

Simulacije presluha v večjedrnem optičnem vlaknu

Manca Gale¹, Leon Kocjančič², Ahmed Samir², Boštjan Batagelj²

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteti za matematiko in fiziko, Jadranska ulica 19, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: manca.gale@gmail.com

Crosstalk simulations in multi-core optical fibers

Abstract. *Space-division multiplexing is one of the emerging technologies that will make it possible to satisfy the future needs of high-capacity optical communications. Multi-core fibers are promising candidates since they are capable of transmitting more data in the same amount of space in comparison to single-core fibers. In order to achieve these performances, multi-core fibers must be properly designed. One of the critical parameters is the optical crosstalk, which appears between the different cores inside the same cladding. In this paper we use a finite-element simulation tool in order to determine the parameters that affect the coupling length between the fiber cores. In this paper the problem of crosstalk is mathematically formulated and its properties are analyzed. If the coupling length is much longer than the length of the optical fiber cable, the crosstalk is negligible and it does not influence the quality of the transmitted data.*

Keywords – *space-division multiplexing, multi-core fiber, crosstalk, coupling length*

1 Uvod

Potrebe po količini prenesenih podatkov in visokih hitrostih prenosa so v današnji informacijski družbi vedno večje, zato je prostorsko multipleksiranje v optičnih vlaknih ena od smiselnih rešitev za bodoča optična omrežja [1]. Danes so v široki uporabi enojedrna optična vlakna, z večjedrnimi optičnimi vlakni pa bi lahko dosegli prenos več signalov hkrati v enako velikem optičnem vlaknu, kar bi nedvomno povečalo prenosno zmogljivost na omejeni površini. Vendar pa eno od glavnih omejitev pri večjedrnih optičnih vlaknih predstavlja presluh, ki predstavlja prehajanje moči med jedri in vnaša šum h koristnemu signalu.

Notranjost komunikacijskega optičnega vlakna sestavljata stekleno jedro in obloga. Jedro ima malenkost višji lomni količnik od obloge, s čimer je zagotovljena ujetost svetlobe v jedro in omogočeno, da se svetloba vzdolž vodnika širi po jedru [2].

Za prenos energije po vlaknu obstaja več različnih načinov valovanja, ki jim pravimo rodovi. V enorodovnem optičnem vlaknu se tako širi le en rod, v mnogorodovnem pa kopica (približno 100) različnih rodov [2].

V večjedrnem vlaknu imamo rodove, ki se širijo po celotnem vlaknu, električno polje pa je skoncentrirano v jedrih. Razdaljo, ki je potrebna, da se energija prenese iz vzbujenega jedra na drugi del optičnega vlakna in nazaj, imenujemo utripna dolžina. Utripna dolžina je odvisna od valovne dolžine svetlobe v mediju, od razporeditve in razdalje med jedri, od premera jeder in od razlike med lomnima količnikoma jedra in obloge.

Namen raziskovanja presluha s simulacijami je določiti parametre, ki vplivajo na utripno dolžino tako, da bo utripna dolžina precej večja od dolžine optičnega kabla oziroma vlakna, s čimer bi zagotovili, da do motenj zaradi presluha ne bi prišlo.

2 Sklopitev rodov

Z ustrezno kombinacijo rodov valovanja lahko simuliramo prenos energije med jedri v večjedrnem optičnem vlaknu in vzbujanje le enega izmed jeder, kar bistveno poenostavi simulacijski problem.

