

PRIMENA LDA SISTEMA U KARAKTERIZACIJI AEROSOLA U BIOMEDICINSKIM Iстраživanjima

Jelena Ilić, Mašinski fakultet u Beogradu  
 Slavica Ristić, Vojno tehnički institut u Beogradu

**Sadržaj-** U današnje vreme postoji sve veći interes za istraživanjima spreja – karakterizacijom čestica i hidrodinamičke strukture sprejnih sistema. Ova istraživanja su od interesa gde god su tečni i čvrsti sprejevi deo sistema. Takvi sistemi se često sreću u farmaceutskoj i prehrambenoj industriji kao i u poljoprivredi. U ekološkom smislu su značajna istraživanja aerosola i hidrosola koji se sreću u sistemima za sagorevanje i u hemijskoj površinskoj obradi materijala. U ovom radu je razmatrano proširenje mogućnosti primene laser Dopler anemometrije (LDA), kako bi se LDA sistemi mogli koristiti u pomenutim istraživanjima, tj. kako bi se pomoću LDA sistema, osim brzine, merili i veličina i koncentracija čestica.

1. UVOD

Kapljice i druge sferne čestice su često prisutne i koriste se u raznim procesima prenosa mase i razmene toplote – kao što je slučaj kod sagorevanja (industrijski gorionici, mašine sa unutrašnjim sagorevanjem), kod sušenja sprejom, epitaksije, sinterovanja, povećanja čvrstoće kompozitnih materijala i brojnih poljoprivrednih i hemijskih procesa. U farmaceutskoj industriji se proizvode razni biomedicinski aerosoli (za tretiranje astme, sušenje rana...). Tu se generacija aerosola koristi takode i prilikom kontrole formiranja makromolekula, kod detekcije i karakterizacije velikih molekula [1], kao što su proteini, antitela i DNK oligomeri.

Eksperimentalne studije, koje se sprovode sa ciljem povećanja efikasnosti ovih procesa, zahtevaju korišćenje raznih tehnika karakterizacije sprejeva od kojih su većina optičke. Među njima prednjače, po kvalitetu i obimu podataka koje daju, dijagnostičke tehnike zasnovane na laseru. Jedna od njih je i laser Dopler anemometrija.

Radi primene LDA sistema u merenju prečnika sfernih čestica, potrebno je da detaljnije razmotriti kako veličina centara rasejanja utiče na formiranje LDA signala [2][3].

2. TEORIJSKA ANALIZA

Najčešći oblik rasejavajućih centara je sferni – kapljice, mehurovi, granule... Osim toga, najrazvijenije teorije rasejanja svetlosti su, upravo, za sferni oblik centra rasejanja. Zbog toga ćemo se ovde pozabaviti primenom LDA u prisustvu sfernih centara rasejanja.

Lokalna promena indeksa prelamanja, pri nailasku na sferu, na više načina deluje na prostiranje svetlosnog talasa. Dolazi do odbijanja, prelamanja i difrakcije svetlosti [2]. U mnogim slučajevima samo neke od ovih

pojava preovlađuju pa je dovoljno je samo njih posmatrati. Da bi se svi ovi efekti uzeli u obzir potrebno je rešavati Maksvelove jednačine za odgovarajuće granične uslove.

Ima više teorija rasejanja svetlosti na sfernim česticama (Rayleigh, Gans, Debye, Kerker, Van de Hulst). Smatra se da je od svih njih kompletnija Mie-ova teorija rasejanja [2]. Ona daje kompleksne amplitude normalne (S<sub>⊥</sub>) i paralelne (S<sub>||</sub>) komponente rasejanja preko funkcija a<sub>n</sub> i b<sub>n</sub>, koje su izražene pomoću Rikati-Beselovih funkcija, i njihove vrednosti zavise samo od veličine i materijala sfere. Kompleksne amplitude su tada date donjim izrazima, gde su π i τ Ležandrove π i τ funkcije, čije vrednosti, ovde, zavise samo od pravca rasejanja.

