

# Gibanje svetlobe v krivini

## ***Povzetek***

Članek opisuje meritev, kako radialni pospešek, ki deluje na svetlobo v krivini optičnega vlakna, vpliva na njeno hitrost.

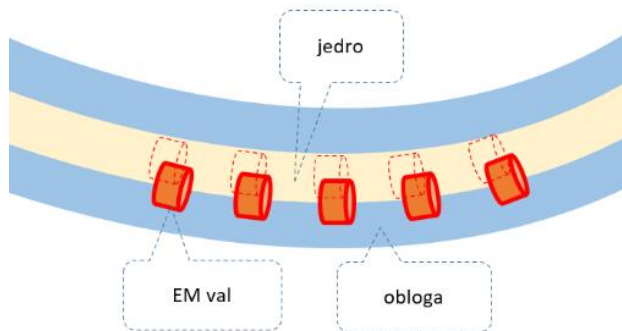
Radialni pospešek na svetlobo lahko ustvarimo na dva načina:

- *s krivljenjem optičnega vlakna, ali z*
- *vrtenjem navitja optičnega vlakna.*

Hitrost svetlobe se ob pojavu enakega radialnega pospeška spremeni enako, ne glede na način, kako ga ustvarimo.

## Predgovor

Optično vlakno je steklena nitka, ki v naše domove prinaša TV in internetni signal. Na poti po jaških in kanalih do našega doma je le-to skrivljeno na mnoge načine. Svetloba je na zavojih vlakna podvržena radialnim pospeškom.



*Radialni pospešek EM valove izrine v oblogo optičnega vlakna.*

**Slika 1**

Gibalna količina EM vala izhaja iz gibalne količine fotonov in znaša  $p = h/\lambda$ . V krivini optičnega vlakna vektor gibalne količine spreminjanja smer, kar pomeni spreminjanje gibalne količine. Gibalno količino lahko spreminja le sila na EM val. Radialni pospešek v krivini optičnega

vlakna ustvarja silo na svetlobni val in ga izriva iz jedra optičnega vlakna v stekleno oblogo.

Del EM vala potuje skozi jedro, del istega EM vala pa vzporedno po oblogi optičnega vlakna.

V ravnem vlaknu EM val potuje po sredini jedra optičnega vlakna, kot to prikazujejo črtkani valjčki na Sliki 1. V krivini optičnega vlakna pa so EM valovi, ki jih simbolizirajo valjčki, izmaknjeni iz sredine jedra optičnega vlakna.

Steklo v jedru ima večji lomni količnik kot v steklo oblogi optičnega vlakna. Hitrost svetlobe v oblogi optičnega vlakna bi torej morala biti večja kot v jedru. EM val jed povezan v celoto, čeprav potuje po dveh različnih lomih količnikih.

Delni prehod EM vala v oblogo optičnega vlakna posledično poveča hitrost svetlobe v krivini optičnega vlakna, kadar na EM val deluje radialni pospešek. Hitrost EM vala, ki delno potuje v jedru, delno pa v oblogi, je večja od hitrosti svetlobe v jedru in manjša od hitrosti svetlobe v oblogi, odvisno od ukrivljenosti optičnega vlakna. Radialni pospešek na svetlobo s tem v krivini optičnega vlakna poveča hitrost svetlobe.

Dokument opisuje meritev vpliva radialnih pospeškov na hitrost svetlobe. Meritev ni zahtevna in jo lahko opravi povprečno opremljen laboratorij za optiko.

## Uvod

Splošno priznana znanja izhajajo iz *meritev*. V nadaljevanju opisana meritev opozarja, da moramo obstoječa in priznana znanja nenehno preverjati in dopolnjevati.

### *Radialni pospešek svetlobi v optičnem vlaknu spremeni hitrost.*

Svetloba oziroma elektromagnetni (EM) val v krivem optičnem vlaknu občuti radialni pospešek. Le-ta je posledica velike hitrosti svetlobe v krivini optičnega vlakna (cca  $10^{18}$  m/s<sup>2</sup>). Radialni pospešek na svetlobo ustvarimo s krivljenjem vlakna, pa tudi z vrtenjem koluta optičnega vlakna okrog osi koluta, kot je to opisal Sagnac.

Vpliv radialnega pospeška na hitrost svetlobe v vlaknu je enak, ne glede na to, ali svetlobo v vlaknu radialno pospešujemo s krivljenjem vlakna ali z vrtenjem koluta optičnega vlakna.

Fizika spremembo hitrosti svetlobe v optičnem vlaknu pojasnjuje drugače v primeru krivljenja optičnega vlakna, kot v primeru vrtenja koluta optičnega vlakna. Namen te meritve je poenotenje teh razlag.

Pojav vpliva radialnega pospeška na hitrost svetlobe se uporablja v merilniku za merjenje krivljenja konstrukcij. Merilnik deluje tako, da optično vlakno prilepimo na konstrukcijo, ki ji merimo krivljenje. Merilnik je občutljiv na zelo majhne radije krivljenja. Opisan je v članku *Highly Sensitive Fiber Optic Curvature Sensor*.

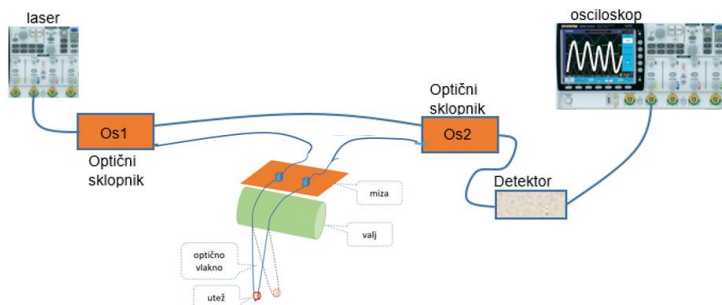
## Shema meritve

### *Hitrost svetlobe merimo na osnovi merjenja faznega zamika med žarkoma v interferometru.*

V meritvi optično vlakno krivimo na valju tako, da utež na optičnem vlaknu niha, kar prikazuje Slika 2. Spremembe hitrosti svetlobe v bolj ali manj ukrivljenem vlaknu merimo s pomočjo interferometra.