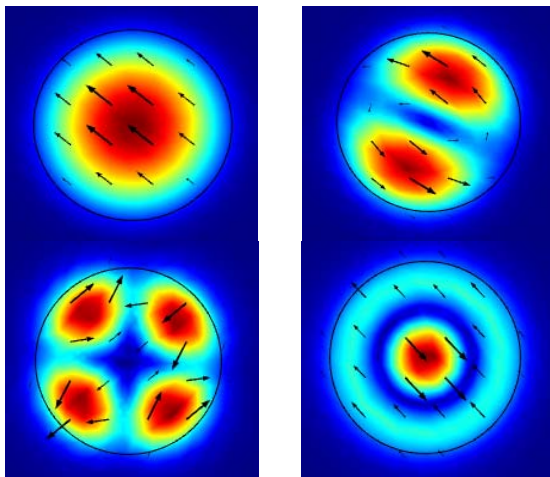
2.1 Rodovi v cilindričnem vlaknu

Na slikah v nadaljevanju so prikazani rodovi v enojedrnem, dvojedrnem in sedemjedrnem optičnem vlaknu s cilindrično geometrijo. Prikazana je absolutna vrednost amplitude in smer električnega polja ob začetnem času na začetku vlakna. Glede na rezultate simulacij so vsi rodovi, ki jih najdemo v dvojedrnem vlaknu, možni tudi v enojedrnem, ne moremo pa vseh možnih rodov enojedrnega vlakna najti tudi v dvojedrnem vlaknu. Enako velja tudi za sedemjedrno vlakno. Kateri rodovi (izmed vseh možnih rodov enojedrnega vlakna) se pojavijo v večjedrnem vlaknu, je odvisno od razporeditve jeder znotraj večjedrnega vlakna [3].

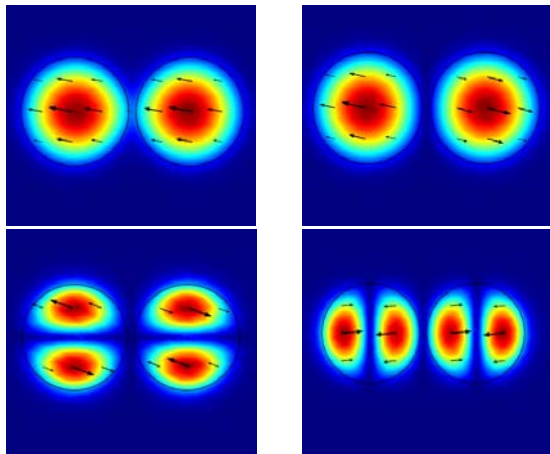
Na sliki 1 so prikazani nekateri rodovi, ki jih lahko najdemo v enojedrnem malorodovnem optičnem vlaknu.

Slika 2 prikazuje rodove dvojedrnega optičnega vlakna. Oba rodova zgoraj in rod levo spodaj so ekvivalentni rodovom enojedrnega optičnega vlakna, ki so prikazani na sliki 1. Pri čemer rodu, ki se nahaja v enojedrnem vlaknu in je prikazan na sliki 1 desno spodaj, v dvojedrnem vlaknu ne moremo najti, saj geometrija svetlovodov ne omogoča njegovega nastanka.

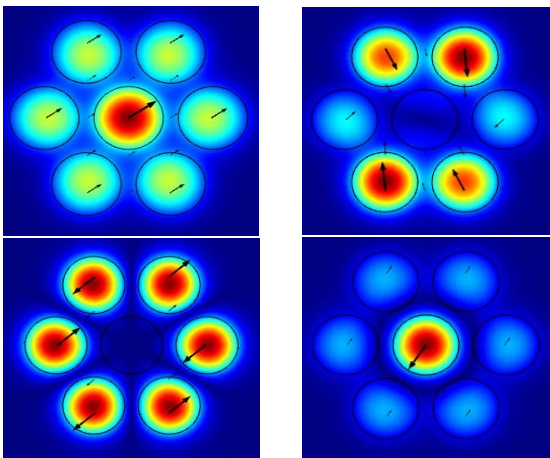
Slika 3 prikazuje rodove v sedemjedrnem optičnem vlaknu. Vsi razen rodu levo spodaj so ekvivalentni tistim v enojedrnem optičnem vlaknu.



Slika 1. Rodovi v enojedrnem malorodovnem optičnem vlaknu.



Slika 2. Rodovi v dvojedrnem optičnem vlaknu.



