 1982.- 304 p.
2. **Каценеленбаум Б.** Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами.-М. АН СССР, 1981.-172 с.
3. **Marcuse D.** Derivation of Complred Power Equations.- Bell Syst. Tech. J. Vol.51.- 1972. - 229 p.
4. **Adams M.** An Introduction to Optical Wave guides. – John Wiley&Sons. –1981. -345 p.
5. **Коринунов В.** Оптические кабели связи. -М.: Связь, 1990. - 231 с.
6. **Proakis J.G.** Digital Communications. 4th ed. NY, 2001.- 1002 p.

Pateikta spaudai 2003 03 13

**J. Anilionienė, R. Anilionis. Daugiamodžių šviesolaidžių sujungimo nuostolių tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. - Kaunas: Technologija, 2003. - Nr. 6(48). – P.48-51.**

Daugiamodžių šviesolaidžių perdavimo charakteristikos išnagrinėtos naudojant elektromagnetinio lauko teorijoje taikomas Maksvelo lygtis. Analizuojama daugiamodžiuose šviesolaidžiuose dėl vieno modų virsmo kitomis pasireiškianti modų transformacija bei jos priežastys. Nuostoliams, susidariusiems dėl modų transformacijos sujungiant optines gijas, įvertinti pasiūlytas surištujų galių metodas. Tiriama du skaidulų sujungimo būdai: jungiant tiesiogiai ir suvirinant arba dedant į V formos griovelius ir klijuojant. Atliktas modų transformacijos abiejų tipų daugiamodžių šviesolaidžių sujungimuose matematinį modeliavimą, pateiktos signalo iškraipymo ir nuostolių priklausomybės. Il. 2, bibl. 6 (lietuvių k.; santraukos lietuvių, anglų, rusų k.).

**J. Anilionienė, R. Anilionis. Analysis of Connection Loss in Multimode Fibers // Electronics and Electrical Engineering. - Kaunas: Technologija, 2003. - No. 6(48). – P.48-51.**

Transmission characteristics of multimode fibers are explained with electromagnetic theory based on Maxwell's equations. Many modes exist in multimode fibers, and mode conversions take place in the fibers. This makes transmission characteristics complex, and it is explained using an example of mode conversion caused by splices. Two types of splice methods, fusion splice and adhesive-bonded V-groove splice, are used. The difference in mode conversion between a fusion splice and a V-groove splice can be clarified by modeling the spliced part of both splices. Ill. 2, bibl. 6 (in Lithuanian, summaries in Lithuanian, English, Russian).

**Ю.Анилёнене, Р.Анилёнис. Исследование потерь соединений в многомодовых световодах // Электроника и электротехника. - Каунас: Технология, 2003. - № 6(48). – С.48-51.**

Передаточные характеристики многомодовых световодов исследованы используя в теории электромагнитного поля применяемых уравнениях Максвелла. Анализируется трансформация мод и ее причины в многомодовом световоде из-за нерегулярностей, которые изменяют модовый режим, увеличивают коэффициент затухания и изменяют искажения сигнала. Для оценки потерь, возникающих из-за трансформации мод при соединении световодов, предложен метод связанных мощностей. Исследованы два способа соединений: оптические жилы соединяются непосредственно сваркой или помещаются в V-образные канавки и склеиваются. Произведено математическое моделирование трансформации мод обоих способов соединения и представлены зависимости потерь и искажений сигнала. Ил. 2, библи. 6 (на литовском языке, рефераты на литовском, английском и русском яз.).