Interferometer je instrument za merjenje svetlobnih pojavov z izjemno natančnostjo. V interferometru se svetloba iz enega vira razdeli na dva žarka, ki potujeta po različnih optičnih poteh. Na drugem koncu žarka združimo in opazujemo njuno interferenco.

Laserski žarek iz laserja v optičnem sklopniku Os1 ločimo v dva žarka in ju usmerimo v dve optični vlakni. Žarek preko gornjega optičnega vlakna vodimo neposredno do drugega optičnega sklopnika Os2. Žarek preko spodnjega optičnega vlakna pa do drugega optičnega sklopnika potuje preko krivine optičnega vlakna na valju.



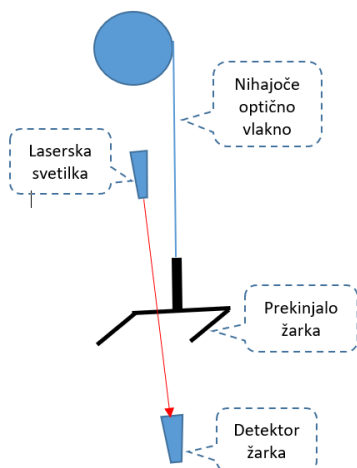
*Shema meritve, ki kaže, kako radialni pospešek vpliva  
na hitrost svetlobe*

**Slika 2**

Razlika v hitrostih svetlobe v enem in drugem kraku interferometra na sklopniku Os2 ustvari fazni zamik  $\Delta\Phi$  med žarkoma.

Točnost izmerjenih rezultatov je odvisna tudi od točnosti merjenja

ukrivljenosti vlakna, to je odklona nihala. Način merjenja odklona nihala prikazuje Slika 2a.



*Odklon nihajočega žarka  
merimo na osnovi prekinjanja  
laserskega žarka ob nihanju  
nihala.*

**Slika 2a**

Nihajoče optično vlakno je na dnu obteženo z utežjo, ki omogoča nihanje vlakna. Na uteži sta nameščeni dve paličici, ki ob določeni amplitudi nihala prekineta laserski žarek. Signal o prekinjanju laserskega žarka vodimo na drug vhod osciloskopa za merjenje interferenčnih signalov. Osciloskop tako enoumno pokaže število interferenčnih signalov v odvisnosti od spremembe ukrivljenosti optičnega vlakna.

V meritvi merimo fazni zamik med žarkoma v dveh primerih:

- Ob natezanju optičnega vlakna z namenom merjenja vpliva notranjih napetosti v vlaknu na lomni količnik stekla v vlaknu.
- Ob nihanju optičnega vlakna, napeljanega preko valja z namenom merjenja vpliva radialnega pospeška na svetlobo.

## Vpliv krivljenja optičnega vlakna na lomni količnik stekla.

*Napetosti v steklu optičnega vlakna, ki nastanejo ob krivljenju vlakna, ne vplivajo na lomni količnik stekla.*

Ob krivljenju v optičnem vlaknu v krivini vlakna prihaja do tlačnih in nateznih sil. Merimo torej, kako te sile vplivajo na lomni količnik stekla.

Literatura ne navaja (razen za posebne materiale), da bi se steklu zaradi mehanskih sil, spreminjal lomni količnik. Med fiziki pa obstaja tudi nasprotno mnenje, ki pravi, da spremembo hitrosti svetlobe v krivini optičnega vlakna povzročajo spremembe lomnega količnika stekla pod vplivom nateznih in tlačnih sil v vlaknu.

Na to vprašanje ponuja odgovor naslednja meritev.

Jedro enorodnega optičnega vlakna tipa ITU G.652 ima premer  $9\ \mu\text{m}$ . Ko zvijemo optično vlakno v krožnico, se na notranji strani krožnice optično vlakno skrajša za  $28\ \mu\text{m}$ , na zunanji strani pa za toliko podaljša. Tako podaljšanje in skrajšanje se pojavi ne glede na dolžino krožnice. Povečan oziroma zmanjšan obseg krožnice na notranji in zunanji strani označim z  $\Delta l = 28\ \mu\text{m}$ .

V nadaljevanju ravno optično vlakno natezam s silo, ki ga raztegne za  $\Delta l = 28\ \mu\text{m}$ . Silo natezanja določim na osnovi Hookovega zakona.



$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \frac{F}{S_0}.$$

Elastičnost stekla  $E$  znaša 60 GPa. Merim na primer pri dolžini vlakna 10 cm, kjer so veliki učinki krivljenja vlakna na tlačne in natezne sile.

Optično vlakno natezamo skupaj z oblogo, ki ima premer 125  $\mu\text{m}$ . Po Hookovem zakonu moramo optično vlakno dolžine 0,1 m raztegovati s silo 0,2 N, da dosežemo raztezek 28  $\mu\text{m}$ . Na snovi te sile izmerimo fazni zamik v vrednosti 27 interferenc.

*Pojasnilo:* Valovna dolžina svetlobe v vlaknu je 1,55  $\mu\text{m}$ , deljena z lomnim količnikom  $3/2$ . Izmerjenih 27 interferenc izhaja torej iz podaljšanja optičnega vlakna.