Slika 3. Rodovi v sedemjedrnem optičnem vlaknu.

2.2 Vzbujanje jeder

Presluh med jedri lahko računamo tako, da eno od jeter vzbujujemo, v drugem pa opazujemo moč, ki je prišla v drugo jedro zaradi presluha. Za praktično izvedbo simulacij je najbolj primerno, da seštejemo električno polje dveh različnih rodov. Z namenom, da dosežemo vzbujanje želenega jedra, pa moramo izbrati po obliki primerne rodove.

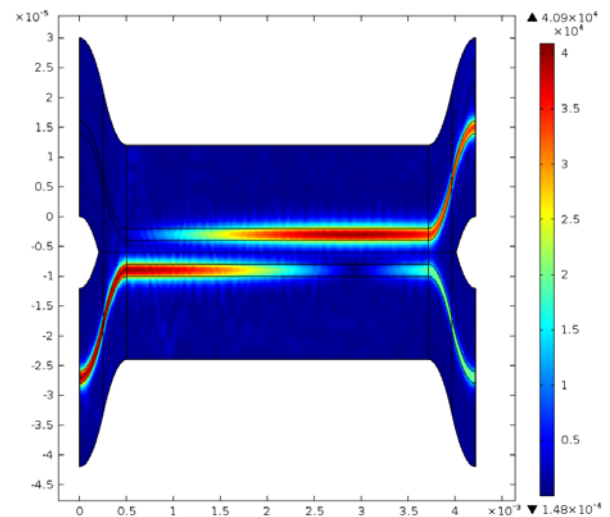
V dvojedrnem vlaknu je za vzbujanje celotne strukture najprimerneje izbrati simetrični in asimetrični rod. Prikaz primera takšnih dveh rodov je na sliki 2 zgoraj. Če ta dva rodova seštejemo, se polje v desnem jedru izniči in tako dobimo vzbujanje levega jedra. Če bi želeli vzbujevati desno jedro, bi morali za asimetrični rod računati fazno zakasnitev za π .

Na podoben način lahko računamo tudi vzbujanje srednjega jedra v sedemjedrnem vlaknu. Sešteti moramo rodova, ki sta prikazana na sliki 3 levo zgoraj in desno spodaj, za rod desno spodaj pa moramo določiti fazno zakasnitev za π .

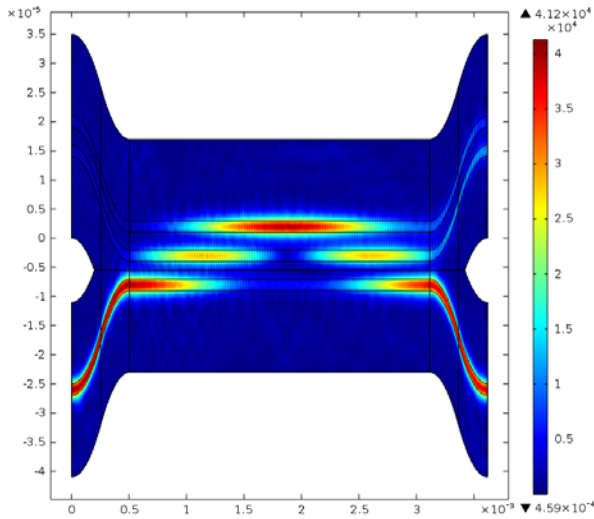
Vzbujanje enega od jeter na obodu v sedemjedrnem vlaknu na takšen način ni možno, vendar se s tem primerom nismo ukvarjali, saj je za naše poznavanje presluha dovolj, če vzbujujemo zgolj eno od jeter v celotni večjedrni strukturi optičnega vlakna.

3 Simulacije presluha – vzdolžni prerez

Prenos energije med jedri je prikazan na slikah 4 in 5, kjer je z barvno lestvico prikazana absolutna vrednost amplitude električnega polja. Pri teh simulacijah sicer ne upoštevamo, da je vlakno cilindrične geometrije, vseeno pa lahko vidimo, kako se energija prenaša po jedrih in med njimi tudi prehaja.



