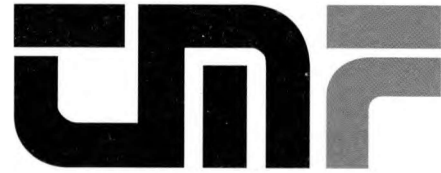


10-145774092



ДРУШТВО МЕТРОЛОГА



ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКИ
ФАКУЛТЕТ УНИВЕРЗИТЕТА У
БЕОГРАДУ

КОНГРЕС МЕТРОЛОГА 2007

ЗБОРНИК РАДОВА

Златибор, 26-28. септембар 2007. године

КОНГРЕС МЕТРОЛОГА 2007

Зборник радова, 26-28. септембар 2007. године

ЗБОРНИК РАДОВА

*Штампање Зборника саопштења и одржавање Конгреса метролога 2007
подржало је Министарство науке Републике Србије*

Издавач:

Технолошко-металуршки факултет
Универзитета у Београду
Београд, Карнегијева 4



За издавача:

Проф. др Иванка Поповић, декан

Главни и одговорни уредник:

Проф. др Шћепан Ушћумлић

Приређивачи:

Др Иванка Поповић, ред. проф.

Др Ђорђе Јанаковић, ван. проф.

Мр Бојан Јокић, исцртаживач сарадник

Мр Ђорђе Вељовић, исцртаживач сарадник

Тираж: 100 примерака

*Штампа: Развојно-истраживачки центар графичког инжењерства
Технолошко-металуршког факултета
Београд, Карнегијева 4*

ISBN 978-86-7401-248-2

1263/08

<i>М. Бановић</i> ЕТАЛОНИРАЊЕ ФРЕКВЕНЦМЕТРА	261
<i>П. Раковић</i> АНАЛИЗА МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ АУТОМАТИЗОВАНОГ ЕТАЛОНИРАЊА ТЕРМИСТОРСКИХ СЕНЗОРА СНАГЕ ДО 18 GHz	269
<i>М. Унковић</i> ДУГОТРАЈНА СТАБИЛНОСТ РЕФЕРЕНТНИХ ЕТАЛОНА КАПАЦИТЕТА У МЕТРОЛОШКОЈ ЛАБОРАТОРИЈИ МЛ 36	279
<i>М. Унковић</i> ДУГОТРАЈНА СТАБИЛНОСТ РЕФЕРЕНТНИХ ЕТАЛОНА ИНДУКТИВНОСТИ У МЕТРОЛОШКОЈ ЛАБОРАТОРИЈИ МЛ 36	289
<i>Б. Анђић, И. Пјевалица, И. Жујунски, В. Вујичић</i> УНАПРЕЂЕНА ВЕРЗИЈА СТОХАСТИЧКОГ МЕРИЛА ХАРМОНИКА	299
<i>Д. Пејић, М. Урекар, М. Црнојакић, И. Жујунски, В. Вујичић</i> ЕТАЛОНСКО БРОЈИЛО ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ	309
СЕКЦИЈА 6: НАУКА О МЕРЕЊИМА.....	317
<i>В. Елез, Б. Пајкић</i> ПОБОЉШАВАЊЕ СИСТЕМА МЕНАЏМЕНТА КВАЛИТЕТОМ У МАТИЧНОЈ ОРГАНИЗАЦИЈИ АКРЕДИТАЦИЈОМ ЛАБОРАТОРИЈЕ	319
<i>М. Срећковић, С. Осјојић, Ј. Илић, В. Арсоки, С. Пантићелић, С. Ћук, Ђ. Чанђирак, И. Ђерић</i> САВРЕМЕНИ УРЕЂАЈИ ЛДА И АНАЛИТИЧКЕ И НУМЕРИЧКЕ ОЦЕНЕ МЕРНИХ РЕЗУЛТАТА	327
СЕКЦИЈА 7: СЛЕДЉИВОСТ У МЕТРОЛОГИЈИ.....	335
<i>М. Павићевић, Ј. Лазаревић, Р. Деретић, Н. Вучијак, Ј. Пантићелић-Бабић</i> УЧЕШЋЕ ДМДМ У ЕУРОМЕТ.ЕМ К-10 КЉУЧНОМ ПОРЕЂЕЊУ ЕТАЛОН ОТПОРНИКА 100 Ω	337
<i>Ј. Марендић – Миљковић, С. Реновица</i> СЛЕДЉИВОСТ МЕРЕЊА РАЗЛИКА ВРЕМЕНСКИХ СКАЛА	345
<i>М. Младеновић</i> АНАЛИЗА МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ ОДРЕЂИВАЊА РЕЛАТИВНЕ ВЛАЖНОСТИ МЕТОДОМ ТАЧКЕ РОСЕ	357
<i>З. Шофранац, М. Павићевић</i> МОГУЋНОСТИ ЕТАЛОНИРАЊА У ОБЛАСТИ ЈЕДНОСМЕРНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ СТРУЈЕ У ЗАВОДУ ЗА МЕРЕ И ДРАГОЦЕНЕ МЕТАЛЕ	363