Meritev pokaže, da natezna sila ne povzroči dodatnih interferenc, ki bi izhajale iz sprememb lomnega količnika. Meritev potrjuje, da se lomni količnik stekla ob krivljenju vlakna ne spreminja in posledično *ne vpliva* na meritev vpliva radialnega pospeška na hitrost svetlobe v vlaknu.

## Krivljenje svetlobe

*Nehomogen lomni količnik svetlobi  
spreminja smer.*

V naravi najdemo različne načine krivljenja svetlobe. Krivljenja so posledica nehomogenega lomnega količnika, skozi katerega potuje svetloba. Način krivljenja svetlobnega žarka ilustrira pojav vpada svetlobe iz vesolja v ozračje, kot to prikazuje Slika 3c.



*Vpad dveh žarkov iz vesolja v zemeljsko ozračje.*

### Slika 3c

Na sliki je Zemlja in žarka, ki pod majhnim kotom vpadata iz vesolja. Lomni količnik zraka ju krivi. Žarek 'a' prileti pod takim kotom, da se po krivljenju zaključi na Zemlji, žarek 'b' pa po krivljenju odleti naprej v vesolje.

Lomni količnik zraka se z oddaljevanjem od Zemlje zvezno zmanjšuje. Če se lomni količnik spremeni točkovno (zrak – steklo), prihaja do loma

oziroma odboja svetlobe. Če pa se lomni količnik spreminja zvezno, pa prihaja do krivljenja svetlobe.

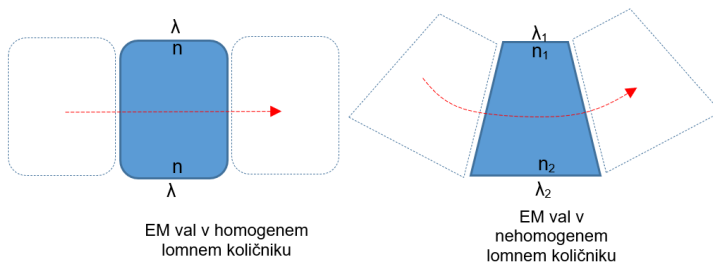
Svetlobni žarek se najbolj krivi, kjer je največji odvod lomnega količnika  $n$  po prostoru  $x$  ( $dn/dx$ ). To je v ozračju v bližini Zemlje. Bolj kot je žarek oddaljen od Zemlje, redkejša je atmosfera, manj se spreminja lomni količnik na enoto dolžine poti žarka, žarek pa je posledično manj ukrivljen.

Valovna funkcija in Maxwellove enačbe dosledno veljajo le v mediju s homogenim lomnim količnikom. Če je lomni količnik snovi različen znotraj istega EM vala, potem EM val v vsaki točki EM vala skuša vzpostaviti obliko EM vala, skladno z lomnim količnikom v tisti točki. EM val notranje sile povezujejo v enotno tvorbo, zato se le-ta kljub temu ohranja kot celovita tvorba. Vzpostavi se oblika EM vala, ki je kompromis poskusa vzpostavljanja različnih valovnih dolžin EM vala v segmentih različnih lomnih količnikov in njegove notranje povezanosti. Na osnovi dogajanj v EM valu, opisanih v članku Hamiltonian optics v Wikipediji, lahko sklepamo, da se v nehomogenem polju lomnih količnikov, hitrost vala prilagodi nekem kompromisu lomnih količnikov, v katerih se nahaja EM val. Oblika EM vala je kompromis valovnih funkcij, vezanih na različne lomne količnike znotraj EM vala. Različni lomni količniki EM val preoblikujejo na različne načine tako, da le-ta ni več simetričen, kar povzroča njegovo krivljenje.

EM val ima neko velikost in geometrijsko obliko. Kadar se nahaja v enakomernem lomnem količniku, je njegova oblika simetrična in potuje naravnost, kot kaže leva stran Slike 3d.

Kadar pa se spreminja lomni količnik znotraj EM vala, potem bodisi valovna funkcija, bodisi Maxwellove enačbe na različnih segmentih EM

vala skušajo ustvariti različne valovne dolžine, kar popači obliko EM vala. Popačena oblika EM vala pa mu krivi pot.



*Prehod EM vala iz homogenega v nehomogen lomni količnik.*

**Slika 3d**

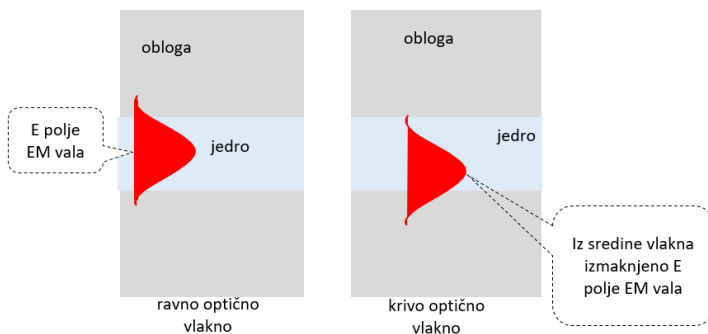
Na simbolni ravni tak popačen EM val prikazuje desna stran Slike 3d. EM val se nahaja v nehomogenem lomnem količniku. Na vrhu vala ima lomni količnik vrednost  $n_1$ , na spodnjem delu pa  $n_2$ .

Maxwellove enačbe v takih okoliščinah skušajo na vrhu EM vala ustvariti drugačno valovno dolžino, kot v spodnjem delu EM vala. EM val postane nesimetričen. Tak nesimetričen EM val ima težnjo krivljenja svoje poti.