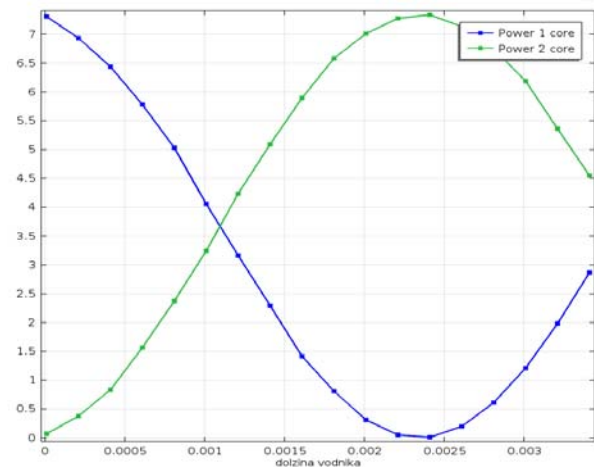
Slika 4. Vzdolžni prerez vlakna preko dveh jeter.



Slika 5. Vzdolžni prerez vlakna preko treh jeder.

Na spodnjih grafih je prikazana optična moč, merjena na koncu svetlovoda v odvisnosti od dolžine svetlovoda. Na sliki 6 je prikazana moč v zgornjem in v spodnjem jedru optičnega vlakna. Graf prikazuje odvisnost od dolžine svetlovoda. Vidimo lahko, da se celotna moč prenaša iz enega jedra v drugega in nazaj, kar se z dolžino svetlovoda periodično ponavlja.

Na sliki 7 je prikaz moči v vsakem izmed treh jeder večjerdnega optičnega vlakna v odvisnosti od dolžine svetlovoda.



Slika 6. Moč v odvisnosti od dolžine vodnika – vzdolžni prerez dveh jeder.

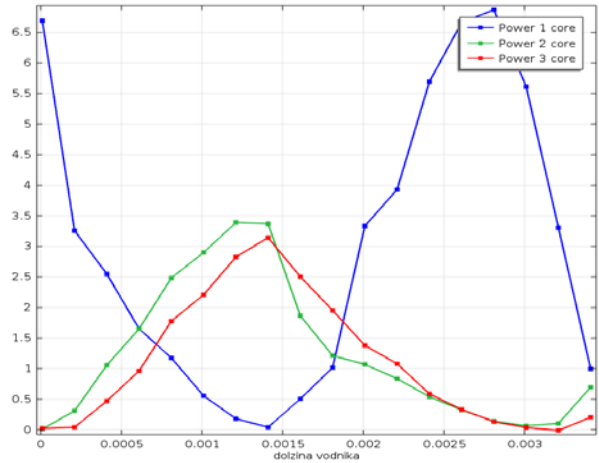
4 Rezultati simulacij

Utripno dolžino smo najprej izračunali s pomočjo 2D modela prečnega prereza, kjer se poišče ustrezne rodove in njim pripadajoče propagacijske konstante. S pomočjo propagacijskih konstant simetričnega in asimetričnega rodu pa lahko analitično izračunamo utripno dolžino l :

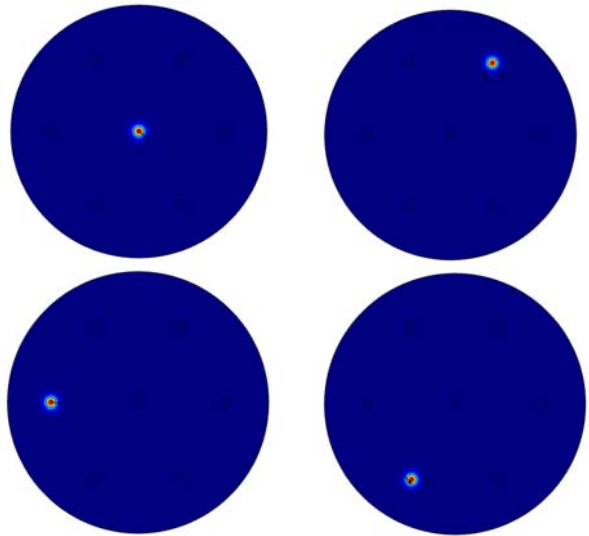
$$l = \frac{2\pi}{\Delta\beta} \quad (1)$$