SAVREMENI UREĐAJI LDA I ANALITIČKE I NUMERIČKE OCENE MERNIH REZULTATA

M. Srećković¹, S. Ostojčić², J. Ilić³, V. Arsoski¹, S. Pantelić⁴,
S. Ćuk¹, Đ. Čantrak³, N. Đerić¹

Ključne reči: LDA, rasejanje, laser, polidisperznost, višeslojnost

KRATAK SADRŽAJ

Angularna raspodela za izotropne čestice različitih dimenzija i geometrijskih oblika može da se koristi kao dijagnostička metoda za opis definisanog ansambla. Integralno i dinamičko rasejanje svetlosti jednostavnijom ili složenijom obradom signala daje odgovor za jedan definisani skup parametara čestica. Rezultati razvoja algoritama, koji omogućavaju dobijanje uglovne raspodele rasejane svetlosti i za nepravilne, anizotropne i višeslojne „čestice“, uz pravilnu interpretaciju mernih rezultata rasejanja, imajući u vidu LDA, biće predstavljeni i analizirani u ovom radu. Raspodela dimenzija centara rasejanja (monopolidisperznost) usložnjava interpretaciju mernih rezultata.

Rezultati primena Lorentz-Mie-ove teorije, simulacije po različitim kriterijumima, provlačenje optimalnih krivih pogodnih za dalje numeričke i analitičke obrade, uticaj na dispozicije i odzive tačkastih fotodetektora su razmatrani u svetlu savremenih rešenja LDA sistema.

CONTEMPORARY LDA DEVICES AND ANALYTICAL AND NUMERICAL EVALUATIONS OF MEASURING RESULTS

Keywords: LDA, scattering, laser, polydispersity, multilayer

ABSTRACT

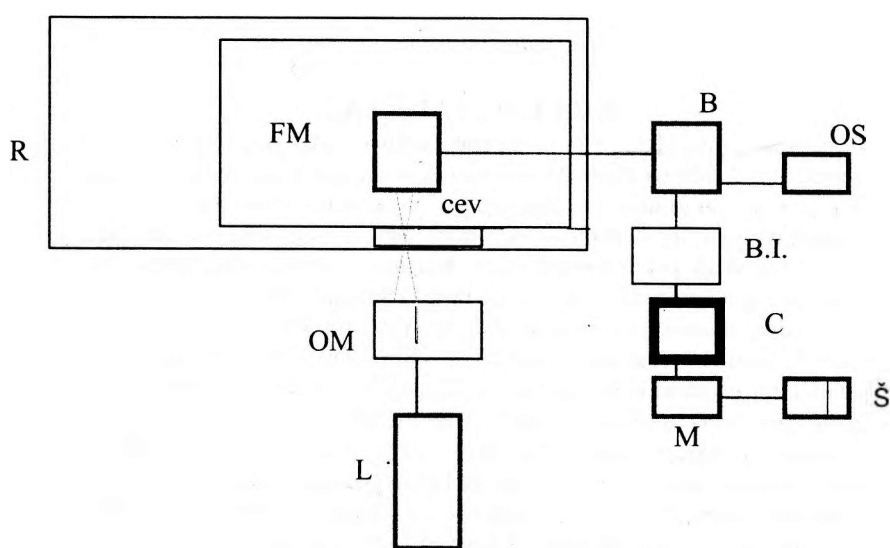
Angular distribution for isotropic particles of various sizes and geometrical shapes can be used as diagnostic method for description of defined ensemble. Integral and dynamical scatterings by simpler or more complex signal processing give answer for one defined group of particle parameters. The development of algorithm which will include irregular anisotropic and multilayer "particles" by properly interpretation of scattering measuring results including LDA will be presented and analyzed in this paper. The size distribution of scattering centers (mono and polydispersity) make the interpretation of measuring results more complex.

