

ФИБЕР-ОПТИЧКА МЕТОДА ЗА БЕСКОНТАКТНО МЕРЕЊЕ ПОЛОЖАЈА ДИФУЗНЕ МЕТЕ НА ОСНОВУ РАЗЛАГАЊА СПЕКТРА БЕЛЕ СВЕТЛОСТИ

Зоран Ђиновић, Милош Томић*, Александар Вујанић,
ISAS, Vienna University of Technology, Vienna 1040, Austria

*Институт безбедности, Краљице Ане бб, Београд

Садржај – Приказана је метода за бесконтактно мерење положаја дифузне мете која је погодна за реализацију фибер-оптичког сензора. Метода се заснива на пројекцији угаоне расподеле спектра беле светлости на мету и анализи спектра одбијеног зрачења. Мерна глава, која је потпуно пасивна и начињена од диелектричних материјала, повезана је са местом читавања помоћу два вишемодна оптичка влакна. Показано је да је метода погодна за мерења положаја у опсегу реда до неколико центиметара, са мерном несигурношћу $\pm 25 \mu\text{m}$.

1. УВОД

Бесконтактно мерење положаја и помераја мете је проблем за чије је решавање развијен бескрајан број решења. Међутим, у условима јаких електромагнетних и/или јонизујућих зрачења на месту мерења није погодно користити електронске компоненте. У таквим ситуацијама се као погодно решење намећу фибер-оптички сензори. У до сада испитиваним фибер-оптичким конфигурацијама су примењени бројни принципи детекције: на основу промене интензитета светлости [1,2], са триангулационом конфигурацијом [3,4], интерферометријске методе [5,6] и сл. [7,8]. Мерни системи код којих се са положајем мете мења интензитет светлости морају да се изборе са проблемима калибрације, који настају услед додатних слабљења зрачења дуж оптичких влакана, променом снаге извора, променом рефлексивности мете и сл. Триангулационе конфигурације захтевају велики број пријемних влакана у уређеној структури, углавном реда величине броја различивих тачака сензора. Уређени снопови оптичких влакана су веома скупи, што их чини непогодним у случајевима када фибер-оптичка веза треба да буде дужа од неколико метара. Интерферометријски сензори доносе највећу резолуцију, чак у пикометарској области, док употреба нискокоherentног зрачења решава проблеме који потичу од периодичности интерферометријског сигнала. Међутим, овакви мерни системи најчешће захтевају тзв. кооперативну мету, са огледалским или ретрорефлексивним елементом који је круто везан са метом.

У овом раду је приказана нова метода која се базира на модификованом триангулационом принципу, када је за везу читавачке јединице са сензорском главом потребно само два оптичка влакна. У предложеној методи се у сензорској глави налази дисперзиони елемент, којим се доведена светлост широког емитујућег спектра разлаже у одговарајући угаони спектар који се затим пројектује на мету. Различит део спектра погађа

мету у различитим положајима мете, те се и према пријемном влакну одбија различит део емитованог спектра. Анализом одбијеног спектра у читавачкој јединици се налази положај мете. С обзиром да се детекција врши у спектралном домену, мерни систем је имун на промене снаге светлосног извора, промене слабљења дуж влакана и промене рефлексивности мете. Триангулациони принцип одређује геометрију сензорске главе, која захтева нешто веће габарите у правцу управном на померај који се мери, а у зависности од жељеног мерног опсега. Друге две димензије сензорске главе, међутим, не морају прелазити десетак милиметара, што је углавном диктирано потребним пречником улазне апертуре пријемног оптичког система.

2. ТЕОРИЈА

Основна геометрија предложене методе је приказана на Сл.1. Колимисани светлосни сноп широког електромагнетног спектра пада на пасивни оптички елемент, који га разлаже према таласним дужинама у угаони спектар. Разлагање се може извести помоћу нпр. дисперзионе призме или трансмисионе или рефлексивне дифракционе решетке. Рефлексивне дифракционе решетке са урезаним линијама имају највећу ефикасност, посебно на таласним дужинама које одговарају углу нарезивања.