Izkazalo se je, da je pri vlaknu s sedmimi jedri s premerom jedra $9 \mu\text{m}$, premerom plašča $25 \mu\text{m}$ in pri katerem imamo heksagonalno razporeditev jeder, vsak

rod vzbujen le v enem jedru, zato ne moremo poiskati simetričnega in asimetričnega rodu. Rezultati so prikazani na sliki 8.



Slika 7. Moč v odvisnosti od dolžine vodnika, katero računamo na preseku posameznega jedra.



Slika 8. Osnovni rodovi v sedemjerdnem vlaknu.

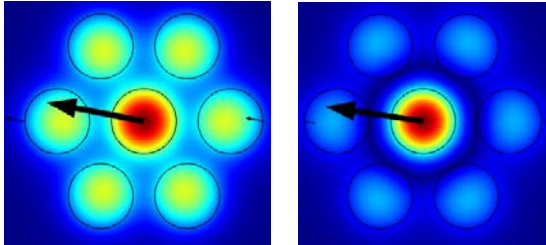
Na sliki 9 sta prikazana simetrični in asimetrični rod pri sedemjerdnem vlaknu z zelo majhno razdaljo med jedri. Premer jeder je $9 \mu\text{m}$, premer plašča $25 \mu\text{m}$, razdalja med jedri pa je $12 \mu\text{m}$. Razdalja med jedri je merjena med centroma dveh jeder.

Propagacijski konstanti simetričnega in asimetričnega rodu sta $\beta_S = 5973697,46 \text{ rad/m}$ in $\beta_L = 5971083,05 \text{ rad/m}$, torej $\Delta\beta = \beta_S - \beta_L = 2641,41 \text{ rad/m}$. V primeru takšnega vlakna je torej glede na simulacije utripna dolžina enaka $2,4 \text{ mm}$.

Pri drugem načinu za izračun utripne dolžine smo uporabili 2D model vzdolžnega prereza vlakna, pri čemer cilindrična geometrija vlakna ni upoštevana.

Iz simulacij je bilo mogoče razbrati utripno dolžino pri različnih razdaljah med jedri. Ker bi bile simulacije pri več deset kilometrov dolgem vlaknu prezahtevne in bi za njih potrebovali večje računske kapacitete, smo

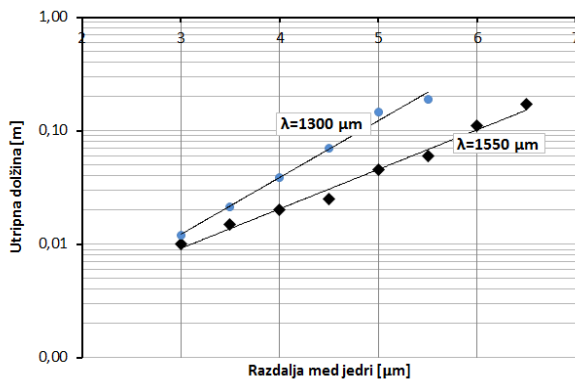
simulirali vlakno le do dolžine 10 cm. Z namenom, da bi v teh 10 cm dobili nekaj uporabnih simulacijskih rezultatov, smo uporabili precej manjšo razdaljo med jedri, kot se uporabljajo v realnih vlaknih



Slika 9. Simetrični in asimetrični rod v sedemjedrnem vlaknu z zelo majhno razdaljo med jedri.