The results of Lorentz-Mie theory application, simulation by different criteria, fitting of optimal curves adequately for further numerical and

analytical processing, influenced to set up and response of point detectors in terms of contemporary LDA systems will be considered.

UVOD

Laser Doppler anemometrija, LDA, ima širok spektar primena zahvaljujući nizu prednosti nad ostalim metodama za merenje brzine protoka fluida.



Slika 1. Blok dijagram LDA sistema merenje brzine toka

Blok dijagram na slici 1. prikazuje LDA sistem kojim se meri brzina toka fluida u tački preseka laserskih snopova, mernoj zapremini kod diferencijalnog tipa. Na dijagramu primenjen je 5mW He-Ne laser (L), a optički modul OM formira i deli laserski snop na dva dela i usmerava ka željenoj tački. Rasejana svetlost se detektuje fotomultiplikatorom FM. Na brojaču B se vrši primarna obrada signala, a osciloskop OS i računar C vrše konačnu obradu podataka i vizuelizaciju rezultata.

LDA sistem je osnova PDA sistema za merenje veličine (prečnika) čestica koje prolaze kroz presek laserskih snopova. Koriste se dva blisko postavljena fotodetektora, čiji se signali razlikuju po fazi za iznos koji je proporcionalan prečniku sfere, koja prolazi kroz mernu zapreminu, što je detaljnije analizirano u radovima [1, 2].

Negativni efekti kod klasične PDA, u kategorijama daju grešku nazvanu „ 2π neodređenost“, ili efekta traektorije (Gaussov efekat) i efekat procepa. Predstoji detaljna interpretacija mernih nesigurnosti savremenih mernih uređaja. Neuniformne raspodele intenziteta u laserskom snopu, dovode do mešanja reflektovane svetlosti sa refrakcionim modovima. Po konceptu dvojnog PDA, nezavisno se mere dimenzije čestica koristeći konvencionalni PDA i ravanski PDA. Poklapanje rezultata zavisi od oblika čestica i u potpunosti je ostvareno samo kod sfernih čestica [3].

Nauka o fluidima je složena oblast, kojoj ovakav beskontaktni, neinvazivan metod, visoke prostorne i vremenske rezolucije, omogućava merenje brzine u strujama nepoznatog pravca. Dobijaju se lokalne merne vrednosti u nestacionarnim i turbulentnim tokovima. Preduslovi za rad su transparentnost struje i prisustvo čestica primesa ili nehomogenosti samog fluida (npr. mehurova). Nedostatak sistema je vezan za određena pitanja kontinualnosti signala, koji predstavljaju komponente brzine.

Kako je vremenom proširen krug mernih metoda, koje su zasnovane na Dopplerovom efektu, usavršeni su kvantni generatori, koji su u osnovi rada većine savremenih aparatura, razvijena je obrada optičkih signala, pa je potrebna optimizacija i proširenje primene LDA za specifične slučajeve, koji nisu bili do sada predviđeni.

Obeleživači (seeding particles) su problematika, koja se razmatra sa strane teorije i eksperimenta. Teorijski, razvoj pogodnih generatora čestica se fokusira na konstrukciju mlaznica i samog uređaja, na raspodelu izlaznih čestica i njihove osobine kao rasejavača. Zato se u radu razmatra nekoliko vrsta čestica kao posebnih centara rasejanja. Za odabrane uslove izračunavaju se specifične angularne raspodele zavisno od indeksa prelamanja čestice i okoline, dimenzija i oblika. U savremenu problematiku trebalo bi uključiti i višeslojnost rasejavača, simetričnost i anizotropnost (izotropnost).

Rad se bazira na analitičkim razmatranjima izabranih slučajeva, imajući u vidu neke praktične moguće i korišćene rasejavače, kao i rasejavače od potencijalnog interesa.

Posebno se razmatraju i raspodele izlaznih čestica od kojih zavisi i krajnja distribucija optičkih signala, koji se dalje obrađuju ugrađenim softverima specifičnim za svaku aparaturu ili sa definisanim interfejsima, koji služe za vezu komercijalnih i specifičnih primena.