## Krivljenje svetlobe v optičnem vlaknu

*V optičnem vlaknu žarek potuje po nehomogenem lomnem količniku, del po jedru, del pa po oblogi, kar krivi pot žarka.*

EM val je razporejen preko celotnega preseka jedra enorodnega optičnega vlakna, kot to kaže leva stran Slike 3a.



*EM val se razprostira po preseku enorodnega vlakna.*

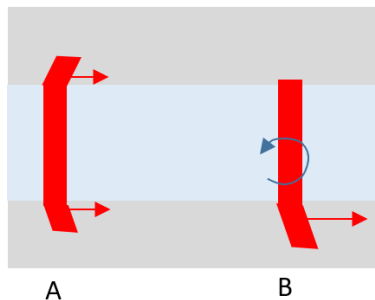
*Del vala pa sega tufi v oblogo.*

### Slika 3a

V krivini optičnega vlakna na EM val deluje radialni pospešek, ki izrine EM val iz sredine optičnega vlakna, kot to kaže desna stran Slike 3a.

Slika 3b na levi strani prikazuje EM val, ki se nahaja v sredini optičnega vlakna. Glavnina vala potuje po jedru, na robovih pa del EM vala potuje po oblogi. Različna lomna količnika jedra in obloge skušata ustvariti različni valovni dolžini vala v jedru in oblogi.

Ker je EM val medsebojno povezan, mu različna lomna količnika le popačita obliko. Večja valovna dolžina v oblogi skuša pospeševati gibanje EM vala, jedro pa upočasniti. Lomna količnika vala ustvarita neko vmesno hitrost. EM val ohranja svojo smer.



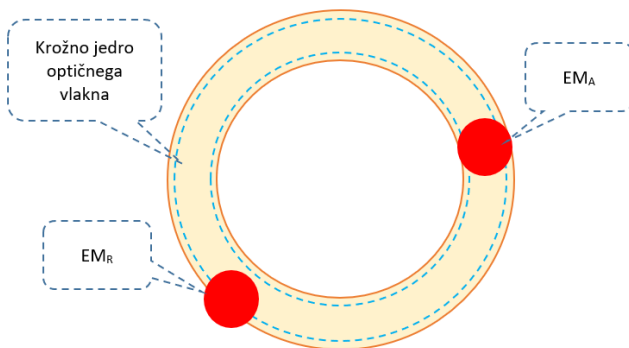
*V oblogi sila  $F$  na EM val deluje simetrično, kadar je EM val v sredini, sicer pa asimetrična sila EM val usmerja proti sredini jedra vlakna.*

### **Slika 3b**

Če pa EM val zaradi radialnega pospeška izmakne iz sredine optičnega vlakna, pa povečana valovna dolžina EM vala na eni strani povečuje hitrost EM vala, kot kaže desna stran slike 3b.

Tako asimetrično delovanje na EM val pa ustvarja vrtilni moment na EM val, ki ga usmerja proti središču jedra optičnega vlakna in mu s tem uravnava smer. V primeru krivega enorodnega optičnega vlakna je EM val ves čas izmaknjen iz sredine jedra optičnega vlakna. Izmik EM vala je način za stalno krivljenje EM vala po krivini optičnega vlakna.

Ob krivljenju vlakna se notranji del vlakna skrajša, zunanji del pa podaljša, kot kažeta črtkani črti na Sliki 3. Ob krivljenju vlakna se njegova dolžina ne spreminja. EM val po krivini potuje tako, da se notranji del vala na notranji črtkani črti giblje z manjšo hitrostjo od zunanjega dela vala, ki potuje po zunanji daljši črtkani črti. Črtkani črti sta namreč različno dolgi.



*EM val v krivini na zunanjem robu potuje z večjo hitrostjo, kot na notranjem robu.*

**Slika 3**

V krivini EM val ne potuje po sredini jedra optičnega vlakna, ampak ga sila radialnega pospeška delno izmakne v obod optičnega vlakna, kot kaže  $EM_R$  val na Sliki 3 oziroma, desna stran Slike 3a ali EM val na poziciji B na Sliki 3b.

Ta izmik EM vala podaljša pot EM vala. Vendar podaljšanje poti predstavlja neznatni del izmerjenega vpliva faznega zamika med žarkoma. Večina faznega zamika izhaja iz selitve poti EM vala proti oblogi optičnega vlakna, kjer je lomni količnik manjši, kot v jedru vlakna. EM val občuti neko povprečno vrednost obeh lomnih količnikov, v povprečju pa lomni količnik manjši, kar poveča hitrost EM vala. To povečanje hitrosti EM vala pa je opisano v nadaljevanju meritve.



## Meritev vpliva radialnega pospeška na hitrost svetlobe

*Ko optično vlakno skrívimo v krog, se med žarkoma pojavi fazni zamik, ki ni odvisen od premera kroga.*

Pri meritvi vpliva radialnega pospeška na hitrost svetlobe, utež na Sliki 2 niha. Optično vlakno se ciklično za določen kot navija in odvija z valja. Ob navijanju oziroma odvijanju merimo, kako sprememba ukrivljenosti optičnega vlakna, vpliva na hitrost svetlobe v njem.

### **Merilni rezultati:**

V meritvi uporabimo enorodno optično vlakno in valovno dolžino svetlobe 1550 nm. Merimo na štirih različnih premerih valjev: 23 mm, 35 mm, 58 mm in 167 mm.