Колимисани сноп светлости који пада на планарну дифракциону решетку под углом (\mathcal{G}) у односу на нормалу на раван решетке одбија се под углом (\mathcal{G}_λ), који је са таласном дужином светлости (λ) повезан добро познатом релацијом, нпр. [8]:

$$\mathcal{G}_\lambda = \arcsin \left[\pm \frac{m \lambda}{d} - \sin \theta_i \right] \quad (1)$$

где је d – периода зареза на дифракционој решетки а m – дифракциони ред. Користећи ознаке на Сл.1., где је растојање до мете означено са L , растојање између дифракционе решетке и осе пријемног видног поља D , централна таласна дужина светлости која погађа мету у тачки коју посматра пријемна апертура је:

$$\lambda = \frac{d}{m} \left[\sin \theta_i - \sin \left(\arctan \frac{L}{D} - \theta_i \right) \right] \quad (2)$$

Видно поље пријемног влакна којим се светлост која се одбија од мете води до спектралног анализатора је одређено нумеричком апертуром (NA) и пречником (a)

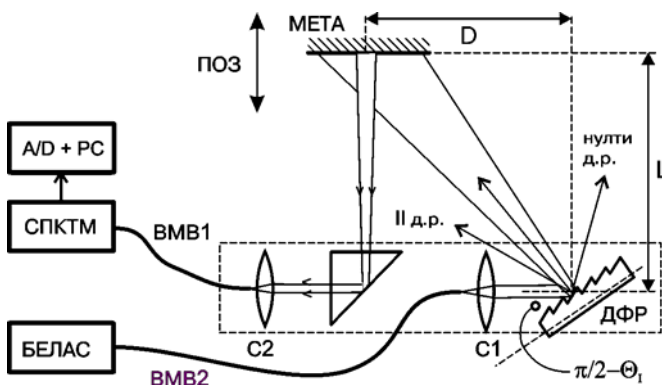
оптичког влакна и жижном даљином пријемног сочива (f_R). Ширина области која се у једном тренутку види пријемним влакном је:

$$T = 2 \cdot f \cdot NA + \frac{a}{f} \cdot L \quad (3)$$

Иста релација важи и за сноп којим се осветљава дифракциона решетка. Комбинацијом једначине (2) и једначине (3) примењене на предајно и пријемно влакно, узимајући у обзир спектралну расподелу побудне светлости и спектралне карактеристике дифракционе решетке и спектрометра, може се доћи до теоријске релације која даје везу између положаја мете и детектованог спектра одбијене светлости. У општем случају ова релација је веома сложена, али се за сваку конкретну конфигурацију може добити нумерички, применом нпр. програмског пакета MATLAB. У добијеним кривама често је карактеристична јака нелинеарност везе центар спектра-положај мете, као и значајна промена облика и ширине спектралног пика. Таква веза има за последицу различиту осетљивост мерног система у различитим положајима мете. Такође, сложеност ових релација захтева проналажење оптималне конфигурације за сваки жељени опсег мерења.

3. ЕКСПЕРИМЕНТ

Поставка експеримента којим је верификована метода приказана је на Сл.1. Бела светлост из лампе P91 SureFire (БЕЛАС), чији је спектар даг на Сл.2., уводи се у вишемодно оптичко влакно Spectran HCN-M0300T, димензија 300/330 μm (ВМВ1), и доводи до места мерења. Светлост из влакна се колимише ахроматским дублетом жижне даљине 5.6 mm (C1) у усмерава ка дифракционој решетки (ДФР). Оптичка снага колимисане светлости је око 1 mW. Ширина снопа на решетки је око 6 mm, а упадни угао обично $30^\circ \div 50^\circ$.

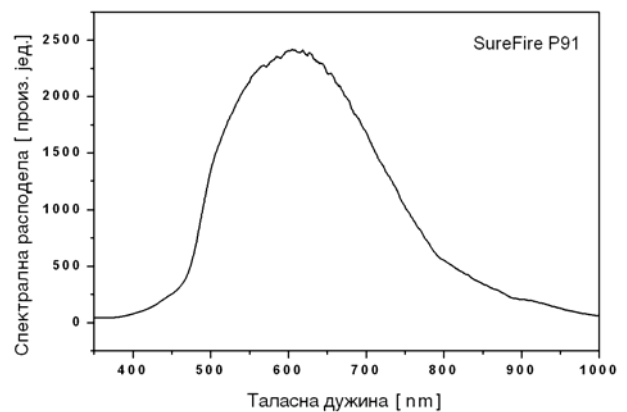


Сл.1. Конфигурација експеримента

Дифракциона решетка је рефлективног типа са урезаним линијама, са 1200 зареза/mm. Упадни сноп се на решетки разбија у три значајна снопа: сноп беле

светлости који се одбија под углом једнаком упадном углу (нулти дифракциони ред) и дифрактоване снопове првог и другог реда, под угловима дефинисаним у Јед.(1). Мету представља раван комад белог папира монтиран на моторизовани позиционер (ПОЗ), којим је омогућено кретање мете у правцу управном на правац колимисаног снопа. Испитно оптичко влакно је вишемодно влакно истог типа (ВМВ2), има нумеричку апертуру 0.37, и у спречи је са асферичним сочивом жижне даљине 2.75mm (C2). Испитно видно поље је облика спороширућег снопа пречника око 3mm на месту сочива, са дивергенцијом од око 0.1 mrad. Да би се омогућила израда танке сензорске главе, што представља услов у одређеним применама, испитни сноп је скренут под правим углом помоћу минијатурне правоугле призме страница 5x5 mm.