Kao poseban zadatak u završnim obradama se često sreću odgovarajuće funkcionalne zavisnosti, koje se sastoje od niza diskretnih tačaka. S obzirom na to, pokušava se da se na novodefinisanim algoritmima postavi što optimalnija kriva (funkcija) u formatu pogodnom za dalje numeričke i analitičke obrade [4, 5].

Od interesa su i rezultati primene Lorentz-Mie-ove teorije [1, 6, 7] i simulacije po kriterijumu „1%“ za merenje poluprečnika rasejavajuće čestice u slučaju dvojnog mehanizma rasejanja, gde se određivanje prostorne frekvencije intenziteta rasejane svetlosti ostvaruje brzom Fourier-ovom transformacijom (FFT) niza vrednosti signala na izlazima tačkastih fotodetektora.

Na savremen razvoj mernih tehnika u kojima su sve češća rešenja sa optičkim vlaknima, izabrani problemi se pojavljuju i u ovoj oblasti, gde monomodna vlakna sa dvojnim prelamanjem mogu biti efikasno upotrebljena, kao aktivne ili pasivne komponente optičkih sistema u anemometriji [7, 10, 11], rasejanju svetlosti i drugim oblastima.

Teorija geometrijske optike [8] i dalje može biti tretirana u vezi merenja samih brzina i opisa rasejavača.

RAZMATRANJE REALNIH ANSAMBALA OBELEŽIVAČA

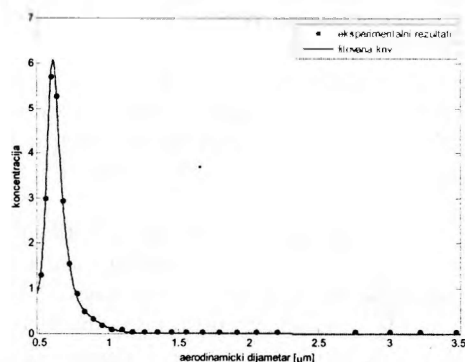
Za realne sisteme savremenih LDA razvijen je niz generatora čestica (atomizer, itd.). Neki od njih se odlikuju raspodelama datim u mnogobrojnim referencama, [14] i sl.2. Među njima su tečnosti rastvorljive i nerastvorljive u vodi i u specifičnim rastvaračima, koje se koriste i za testiranje filtera: dioktil ftalat, oleinska kiselina (otrovna je), kao i jedinjenja na bazi ulja, koja se manje koriste, pošto su dobra podloga za razvoj

mikroorganizama (ali su verovatno manje toksična). Biraju se jedinjenja, koja su niskotoksična i izlazi generatora čestica, koje imaju dimenzije, koje nisu *a priori* opasne pri inhalaciji. Od čvrstih čestica koriste se često NaCl ili šećer, monodisperzne lateks čestice (0,797 μ m), [15-19].

Čestice obeleživači treba da budu takve da verno prate tok fluida u kome se nalaze, što približno znači da čestice treba da budu što manje mase. Sa druge strane, čestice treba da budu dovoljno velike da bi intenzitet svetlosti rasejane na njima bio dovoljno veliki za formiranje prihvatljivog i informativnog signala na fotodetektoru.

Tabela 1. Parametri fitovane eksperimentalne krive u analitičkom obliku

Model: $f(x) = A1 \cdot \exp(-((x-xc1)/c1)^2) + A2 \cdot \exp(-((x-xc2)/c2)^2) + A3 \cdot \exp(-((x-xc3)/c3)^2)$	
Koeficijenti	Vrednosti
A1	3,453
xc1	0,5943
c1	0,05169
A2	2,045
xc2	0,6344
c2	0,08907
A3	0,9049
xc3	0,6033
c3	0,288