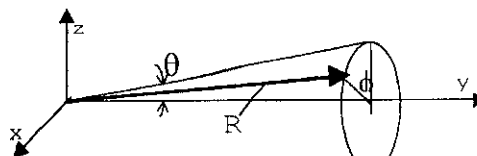
$$S_{\perp}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta))$$

$$S_{||}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n \pi_n(\cos \theta) + a_n \tau_n(\cos \theta))$$

Ukupna kompleksna amplituda rasejana je tada:

$$S(\theta, \phi) = S_{\perp} \sin \phi + S_{||} \cos \phi$$

za koordinatni sistem prikazan na slici 1.

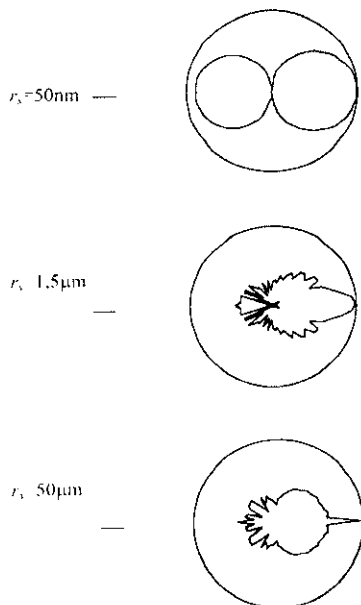


Slika 1. Opis koordinata korišćenih u izrazu za kompleksnu amplitudu rasejane svetlosti

Proračuni, čiji su rezultati ovde pokazani, odnose se na vodene sfere u snopu HeNe lasera, tj. za talasnu dužinu 632,8nm, ali jednostavnom promenom polaznih parametara isti proračuni daju rezultate i za ostale kombinacije materijala i primenjene talasne dužine.

Za slučaj veoma malih sfera, 50 nanometara, intenzitet rasejanja je simetričan i maksimalan je u pravcu upadnog talasa (0 i 180 stepeni), a minimalan u pravcu normalnom na upadni (90 stepeni). Sa porastom poluprečnika sfere dolazi do odstupanja od raspodele intenziteta od simetrije u korist rasejanja unapred, što se često naziva Mi-ovim efektom. Sa daljim povećanjem poluprečnika praktično najveći deo svetlosti se rasejava unapred. Na kraju, za sfere još većeg poluprečnika povećava se udeo odbijene

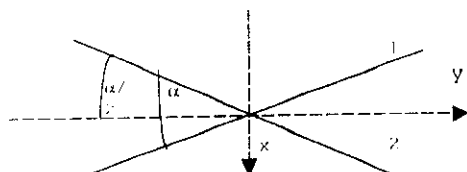
svetlosti, što se i očekuje na osnovu zakona geometrijske optike.



Slika 2. Uglovna raspodela intenziteta rasejane svetlosti na sferama navedenih prečnika

Sledeći korak predstavlja analizu interferencije rasejane svetlosti od dva različita snopa

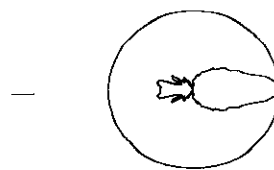
Neka se snopovi seku pod uglom  $\alpha$ , kao na slici 3., tako da svaki snop zaklapa ugao  $\alpha/2$  sa osom LDA sistema. Ovakva konfiguracija se sreće kod najčešće korišćenih LDA sistema u diferencijalnom modu.



Slika 3. Laserski snopovi 1 i 2 u korišćenom koordinatnom sistemu

Svetlost rasejana od jednog snopa se može predstaviti vektorom  $S1(\theta)E_1$ , a od drugog  $S2(\theta)E_2$ , gde su  $E_1$  i  $E_2$  svetlosni vektori svakog od ova dva snopa, a  $S_1(\theta, \phi)$  i  $S_2(\theta, \phi)$  i  $S_1(\alpha/2, \phi)$  i  $S_2(\alpha/2, \phi)$  su funkcije rasejanja dobijene na osnovu Mi-ovih rešenja, samo što su zarotirane za  $+\alpha/2$  i  $-\alpha/2$ . Rezultujućii intenzitet rasejane svetlosti je dat izrazom (1) što se može prikazati, za jednu veličinu sfere (1.6 mikrometra), slikom 4.

$$I(\theta, \phi) = (S1(\theta, \phi)E_1 + S2(\theta, \phi)E_2)(S1^*(\theta, \phi)E_1^* + S2^*(\theta, \phi)E_2^*)R(1)$$



Slika 4. Uglovna raspodela intenziteta rasejane svetlosti na sferi u preseku laserskih snopova

Tako je ako čestica miruje u preseku dva snopa. Ako se sfera kreće kroz presek snopova ova slika će postati promerljiva u vremenu. Čestica rasejava svetlost i druge frekvencije. Superpozicija rasejanja originalne i frekvencije sa Doplerovim pomakom daće frekventno modulisan intenzitet rasejane svetlosti.