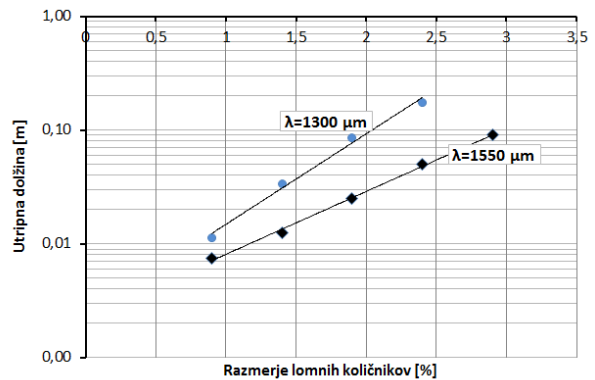
Na sliki 10 je prikazana utripna dolžina v odvisnosti od razdalje med dvema jedroma pri vzdolžnem prerezu vodnika. Takšen prerez vodnika bi dobili, če ne bi imeli sredinskega jedra. Ti podatki veljajo za vlakno, kjer imamo 0,9 % razmerje med lomnima količnikoma jedra in obloge, debelina vlakna z oblogo je 36 μm , debelina jedra 3 μm , vlovna dolžina svetlobe pa 1550 nm in 1300 nm.

Če bi želeli izdelati optično vlakno z zgornjimi podatki, ki bi bilo dolgo 40 km, in bi želeli, da ne pride do presluha med jedri, bi morali nasprotni jedri razmakniti vsaj za 25 μm za valovno dolžino 1550 nm in 18 μm za valovno dolžino 1300 nm.



Slika 10. Utripna dolžina v odvisnosti od razdalje med jedri.

Na sliki 11 je prikazana odvisnost utripne dolžine od razmerja lomnih količnikov pri optičnem vodniku z debelino vlakna z oblogo 36 μm , debelino jedra 3 μm , valovno dolžino svetlobe 1550 nm in 1300 nm ter razdaljo med jedri 3 μm . Odvisnost utripne dolžine od debeline jeder je glede na rezultate simulacij linearna.



Slika 11. Utripna dolžina v odvisnosti od razmerja lomnih količnikov.

5 Zaključek

V članku je predstavljena sklopitev rodov in simulacija utripne dolžine v 2D optični večjedrni strukturi. Izkaže se, da je utripno valovno dolžino, od katere je odvisen presluh med jedri mogoče načrtovati tako, da je minimalna.

Simulacije, ki bi se najbolj približale realnemu stanju, bi morale biti 3D, saj bi edino na tak način lahko določili cilindrično geometrijo in merili utripno dolžino. Zaradi omejitev, ki jih predstavljajo določene komponente računalnika (velikost RAM-a in računski čas), so bile otežene že simulacije v dveh dimenzijah, simulacije v treh dimenzijah pa sploh nemogoče. Zato bodo 3D simulacije tematika nadaljnjega raziskovalnega dela.

6 Zahvala

Delo je delno financirala Evropska unija iz Evropskega socialnega sklada. Projekt "Večjedrna optična vlakna" se izvaja v okviru programa "Po kreativni poti do praktičnega znanja". Operativni program razvoja človekovih virov za obdobje 2007-2012, 1. razvojna prioriteta: "Spodbujanje podjetništva in prilagodljivosti" ter prednostne usmeritve 1.3 "Štipendijske sheme", v okviru potrjene operacije "Po kreativni poti do praktičnega znanja".

Literatura

- [1] Batagelj, B., Janyani, V., & Tomažič, S. (2015). Research challenges in optical communications towards 2020 and beyond. Informacije MIDEM, 44(3), 177-184.
- [2] J. Budin, Optične kominikacije, Ljubljana, 1993
- [3] M. Koshiba et al: Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle, EICE Electronics Express, Vol.6, No.2, 98–103, 2009.
- [4] C. R. Pollock, Fundamentals of optoelectronics, CBLS 2003.