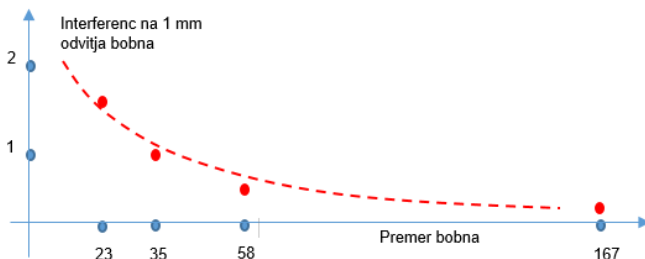
Rezultati meritve so prikazani v Tabeli 2.

|                                 |                                  |     |     |      |      |
|---------------------------------|----------------------------------|-----|-----|------|------|
| <b>d</b>                        | Premer bobna (mm)                | 23  | 35  | 58   | 167  |
| <b><math>\pi \cdot d</math></b> | Obseg bobna (mm)                 | 72  | 110 | 182  | 525  |
| <b><math>I_{mm}</math></b>      | Interferenc na mm odvitja vlakna | 1,4 | 1,1 | 0,53 | 0,26 |
| <b><math>I_{ob}</math></b>      | Interferenc na en obseg bobna    | 100 | 122 | 96   | 134  |

**d** - premer bobna,  **$\pi \cdot d$**  - obseg bobna,  **$I_{mm}$**  - število interferenc na dolžini 1 mm odvitja optičnega vlakna,  **$I_{ob}$**  – preračunano število interferenc na en ovoj vlakna na valj.

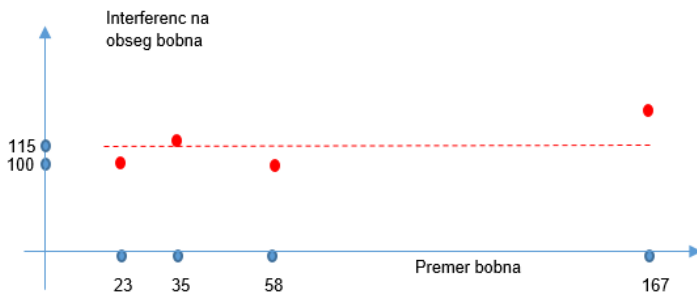
**Tabela 2**

### Grafično ponazoritev rezultatov



Število interferenc, ki se pojavijo pri razvitju 1 mm optičnega kabla z bobna ob različnih premerih bobna.

**Diagram 1**



Število interferenc, ki se pojavijo pri razvitju optičnega kabla v dolžini enega obsega valja ob različnih premerih valja.

**Diagram 2**

Na en ovoj optičnega vlakna se pojavi povprečno **113** interferenc, kar predstavlja 710 radianov faznega zamika med žarkoma interferometra, ne glede na premer valja.

## Ocena merilnih rezultatov

*Ob krivljenju optičnega vlakna se hitrost svetlobe spremeni za faktor  $10^5$  m/s ob navitju vlakna na valj premera 4 cm.*

Ob navijanju optičnega vlakna na boben, se pojavljajo interferenčni signali. Te signale štejemo. Tabela 2 oziroma Diagram 2 prikazuje, da se ob enem ovojju optičnega vlakna na valj pojavi 113 interferenc. Število interferenc ni odvisna od premera valja.

Število interferenčnih signalov zapišem v obliki faznega zamika  $\Delta\Phi$  med signaloma. Število interferenc  $I_{\text{obp}} \approx 113$  pomnožimo z  $2\pi$ .

$$\Delta\Phi = 2\pi \cdot I_{\text{obp}} = 2\pi \cdot 113 \approx 710 \text{ rd}$$

V enačbah se namesto enačaja (=) uporablja znak približno ( $\approx$ ). Za znak približno sta dva razloga. Prvi razlog je omejena točnost meritve. Drug razlog pa je v tipu optičnega vlakna. Fazni zamik  $\Delta\Phi$  je funkcija razlik lomnih količnikov jedra in obloge optičnega vlakna (NA) ter načina potovanja EM vala v enorodnem oziroma večrodnem optičnem vlaknu. Opisani rezultati meritve se nanašajo na optično vlakno tipa ITU G.652. V izračunu so tudi privzeti parametri merjenja: valovna dolžina svetlobe  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  in lomni količnik svetlobe v steklu  $n = 3/2$ .

Izračun dolžine  $\Delta l$  pove, koliko  $\mu\text{m}$  en žarek prehiteva drugega, pri faznem zamiku med žarkoma  $\Delta\Phi \approx 710 \text{ rd}$ .

$$\Delta l = \Delta\Phi \cdot \lambda / (2 \cdot \pi \cdot n)$$

V enačbi število izmerjenih interferenc ( $\Delta\Phi/2\pi$ ) pomnožimo z valovno dolžino svetlobe v optičnem vlaknu ( $\lambda/n$ ).

Ko napravim en ovoj optičnega vlakna na valj, se zaradi spremenjene hitrosti svetlobe spremeni dolžina opravljene poti svetlobe za:

$$\Delta l \approx 117 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Razdalja  $\Delta l$  je enaka ne glede na premer valja.

V nadaljevanju izrazim razmerje med razdaljo  $\Delta l$  in dolžino celotne krožnice enega ovoja optičnega vlakna na bobnu.

$$\Delta l / ob = \Delta\Phi \cdot \lambda / (4 \cdot \pi^2 \cdot r \cdot n)$$

Ob vnosu parametrov opravljene meritve ( $\lambda=1,55\mu\text{m}$  in  $n=3/2$ ), je

$$\Delta l / ob = 710,1,55 \cdot 10^{-6} / (4 \cdot \pi^2 \cdot r \cdot 3/2) \approx 18,58 \cdot 10^{-6} / r \text{ (števec je podan v m)}$$

Razmerje  $\Delta l / Ob$  je enako spremembi hitrosti svetlobe v ukrivljenem vlaknu glede na hitrost svetlobe v ravnem vlaknu.

$$\Delta v / (c/n) = \Delta l / Ob = \Delta\Phi \cdot \lambda / (4 \cdot \pi^2 \cdot n \cdot r)$$

$$\Delta v = c \cdot \Delta\Phi \cdot \lambda / (4 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot r) \quad \text{Enačba 1}$$

Parameter  $\Delta v$  opisuje spremembo hitrosti svetlobe kot posledico krivljenja optičnega vlakna,  $c$  pa je hitrost svetlobe v vakuumu.