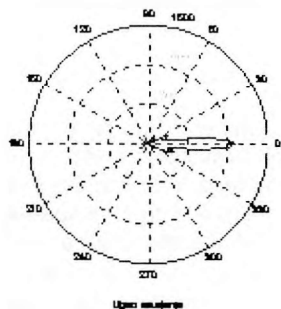


Slika 2. Eksperimentalna raspodela i fitovana kriva

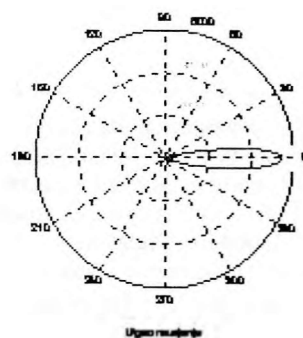
Za slučajevne DOP je izvršena analiza eksperimentalno dobijenih rezultata za aerodinamički dijametar. Primenjena je metoda sumiranja gausijana. U konkretnom slučaju slaganje bolje od 3% dobijeno je sumom 3 Gauss-ove funkcije (raspodela sa 9 parametara). Rezultati su predstavljeni grafički (sl.2.) uz odgovarajuće parametre raspodele.

RAZMATRANJE ANGULARNIH RASPODELA

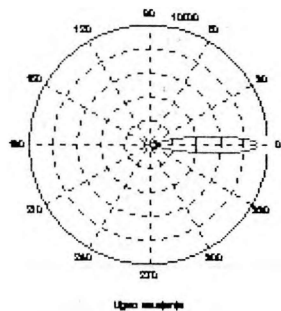
Razmotrena je uglovna raspodela prema Lorentz-Mie-ovoj teoriji uz pretpostavku sfernog oblika čestica. Izabrane su supstance, koje ulaze u sastav aerosola, [19], sa relevantnim parametrima, [14, 15]. Za dimenzije mikročestica uzete su karakteristične dimenzije generatora čestica (atomizer), [14, 18], a upadna talasna dužina lasera u uređaju je 488nm. Rezultati simulacije za kapljicu dioktil italata (DOP) prikazani su grafički na sl.3-6. Razmotreni su slučajevi kapljica DOP u smeši sa vodom za karakterističnu dimenziju 0,8 μ m, u slučaju većeg (sl.3.) i manjeg (sl.4.) udela vode u kapljici. Pošto je DOP manje gustine od vode pretpostavlja se da je voda u centru, a DOP omotač. U proračunu je uzet model za višeslojnu kapljicu [8], kao i homogenu kapljicu DOP za karakterističnu dimenziju 0,8 μ m (sl.5.). Sl.6 predstavlja slučaj višeslojne kapljice 0,5 μ m sa malim udelom vode.



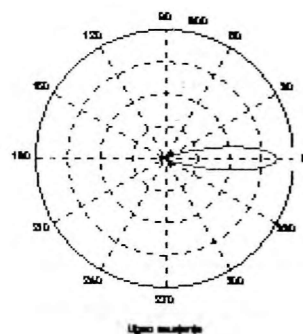
Slika 3. Kapljice DOP u prisustvu veće količine vode u kapljici $a_{tot}=0,8\mu\text{m}$, $a_{vode}=0,5\mu\text{m}$, $\lambda=488\text{nm}$.



Slika 4. Kapljice DOP u prisustvu manje količine vode u kapljici $a_{tot}=0,8\mu\text{m}$, $a_{vode}=0,267\mu\text{m}$, $\lambda=488\text{nm}$.



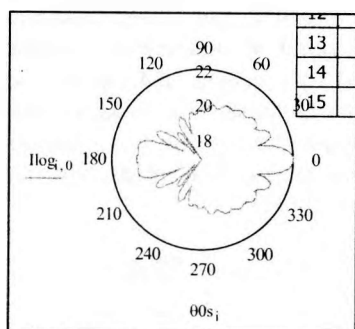
Slika 5. Homogena kapljica DOP $a_{tot}=0,8\mu\text{m}$, $\lambda=488\text{nm}$.



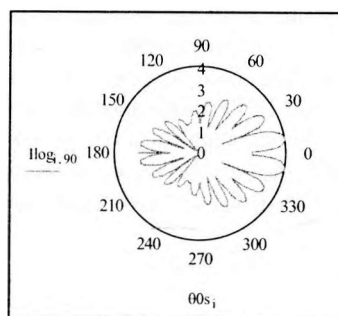
Slika 6. Kapljice DOP u prisustvu manje količine vode u kapljici, $a_{tot}=0,5\mu\text{m}$ ($a_v=0,1\mu\text{m}$), $\lambda=488\text{nm}$.