Растојање између осе испитног снопа и дифракционе решетке (D) је веома важно јер та величина, заједно са упадним углом снопа беле светлости (θ_1), представља параметар помоћу кога се може подешавати мерни и динамички опсег сензора. Резултати који су приказани на сликама у следећем поглављу су добијени у две различите конфигурације, са два различита упадна угла и два различита растојања.



Сл.2. Спектар зрачења беле лампе SureFire P91, која је коришћена у експериментима

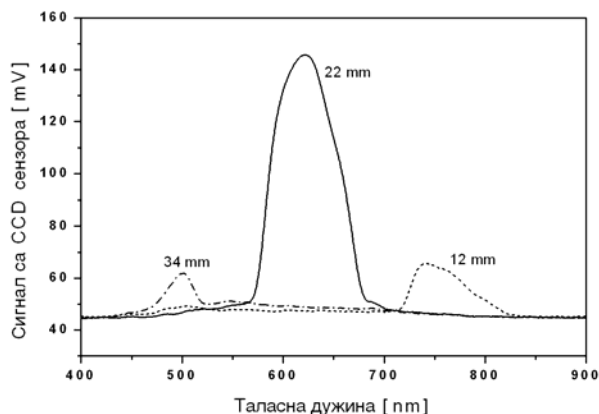
Детекција спектра одбијене светлости се врши помоћу фиброоптичког спектрометра Ocean Optics S2000 (СПКТМ). Резолуција овог спектрометра, заснованог на дифракционој решетки од 1200 зареза/mm и CCD линијском сензору са 2048 тачака је 0.5 nm, у опсегу од 350 до 1000 nm. Излаз спектрометра је, преко аналого-дигиталног конвертора доведен у персонални рачунар, помоћу кога се снима и анализира спектар. Обработом у програмском пакету MATLAB се добија положај центра спектра.

Време интеграције CCD сензора у спектрометру је 100 ms, и усредњава се осам узастопних спектра, тако да укупно мерење једне позиције мете траје нешто испод једне секунде. Пошто је потребно време интеграције одређено количином светлости која се одбија од мете, брзина мерења може бити већа или мања, у зависности од типа мете и количине беле светлости која се убацује у доводно оптичко влакно.

4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

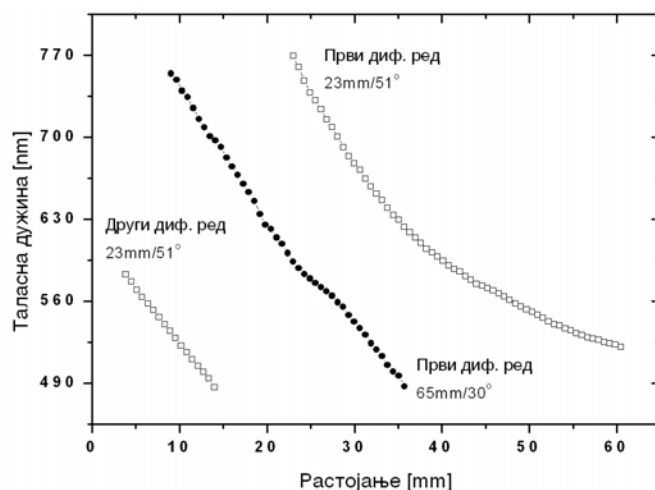
Типични спектри светлости која се одбија од мете су приказани на Сл.3. Ови спектри су добијени у геометријској поставци у којој је упадни угао колимисаног снопа на дифракциону решетку 30° а растојање од дифракционе решетке до осе пријемне апертуре 69 mm. Приказани су спектри за средишњи и два гранична положаја мете. Са Сл.3 се види да су спектрални пикови при крајевима мерне области нижи по интензитету и спектрално ужи, као што и предвиђају теоријске релације.

Величина сигнала који се добија у спектрометру у принципу не утиче на резултат, мада, код врло малих сигнала, може бити отежано утврђивање тачног положаја максималне вредности. Ширина спектра такође не утиче на резултат мерења, али се мерна несигурност може повећати код веома широких пикова. У случају веома малих рефлективности мете, сигнал се може повећати и продужењем времена интеграције CCD сензорског низа у спектрометру. Ова техника, међутим, продужава и време мерења једне позиције.