Intenzite svetlosti, rasejane na čestici, koja se nalazi u preseku snopova, na nekom rastojanju R od merne zapremine je

$$I = \frac{e^2 r_c^2}{k^2 R^2} \left( |S1(\theta)|^2 E_{10}^2 + |S2(\theta)|^2 E_{20}^2 + 2|S1(\theta)||S2(\theta)|E_{10}E_{20} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)x + \psi_1 - \psi_2\right) \right)$$

gde su  $E_{10}$  i  $E_{20}$  amplitude polja jednog i drugog upadnog snopa, a  $\psi_1$  i  $\psi_2$  su argumenti S1 i S2

Ovaj izraz ima dva dela. Prvi deo, čine ga prva dva sabirka je piedestal ili niskofrekventna komponenta, koja predstavlja sumu pojedinačnih intenziteta rasejane svetlosti svakog od snopova, odnosno obujnicu ukupnog signala. Drugi deo je treći sabirak i to je "Doplerova" visokofrekventna komponenta.

Doplerov signal visokog kvaliteta, što znači da ima "duboku" frekventnu modulaciju u odnosu na amplitudu, dobija se ako je prečnik čestice približan rastojanju između susednih interferencionih pruga. Ako čestice, čiji je prečnik više puta veći od rastojanja između pruga, prolaze kroz mernu zapreminu, za razliku od predhodnog slučaja, dobija se Doplerov signal većeg intenziteta ali manje dubine modulacije.

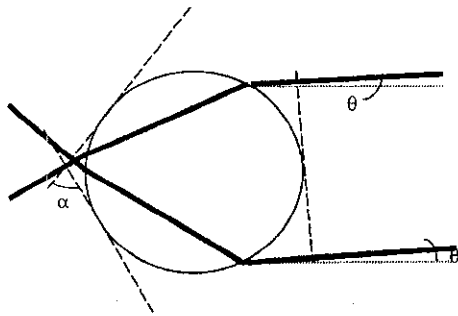
Poluprečnik centra rasejanja sfernog oblika, ako se izbegne uticaj intenziteta laserskog snopa što je poželjno, se može odrediti po sledećim osnovama [2], [4]:

a) određivanjem "vidljivosti" signala V (odnosa intenziteta visokofrekventne i niskofrekventne komponente signala signala). Pošto se radi o odnosu umanjuje se uticaj intenziteta laserskih snopova i pojačanja fotomultiplikatora, ali još uvek postoji uticaj suma u fotomultiplikatoru;

b) merenjem fazne razlike signala, koji potiču od iste čestice, ali su detektovani pod različitim uglovima  $\theta$  u odnosu na osu sistema. Tu nema uticaja ni intenzitet laserskih snopova ni sum u fotomultiplikatoru.

### 3. PRAKTIČNO REŠENJE MERENJA PREČNIKA SFERNIH RASEJAVAČA

Zbog 1. jednostavnije zavisnosti faze od poluprečnika nego vidljivosti od poluprečnika, kao i zbog 2. manjeg uticaja šuma u tom slučaju, pogodnije je određivati poluprečnik sfere na osnovu fazne razlike signala prikupljenih pod različitim uglovima. Za oblasti uglova, u kojima ne preovladuje jedna vrsta svetlosti (difraktovana, odbijena, prelomljena), zavisnost faze od ugla prihvatanja svetlosti je relativno složena. Mežutim, ako se izaberu uglovi u pravcu kojih dominira ili prelomljena ili odbijena svetlost onda je faza LDA signala linearno zavisna od ugla pod kojim se prihvata svetlost [4]. Za slučaj prelomljene svetlosti, koja dominira u oblasti malih uglova, deo faze signala, koji određen optičkom putnom razlikom prelomljene svetlosti jednog i drugog snopa, može se izračunati na osnovu slike 5.