Za sve slučajeve dominantno je rasejanje unapred. Uočava se porast intenziteta rasejanje svetlosti u slučaju, kada je dimenzija čestice približno jednaka celobrojnom umnošku upadne talasne dužine.

Razmatranje angularne raspodele, za slučaj osvetljavanja čestice laserskim snopom prečnika 1mm, koja se često koristi uz LDA i zahteva strožiji prilaz u odnosu na prethodne, rađeno je za slučaj talasne dužine drugog harmonika Nd³⁺:Yag lasera za slučaj lateks čestica i čestica maslinovog ulja (sl.7-10). Na sl.7 i sl.10 su dati slučajevi angularne raspodele za lateks čestice ($n=1,6$) dimenzija 1 μ m u pravcu polarizacije upadne svetlosti i normalno na pravac polarizacije, redom.

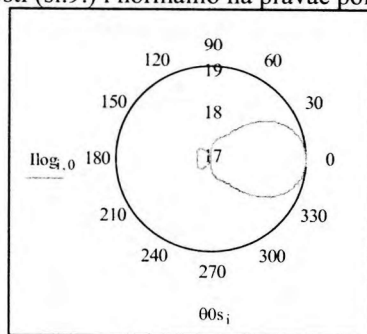


Slika 7. Uglovna raspodela logaritma intenziteta svetlosti, talasne dužine 532nm, rasejane na lateks čestici ($n=1,6$) poluprečnika 1 μ m u pravcu polarizacije upadne svetlosti.

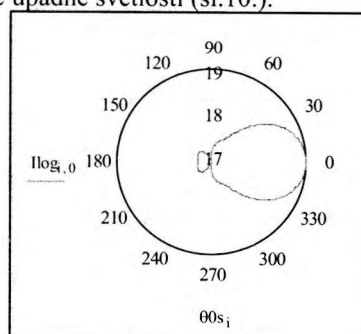


Slika 8. Uglovna raspodela logaritma intenziteta svetlosti, talasne dužine 532nm, rasejane na lateks čestici ($n=1,6$) poluprečnika 1 μ m normalno na pravac polarizacije upadne svetlosti.

Razmatranje angularne raspodele, za slučaj osvetljavanja čestice laserskim snopom prečnika 1mm, koja se često koristi uz LDA i zahteva strožiji prilaz u odnosu na prethodne, rađeno je za slučaj talasne dužine drugog harmonika Nd³⁺:Yag lasera za slučaj sfera maslinovog ulja ($n=1,47$), poluprečnika 0,3 μ m u pravcu polarizacije upadne svetlosti (sl.9.) i normalno na pravac polarizacije upadne svetlosti (sl.10.).



Slika 9. Uglovna raspodela logaritma intenziteta svetlosti, talasne dužine 532nm (drugi harmonik Nd³⁺:Yag lasera), rasejane na sferi maslinovog ulja ($n=1,47$) poluprečnika 0,3 μ m u pravcu polarizacije upadne svetlosti



Slika 10. Uglovna raspodela logaritma intenziteta svetlosti, talasne dužine 532nm (drugi harmonik Nd³⁺:Yag lasera), rasejane na sferi maslinovog ulja ($n=1,47$) poluprečnika 0,3 μ m normalno na pravac polarizacije upadne svetlosti

ZAKLJUČAK

Postoji mnogo komercijalnih LDA sistema sa makroskopskim gabaritima ili na bazi fiberoptičkih rešenja. Ocena nesigurnosti jednih i drugih je potrebno da se analizira za korektnu upotrebu i to je predmet rada u mnogim metrološkim laboratorijama. Kako se u osnovi LDA merenja sadrži dosta apsolutnih merenja, to olakšava generalne stavove. Od upotrebljenih tipova lasera sigurno da zavisi širina linije i fluktuacija, dugovremenska i kratkovremenska, te glavne talasne dužine u odnosu na koje se vrednuje merenje. Od tipa uređaja kome treba oceniti nesigurnost merenja dosta zavisi zaključak. U radu su razmatrane angularne raspodele za nekoliko izabranih potencijalnih rasejivača za koje je teoretski primenom većih ili manjih aproksimacija pokazana grupa sa jakim rasejanjem unapred ili sa prostorno »ujednačenijim« intenzitetima u prostoru $(0-2\pi)$. Vrlo je interesantan slučaj slike 8, koja svojim oblikom vrlo karakteristično može da predstavi dimenzije lateks čestica poluprečnika $1\mu\text{m}$.