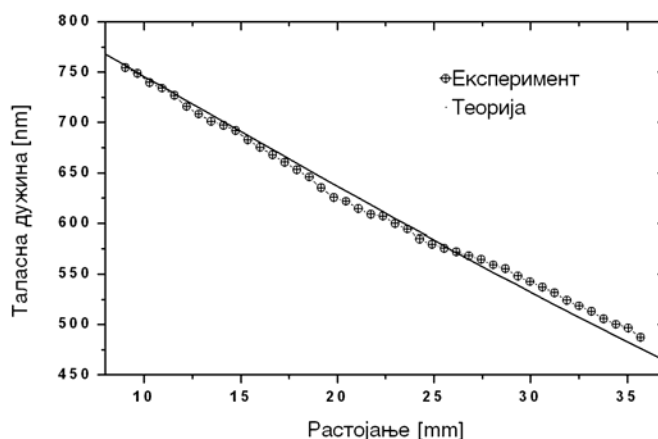
Сл.3. Типични спектри светлости која се одбија од мете, прима испитним оптичким влакном и детектује помоћу CCD линије у спектрометру

На Сл.4. су приказани резултати добијени при померању мете у правцу осе видног поља прихватног влакна, у две различите геометријске конфигурације. За једну конфигурацију су приказани резултати за два различита дифракциона реда, који постоје истовремено у мерном пољу. Очигледно је да се подешавањем геометрије мерног система може покрити жељени опсег мерења, у растојањима од неколико па до стотинак милиметара. Горња граница опсега зависи пре свега од јачине светлости на излазу из доводног влакна и од рефлективности мете. Такође је очигледно да се не може покрити цео опсег са једном геометријском конфигурацијом, већ се мора изабрати одређена област ширине реда неколико центиметара. Интересантно је приметити да геометријска конфигурација у принципу има два мерна опсега, на два дифракциона реда, који су, међутим, међусобно размакнути. Као што се може уочити на Сл.4., други дифракциони ред има већу осетљивост, што се могло очекивати на основу Јед.(2).



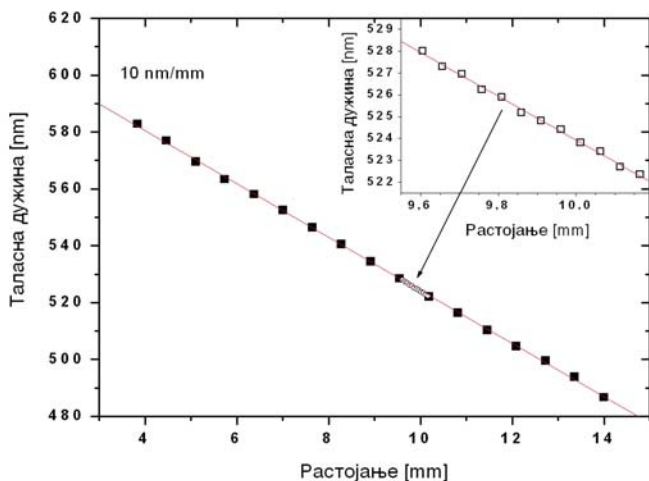
Сл. 4. Положај центра спектра светлости у зависности од растојања мете, за две различите геометријске конфигурације и за једну конфигурацију за два различита реда дифракције

На Сл.5. је приказана издвојена средња крива са Сл.4., добијена у конфигурацији са упадним углом од 30° , када се мета помера у опсегу од 10 mm до 35 mm и посматра први дифракциони ред. На тачке добијене мерењем је суперпонирана теоријска крива која се добија применом Јед.(2). Делимично неслагање је последица неунформности побудног спектра као и спектралних зависности осталих елемената у систему (сочива, оптичка влакна, две дифракционе решетке, CCD низ). У експериментима са другим светлосним изворима, чији спектар има изражене пикове, добијају се релативно велика разликажења са једноставним теоријским моделом, који не узима у обзир спектралне зависности.



Сл.5. Положај центра спектра у првом дифракционом реду, за случај упадног угла од 30° (као на Сл.4.) и теоријска крива на основу Јед.(2)

На Сл.6. је приказан издвојен резултат добијен у другом дифракционом реду, са геометријском конфигурацијом у којој је упадни угао 51° и размак међу осама 23mm. Приказана крива је веома линеарна, а коефицијент везе између помераја мете и помераја спектралног пика је око 10 nm/mm. У уметнутој слици на Сл.6. је приказан увећани детаљ те криве, са свим мерним тачкама, када су сукцесивни положаји мете међусобно удаљени по 25 μ m.