V meritvi ob izbranih parametrih merjenja ( $\lambda=1,55\mu\text{m}$  in  $n=3/2$ ), dobimo rezultat:

$$\Delta v \approx c \cdot 12,38 \cdot 10^{-6} / r \text{ (števec je podan v m)}$$

Pri optičnem vlaknu, ki je na valju skriviljen na primer pod radijem valja  $r = 2 \text{ cm}$ , se hitrost svetlobe spremeni za 0,1%. Znatno!

## Izločitev motečih vplivov na izmerjene rezultate

*Meritev je laboratorijsko izvedljiva.*

*Moteče vplive zlahka izločimo.*

Natezne sile ne vplivajo na merilni rezultat. Optično vlakno je ves čas meritve obremenjeno z enako minimalno natezno silo. Posledično ni raztezanja ali krčenja vlakna med meritvijo. Vpliv elastičnosti stajkla je za tri velikostne razrede manjši, kot učinek radialnega pospeška na hitrost svetlobe.

Lomni količnik se s krivljenjem ne spreminja in ne vpliva na izmerjen rezultat, kot je bilo prikazano v že opisani meritvi na strani 6.

Sprememba temperature okolice neznatno vpliva na dolžino optičnega vlakna. Merimo s kratkimi optičnimi vlakni (do nekaj metrov). Meritev traja le nekaj sekund. Okoliščine zagotavljajo temperaturno stabilne pogoje merjenja.

Vpliv krivljenja vlakna na polarizacijo svetlobe ne vpliva na izmerjene rezultate. V meritvi lahko uporabljamo optično vlakno tipa PM1550-XP, ki ohranja polarizacijo svetlobe tudi ob krivljenju in zvijanju.

Porazdelitev svetlobe v optičnem vlaknu EM valovi v enorodnem vlaknu zasedajo celoten presek vlakna. V krivini optičnega vlakna radialni pospešek na EM val le-tega izmakne iz sredine jedra optičnega vlakna proti zunanjemu robu za manj kot  $0,1 \mu\text{m}$ , kot je prikazano na Sliki 3a. Izmik žarka je zanemarljiv glede na izmerjen rezultat . Geometrija poti žarka torej ne vpliva na merilni rezultat.

## Sagnac interferometer

### *Radialni pospešek vpliva na hitrost svetlobe v Sagnacovem interferometru.*

Radialnega pospeška na svetlobo v optičnem vlaknu ne povzroča le krivljenje vlakna. Ustvari ga tudi Sagnac interferometer s svojim vrtenjem.

Sagnacov interferometer svetlobo razdeli v dva žarka, ki potujeta po istem krožnem optičnem vlaknu v nasprotnih smereh. En žarek potuje v smeri vrtenja optičnega vlakna, drug žarek pa v nasprotni smeri vrtenja, zato en žarek občuti večji radialni pospešek kot drug žarek. Po vrnitvi žarkov na vstopno mesto žarka izstopita s časovnim zamikom, kar se odrazi na interferenci med žarkoma.

Literatura navaja, da sta različna časa poti žarkov posledica različno dolgih poti žarkov. Trditev je neskladna. Oba žarka potujeta po istem vlaknu, ki imata med vstopom in izstopom žarka izmerimo enako dolžino. Oba žarka torej prepotujeta enako dolgo optično vlakno. Na izhod pa prispeta v različnih časih.

V literaturi najdemo zapis, da vrtenje Sagnac interferometra povzroča fazni zamik med žarkoma v približni vrednosti:

$$\Delta\phi \approx \frac{8\pi}{\lambda c} \omega \cdot A$$

Enačba 2

Enačbo preoblikujem tako, da vrednost  $\omega$  zamenjam z vrednostjo  $v/r$ , kjer je  $v$  obodna hitrost vrtenja interferometra,  $r$  pa polmer zanke optičnega vlakna interferometra. Površino kroga zanke optičnega vlakna  $A$  nadomestim s  $\pi \cdot r^2$ .

$$\text{Vrednost člena } \omega \cdot A = (v/r) \cdot (\pi \cdot r^2) = \pi \cdot v \cdot r \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

$$\text{Enačba za } \Delta\Phi \text{ pa dobi obliko } \Delta\Phi \approx 8 \cdot \pi^2 \cdot v \cdot r / \lambda \cdot c$$

Vprašam se, kakšen je odnos med obodno hitrostjo interferometra  $v$  in spremembo hitrosti svetlobe  $\Delta v$  v optičnem vlaknu.

Spremembo hitrosti svetlobe v optičnem vlaknu v splošnem pojasnjuje *Enačba 1* na strani 12.

$$\Delta v = c \cdot \Delta\Phi \cdot \lambda / (4 \cdot \pi^2 \cdot n \cdot r)$$

V tej enačbi  $\Delta\Phi$  nadomestim z vrednostjo faznega zamika v Sagnacovem interferometru, kot jo opisuje *Enačba 2*.

$$\Delta\Phi \approx 8 \cdot \pi^2 \cdot v \cdot r / \lambda \cdot c$$

Po vstavitvi  $\Delta\Phi$  v gornjo enačbo dobim povezavo med obodno hitrostjo interferometra  $v$  in spremembo hitrosti svetlobe  $\Delta v$  v optičnem vlaknu.

$$\Delta v \approx 2v$$

Sprememba hitrosti svetlobe  $\Delta v$  v optičnem vlaknu Sagnacovega interferometra je približno dvakratna obodna hitrost interferometra.