Slika 5. Prelamanje upadnih snopova na sferi

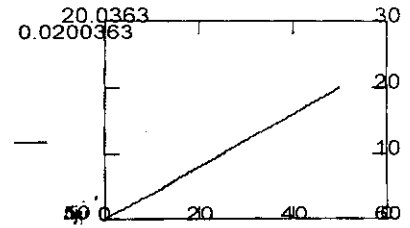
Ako se prihvata svetlost pod jednakim uglovima sa jedne i druge strane ose sistema, kao rezultat izračunavanja fazne razlike takva dva signala, dobija se izraz:

$$\Delta\psi = \frac{4n_s \sin \frac{\alpha}{2} \sin \theta}{\sqrt{2 \left( 1 + \cos \frac{\alpha}{2} \cos \theta \right) \left( n_s^2 + 1 - n_s \sqrt{2 \left( 1 + \cos \frac{\alpha}{2} \cos \theta \right)} \right)} \frac{2\pi}{\lambda} r_s$$

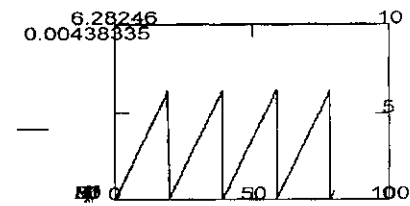
iz koga se vidi da ona linearno zavisi od poluprečnika sfere.

Ta zavisnost, za ugao od 20 stepeni, je data na dijagramu na slici 6a) (kod sva tri dijagrama slike 6 na apcisi su vrednosti poluprečnika rasejavajućih centara u  $\mu\text{m}$  a na ordinati fazna razlika signala u stepenima). Ali na analizatoru bi se očitavala, ne ukupna fazna razlika već fazna razlika po modulu  $2\pi$ , tako da, ustvari, imamo zavisnost kao na slici 6b). Znači, za svaki ugao postoji maksimalni poluprečnik, koji se može izmeriti. Za 20 stepeni to je  $20\mu\text{m}$ , za 10 stepeni, kao što se vidi sa slike 6c), je  $40\mu\text{m}$  ali je tada nagib zavisnosti manji pa je manja i osetljivost merenja. Dakle u zavisnosti od maksimalne očekivane veličine rasejavajućeg centra možemo odabrati ugao prihvatanja svetlosti. A ako nam tada nije dovoljna

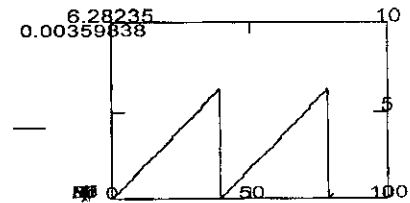
osetljivost, možemo postaviti i par fotomultiplikatora pod nekim većim uglom.



a) Fazna razlika u zavisnosti od poluprečnika sfere za 20 stepeni



b) Fazna razlika po modulu  $2\pi$  - 20 stepeni



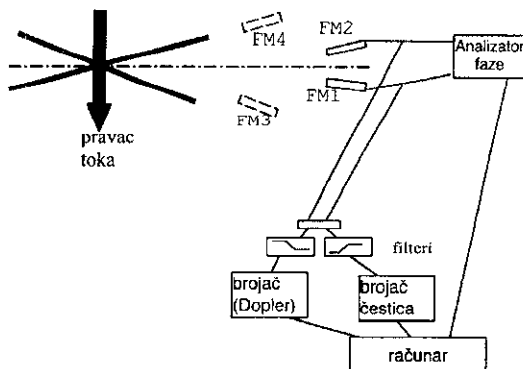
c) Fazna razlika po modulu  $2\pi$  - 10 stepeni

Slika 6. Zavisnost fazne razlike signala sa dva simetrično postavljena fotomultiplikatora