LITERATURA

- [1] M. Srećković, J. Ilić, Ž. Tomić, S. Ristić, S. Arandelović, A. Kovačević, S. Ostojić, V. Mlinar, V. Arsoski, *Ocena dimenzija rasejivača laserskim tehnikama*, Zbornik radova Kongresa metrologa 539, 2005.
- [2] J. Ilić, *Doktorska teza: Specifične primene, optimizacija i proširenja primene laserske anemometrije*, ETF, Beograd, 2002.
- [3] J. Ilić, S. Ristić, S. Ostojić, S. Milić, R. Radovanović, *Dijagnostika ansambla čestica ili tkiva na osnovu efekata rasejanja*, Zbornik radova 49. konferencije ETRAN 300(3), 2005.
- [4] S. Ostojić, R. Šašić, *Particle distribution function and applications*, J. Optoelectronics Adv. Mat. 1402 (8-№4), 2006.
- [5] S. Ostojić, *Doktorska teza*, ETF, Beograd, 2000.
- [6] V. Arsoski, *Magistarska teza: Primena lasera u analizi sistema mikročestica*, ETF, Beograd, 2007.
- [7] F. Durst, A. Melling, J. H. Whithlaw, *Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry*, Academic Press, London, 1981.
- [8] a) C. F. Bohren, D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Mir, Moskva, 1986.
b) T. Keča, *Magistarska teza*, ETF, Beograd, 1998.
- [9] M. Srećković et al., *The Application of Laser Beam Diffraction and Scattering Methods in the Measurement of Shape and Determination of Material Parameters*, Lasers in Engineering 1(4), 2006.
- [10] S. Ristić, *Doktorska teza*, ETF, Beograd, 1996.
- [11] S. Ristić, J. Ilić, *Laser-Doppler anemometrijska merenja sa staklenim cevima različitog oblika, veličine i kvaliteta stakla*, NTP 49(6), Beograd, 1999.
- [12] Dakin J., Culshaw B., *Optical Fiber Sensors*, Artech House, Boston, 1988.

- [13] S. Ristić, M. Puharić, M. Srećković, M. Kutin, *Laser Doppler Anemometry in Hydrodynamic Testing*, Atti della Fondazione Ronchi, Anno LXII, 209(2), 2007.
- [14] a) *Model 9306 Six-Jet Atomizer*, Instruction Manual, TSI, St. Paul, Sept. 2000.
b) M. Srećković, J. Mirčevski, S. Ostojić, N. Bundaleski, *Evaluation of Computer Approaches for Light Scattering on the Object of Different Geometrical Forms*, Proc. of Lasers 98 546, Eds. V. J. Corcoran and T. A. Corcoran, 1999.
c) M. Srećković, N. Cvetković, S. Ristić, D. Grozdanovski, M. Grozdanovski, *The Analysis of Characteristic Materials for Fluid Seeding Particles in Wind Tunnel Testing and Their Influence on the LDA Systems Functions*, Balkan Physics Letters 93(7), 1999.
- [15] <http://www.chemicaland21.com/industrialchem/plasticizer/DOP.htm>
- [16] *Handbook of Chemistry and Physics*, Ed. R.C. Weast, CRC Press, Boca Raton, 1988.
- [17] K. R. Spourny, *Physical and Chemical Characterisation of Individual Airborne Particle*, Wiley, New York, 1986.
- [18] M. Petrović, *Magistarska teza*, ETF, Beograd, 1991.
- [19] H. C. Van der Hulst, *Light Scattering by Small Particles*, Mir, Moskva (in Russian), 1968.

1. Elektrotehnički fakultet, Kralja Aleksandra 73, POB 35 54, Beograd
2. Tehnološko-metalurški fakultet, Karnegijeva 4, Beograd
3. Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, Beograd
4. Institut za bezbednost, Kraljice Ane bb., Beograd

M. Srećković, milesa@tesla.rcub.bg.ac.yu
S. Ostojić, stankos@afrodita.rcub.bg.ac.yu
J. Ilić, jilic@mas.bg.ac.yu
V. Arsoski, arsosk@etf.bg.ac.yu
S. Pantelić, sladjanapantelic@yahoo.com
S. Čuk, senkacuk@verat.net