V enem žarku se hitrost svetlobe  $\Delta v$  poveča za obodno hitrost interferometra  $v$ , v drugem žarku pa za enako vrednost zmanjša.

Razmerje med obodno hitrostjo interferometra in spremembo hitrosti svetlobe v optičnem vlaknu lahko zelo odstopa od enačbe  $\Delta v \approx 2v$ . To razmerje je odvisno od lomnih količnikov jedra in oboda optičnega

vlakna (NA). Še bolj pa je odvisno od tipa optičnega vlakna, ali Sagnacov interferometer izdelamo na osnovi enorodnega ali večrodnega vlakna. V primeru večrodnega vlakna je sprememba hitrosti svetlobe  $\Delta v$  lahko mnogo manjša od obodne hitrosti interferometra.

$$\Delta v < v.$$

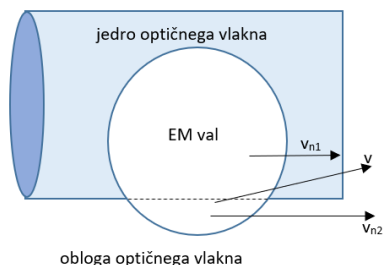
Tako pestre sprememba hitrosti svetlobe, s tem pa pestri fazni zamik med žarkoma  $\Delta\Phi$  ob enaki kotni hitrosti Sagnacovega interferometra pa izključuje možnost v obeh žarkih enake hitrosti svetlobe. Geometrija poti žarkov in enaka hitrost žarkov ne more služiti za faznega zamika med žarkoma.



### ***Izvor sprememb hitrosti svetlobe?***

***Potovanje EM vala v dveh lomnih količnikih  
le-tega radialno pospeši in ji poveča hitrost.***

Radialni pospešek izrine EM val iz sredine jedra optičnega vlakna. Izrivanje EM vala kaže Slika 4. Spodnji del EM vala, ki sega v obod optičnega vlakna, se zaradi manjšega lomnega količnika skuša gibati hitreje, kot gornji del EM vala, ki ostaja v jedru. Kljub delovanju dveh lomnih količnikov na EM val, le-ta ostaja enovit in ne razpade.



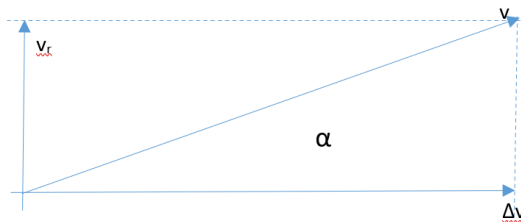
*Radialni pospešek izrine EM val iz sredine jedra optičnega vlakna.*

**Slika 4**

Različni hitrosti,  $v_{n1}$  in  $v_{n2}$ , ki izhajata iz različnih lomnih količnikov, EM valu določita neko hitrost  $v$ , ki je med  $v_{n1}$  in  $v_{n2}$ . Hitrost EM vala  $v$  je večja od hitrosti EM vala v jedru in manjša od hitrosti EM vala v obodu.

Različna lomna količnika vplivata tudi na smer EM vala, kot kaže vektor  $\mathbf{v}$  na Sliki 4. EM val radialno pospešuje in sledi krivini optičnega vlakna. Absolutna vrednost radialne hitrosti  $\mathbf{v}_r$  ostaja ves čas enaka.

Spremembo hitrosti svetlobe v krivini optičnega vlakna  $\mathbf{v}$ , lahko ponazorimo z vsotama hitrosti  $\mathbf{v}_r$  in  $\Delta\mathbf{v}$  na Sliki 5. Diagram prikazuje radialno hitrost  $\mathbf{v}_r$  in spremembo vzdolžne hitrosti  $\Delta\mathbf{v}$ . Na diagramu ni celotne hitrost svetlobe v optičnem vlaknu, ki je enaka  $c/n + \Delta\mathbf{v}$ .



*Lomna količnika, ki delujeta na EM val, ustvarita radialno hitrost svetlobe  $v_r$ . Poveča pa tudi vzdolžno hitrost svetlobe za  $\Delta v$ .*

### Slika 5

Vzdolžne  $\Delta\mathbf{v}$  in radialna  $\mathbf{v}_r$  hitrost svetlobe sta med seboj v razmerju, ki ga določa kot  $\alpha$ . Kot  $\alpha$  pa določata lomnima količnikoma jedra in obloge optičnega vlakna, pa tudi način potovanja EM vala v različnih tipih optičnega vlakna. Različni tipi optičnih vlaken z različnimi lomnimi količniki ustvarjajo različne kote  $\alpha$ , s tem pa različno vplivajo na povečanje vzdolžne hitrosti svetlobe  $\Delta v$  v optičnem vlaknu.

Med radialno hitrostjo svetlobe in radialnim pospeškom je naslednji odnos:

$$\mathbf{v}_r = (\mathbf{r} \cdot \mathbf{a}_r)^{1/2}$$

Pri izbranem radiju krivine optičnega vlakna je radialna hitrost  $v_r$  sorazmerna s korenem iz radialnega pospeška. Ta radialni pospešek  $a_r$  lahko izhaja bodisi iz krivljenja vlakna, iz vrtenja Sagnacovega interferometra ali iz obojega hkrati.

Na osnovi geometrije trikotnika na Sliki 5 je razvidno, da je posledično tudi  $\Delta v$  sorazmerna s korenem iz radialnega pospeška. Kadar se pojavi  $v_r$ , se v enakem razmerju pojavi tudi  $\Delta v$ .