Blok šema moguće realizacije LDA sistema kojim se istovremeno meri brzina, veličina, brojna koncentracija i maseni protok, data je na slici 7. Svetlost rasejana na sfernim česticama, koje prolaze kroz mernu zapreminu (presek laserskih snopova) se prihvata na fotomultiplikatorima simetrično postavljenim u odnosu na osu sistema. Signal sa tih fotomultiplikatora treba da se vodi, sa jedne strane, na analizator faze radi utvrđivanja prečnika rasejavajućih sfernih centara, a sa druge strane na par filtera. Signal na izlazu nisko propusnog filtra će poslužiti za odbrojavanje detektovanih centara rasejanja, dok će signal na izlazu visokopropusnog filtra davati podatak o njihovoj brzini.

Dakle, izlaz ovakvog sistema može da da:

- vrednost srednje brzine  $V_{sr}$  i srednjeg kvadrata odstupanja od srednje brzine RMS čestice na osnovu Doplerove frekvencije signala;



Slika 7. Blok šema moguće realizacije LDA sistema

- raspodelu veličine (broj čestica određenog poluprečnika), na osnovu analize faza signala sa simetrično postavljenih fotomultiplikatora.

- brojna koncentracija čestica u određenoj tački prostora prema izrazu  $n = \frac{\dot{n}}{V_s S}$ , gde je  $\dot{n}$  brzina pristizanja čestica u membru zapreminu, a S površina poprečnog preseka merne zapremine normalnog na pravac toka.

- Maseni protok kroz poprečni presek merne zapremine (što je zbog malih dimenzija merne zapremine praktično maseni protok u određenoj tački prostora), prema izrazu

$\dot{m} = \frac{1}{t} \sum 4 R_i^3 \pi \rho$ , gde je  $R_i$  poluprečnik svake od detektovanih čestica, t vreme a  $\rho$  gustina materijala od koga su čestice.

#### 4. ZAKLJUČAK

Ovakva analiza dinamike čestica je od značaja u ispitivanjima atomizacije benzina ili dizela u motorima radi optimizacije performansi sistema za sagorevanje i opreme za injekciju goriva u ćelije visokog pritiska i temperature što pomaže smanjenju zagađenja izduvnim gasovima. Tehnika se takođe može koristiti prilikom usavršavanja spreja boje pri farbanju, epitaksije iz tečne faze, spreja tečnih metala u proizvodnji tankih slojeva, zatim u karakterizaciji disperznih tečnost-tečnost sistema, ispitivanje zavisnosti toka od raspodele veličine čestica u

njemu, u preciznom doziranju hemijskih reagenasa u hemijskoj i farmaceutskoj industriji. u ispitivanju mlaznika, dinamike mehurišta itd.

Zahvaljujući:

- napretku razumevanja karakteristika LDA signala zajedno sa  
- tehnološkim unapređenjima izvora koherentne svetlosti, detektora visoke osetljivosti i niskog šuma i sistema za digitalno procesiranje signala velikom brzinom očekuje se i dalje povećanje preciznosti i brzine odziva, a time i dalje proširenje mogućnosti primene laser Doppler anemometrijske metode u oblasti karakterizacije aerosola.

#### LITERATURA

- [1] 1999 TSI Incorporated, Particle Instrument Division- internet strane
- [2] Durst E., Melling A., Whithlaw J.H., *Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry*, Academic press, New York, 1976
- [3] Rinkevičius B.S., *Lazerna anemometrija*, Energija, Moskva, 1978
- [4] DANTEC - LDA 1999.

**Abstract** – Nowadays, there is a growing interest in spray research – characterization of particles and hydrodynamics structure of spray systems. These investigations are important wherever fluid or solid sprays are part of the system. Such a systems are often used in pharmaceutical and food industry, as well as in agriculture. As for ecology, research of systems of combustion and for surface chemical material processing is important. In this paper, additional possibilities of application of LDA principle is considered in order to apply laser Doppler anemometry (LDA) systems in above mentioned investigations i.e. in order to use LDA systems of measurement of not only the velocity but also the size and the concentration of particles.

#### APPLICATION OF LDA SYSTEMS IN AEROSOL CHARACTERISATION IN BIOMEDICAL INVESTIGATIONS

Jelena Ilić, Slavica Ristić, Mileša Srećković