Сл. 6. Положај центра спектра у другом дифракционом реду, као на Сл.4. и детаљ криве

Пошто је резолуција спектрометра који је коришћен у овом експерименту 0.5 nm, из нагиба криве на Сл.5., као и из увећаног детаља се може закључити да је мерна несигурност ове мерне конфигурације око 50 μm ($\pm 25\mu\text{m}$). С обзиром да је мерни опсег у овом случају нешто преко 10 mm, укупан број мерних тачака је нешто већи од 200. У случају криве која је добијена у истој геометријској конфигурацији, али у првом дифракционом реду, Сл.4., мерна несигурност је реда 100 μm , што доноси негде око 400 различитих тачака. Број различитих тачака се може повећавати мењајући геометрију мерне конфигурације и употребом гушће дифракционе решетке у сензорској глави, идући према броју пиксела на CCD линијском сензору у спектрометру (у нашем случају 2048).

6. ЗАКЉУЧАК

У раду је испитана једна модификација триангулационе методе за мерење положаја и помераја дифузно рефлектујуће мете користећи оптичка влакна. Новина приказане методе се огледа у употребљеном принципу, који се заснива на обасјавању мете угаоно развијеним спектром беле светлости и спектралној анализи одбијеног зрачења. Предности које показује ова метода у односу на класична решења су: независност сигнала од промене снаге светлосног извора, унешених слабљења дуж оптичког влакна и промене рефлективности мете. Сензорска глава може бити веома танка и повезана је са местом читавања са свега два оптичка влакна. Показано да се мерни опсег и резолуција система може подешавати променом геометрије сензорске главе. Експериментално је показано да је једноставном, неоптимизованом конфигурацијом може постићи преко 400 различитих тачака. Опсег мерења може бити до неколико центиметара, а показано је да је мерна несигурност на блиским растојањима око $\pm 25 \mu\text{m}$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cook, R.O., and Hamm, C.W., "Fiber Optic Lever Displacement Transducer", *Applied Optics*, Vol. 18, p. 3230, Oct. 1, 1979.
- [2] Hoogenboom, L., Allen, G.H., Wang, S., "Theoretical and Experimental Analysis of a Fiber Optic Proximity Probe." *S.P.I.E. Technical Symposium, East 84*, Paper #478-25, Arlington, Virginia, April 29, 1984
- [3] J. Elazar, S. Selmic, M. Tomic, M. Prokin, "A fibre-optic displacement sensor for a cyclotron environment based on a modified triangulation method", *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, vol. 4, pp. s347-s355, 2002
- [4] S. S. Raja., A. Kodakkat, A.G.Bhujle, "Fiber optic laser triangulation probe for remote measurement in a radioactive environment", *Proc. on International conference on laser applications and optical metrology ICLAOM-03*, paper PP-20, Delhi, India, 1-4 Dec 2003
- [5] M. Tomic, J. Elazar, Z. Djinovic, "Low-coherence interferometric method for measurement of displacement based on a 3x3 fibre-optic directional coupler", *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* vol.4, pp. S381-S386, 2002
- [6] Z. Djinovic, M.Tomic, S. Mitic, M. Cordes, A. Vujanic, Ch. Kment, "Nanometer Scale Measurement of Wear Events by Fiber-Optic White Light Interferometry", *Technical Digest of Eurosensors XVIII* (2004), pp.166-167, Rome, Italy, September 2004
- [7] J. M. Lopez-Higuera, "Handbook of optical fibre sensing technology", John Wiley & Sons Ltd.Chichester, England, 1th ed, 2002
- [8] Y. Takamatsu, K. Tomita, J. Takagi, T. Yamashita, "Fiber-optic Position Sensor", *Sensors and Actuators*, A21-A23 (1990) 435-437
- [9] Hecht, E., "Optics", Addison-Wesley Publishing Company Inc., 2nd edition, 1990

Abstract – A method for non-contact measurement of position of a diffusive target, suitable for a fiber optic sensor realization, is presented. The method is based on modified triangular principle and spectrum analysis of broadband light backreflected from the target. The sensing head, being completely made of dielectric materials, is connected to the reading unit by two multimode optical fibers. The realizable measuring range is up to several centimetres, with a measuring uncertainty of $\pm 25 \mu\text{m}$.

FIBER OPTIC METHOD FOR NON-CONTACT MEASUREMENT OF DIFFUSIVE TARGET POSITION BASED ON SPECTRUM ANALYSIS

Z. Đinović, M. Tomić, A. Vujančić