#### Primerjava izmerjenih vrednosti faznih zamikov

*Sagnacov interferometer ustvari enake spremembe hitrosti svetlobe, kot krivljenje vlakna, ob enakem radialnem pospešku na svetlobo.*

V nadaljevanju primerjam izmerjen fazni zamik  $\Delta\Phi$  med žarkoma, ki ga ustvarja izbran radialni pospešek:

- v krivilni optičnega vlakna s faznim zamikom,
- ki je posledica vrtenja Sagnacovega interferometra.

Iz diagrama na Sliki 5 prepoznamo, da je radialni pospešek v krivini optičnega vlakna in v Sagnacovem interferometru enak, kadar sta enaki spremembi hitrosti svetlobe  $\Delta v$  pri enakem radiju  $r$  zanke optičnega vlakna. Primerjam torej fazni zamik  $\Delta\Phi$  pri enaki spremembi hitrosti svetlobe  $\Delta v$  in enaki ukrivljenosti zank optičnega vlakna.

Krivina optičnega vlakna povzroči spremembo hitrosti svetlobe za vrednost  $\Delta v = c \cdot 12,38 \cdot 10^{-6}/r$  v pogojih ( $\lambda=1,55\mu\text{m}$  in  $n=3/2$ ) *Enačba 1*

V nadaljevanju zavrtim Sagnacov interferometer z obodno hitrostjo  $v$ , ki v vlaknu ustvarja spremembo hitrosti svetlobe  $\Delta v$ . Računam  $\Delta\Phi$  v Sagnacovem interferometru pri izbrani spremembi hitrosti svetlobe.

V enačbo za  $\omega \cdot A$  namesto obodne hitrosti vrtenja interferometra  $v$  vstavim spremembo hitrosti  $\Delta v$ , ki se dogodi pri svetlobi kot posledica krivljenja optičnega vlakna. Upoštevam enačbo  $\Delta v \approx 2v$ . Vsakemu od žarkov v Sagnacovem interferometru se hitrost svetlobe  $\Delta v$  spremeni v vrednosti  $\Delta v = v$ . Posledično enačba  $\omega \cdot A = \pi \cdot v \cdot r$  dobi vrednost:

$$\omega \cdot A = \pi \cdot v \cdot r = \pi \cdot \Delta v \cdot r$$

V enačbo vnesem vrednost za  $\Delta v \approx c \cdot 12,38 \cdot 10^{-6}/r$

Faktor  $\omega \cdot A$  pri valovni dolžini  $\lambda=1,55 \mu\text{m}$  znaša:

$$\omega \cdot A = \pi \cdot \Delta v \cdot r = \pi \cdot (c \cdot 12,38 \cdot 10^{-6}/r) \cdot r = \pi \cdot c \cdot 12,38 \cdot 10^{-6}$$

$$\omega \cdot A = 116 \cdot 10^2$$

V enačbi je radij krivljenja in radij zanke vlakna v Sagnacovem interferometru označen z istim znakom  $r$ , ker smo v izhodišču izenačili oba radija.

Vrednost prvega člena  $8 \cdot \pi / (\lambda \cdot c)$  pri  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ , znaša  $5,4 \cdot 10^{-2}$

Izračun faznega zamika v Sagnacovem interferometru pri  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  znaša

$$\Delta\Phi = (8 \cdot \pi / (\lambda \cdot c)) \cdot (\omega \cdot A) = 117 \cdot 10^2 \cdot 5,4 \cdot 10^{-2} = 630 \text{ rd}$$

Pri enaki spremembi obodne hitrosti svetlobe v dveh različnih okoliščinah izmerimo:

- V primeru krivljenja optičnega vlakna  $\Delta\Phi = 710$  rd faznega zamika med žarkoma. Ta ni odvisen od premera krivljenja.
- V primeru Sagnacovega interferometra pa  $\Delta\Phi = 630$  rd faznega zamika, pri enakem radiju, kot v primeru krivljenja vlakna.

Rezultat pokaže približno deset odstotkov različen fazni zamik med žarkoma. Pojasnitev te razlike med faznima zamikoma je naloga bodočih točnejših meritev, ki lahko pomenijo tudi korekcijo zakonitosti tako definicije faznega zamika Sagnacovega interferometra, kot tudi faznega zamika krivljenja vlakna.

Je pa ta razlika dovolj majhna, da lahko sklepamo, da je fazni zamik, tako v primeru krivljenja vlakna, kot v primeru Sagnacovega interferometra, možno pojasniti na osnovi istih zakonitosti vpliva radialnega pospeška svetlobe na hitrost svetlobe.

## **Zaključek**

Meritve kažejo, da je se hitrost svetlobe v optičnem vlaknu spreminja sorazmerno s korenem iz radialnega pospeška, ki deluje na svetlobo v vlaknu. Rezultati meritve so skladni s teoretičnim opisom pojava v tem zapisu.

Meritev še ni zaključena. Ni še izmerjeno, kako razlika v lomnih količnikih jedra in obloge optičnega vlakna vpliva na spremembo  $\Delta\Phi$  ter s tem vzdolžne hitrosti svetlobe.

V literaturi objavljena enačba Sagnacovega interferometra opiše približno vrednost faznega zamika med žarkoma  $\Delta\Phi$ . Enačbo za fazni zamik na osnovi natančnejših meritev ob upoštevanju lomnih količnikov stekla v jedru in oblogi optičnega vlakna lahko dopolnimo tako, da bo izražala točno vrednost  $\Delta\Phi$ .

Natančnejša meritev krivljenja vlakna in Sagnacovega interferometra pokaž, zakaj merilni rezultati kažejo nekaj odstotno razliko faznega zamika  $\Delta\Phi$  v primeru krivljenja vlakna oziroma Sagnacovega interferometra.