

Analiza fizičkog procesa rasejanja laserskog zračenja s površine prirodnih meta

Mr Mirjana Nikolić, dipl.inž.¹⁾

Prikazani su osnovi analize veoma složenog fizičkog procesa rasejanja laserskog zračenja sa hrapavim površina definisanog načina obrade i površina prirodnih meta. Navedeni su postojeći refleksijski modeli za predikciju rasejanog zračenja sa hrapavim površina. Ukazano je na prednosti, nedostatke i ograničenja pobrojanih modela. Izvršena je modifikacija jednostavnog modela korišćenog u lidarske svrhe, pomoću kojeg se može izraziti ukupno rasejanje u obliku sume spekularnog i rasejanog dela zračenja, a dobijeni rezultati mogu verifikovati jednostavnim beskontaktnom optičkom mernom opremom. Ukazano je na nove trendove u problematici opisivanja rasejanog zračenja s površina različitog stepena hrapavosti, posebno s površina koje se sreću u prirodi i imaju veliki značaj u vojnoj primeni. Predložene su dalje smernice za dobijanje što vernijih teorijskih modela, ali i sprovođenja što boljih i kvalitetnijih merenja, jer se jedino verifikacijom teorijskih modela u praksi mogu očekivati pouzdani rezultati.

Ključne reči: Elektromagnetno zračenje, rasejanje, lasersko zračenje, hrapavost površine, spekularne mete, difuzne mete, prirodne mete, refleksijski modeli, funkcija bidirekionalne raspodele reflektanse, optički beskontaktni merač rasejanja, mehanički kontaktni profilometar.

Uvod

REFLEKSIJSKI modeli nalaze veliku primenu u generisanju realnih slika scene kao i za dobijanje informacije o obliku i fizičkim svojstvima materijala na osnovu ispitivanja topografije površine. Veoma se često u praksi sreću slučajevi tzv. nekooperativnih površina koje rasejavaju, odnosno površina za koje, u fazi pripreme ispitivanja, nisu obezbeđeni važni podaci o topografskim i fizičkim osobinama površine (veličina hrapavosti, zakon raspodele hrapavosti, vrednost nagiba, refleksijska moć površine (albedo), optičke konstante površine) bilo zbog nemogućnosti dobijanja tih podataka konvencionalnim tehnikama ili zbog nedostupnosti površina koje se ispituju. Stoga je važno da se u refleksijskom modelu obuhvate dva ključna faktora koji definišu refleksijske osobine površine: refleksijske osobine tačaka na površini u odnosu na njihove lokalne površinske normale i makroskopska struktura površine [1].

Pri analizi raspodele rasejanog laserskog zračenja s mete, veliku pažnju treba posvetiti: karakterizaciji rasejanog laserskog zračenja s mete; kategorizaciji samih meta (u smislu sposobnosti da reflektuju lasersko zračenje na više-ma-nje definisan i predvidiv način); mogućnosti predviđanja i definisanja dominantnih pravaca (konusa) rasejanog zračenja od površine; pravilnom merenju intenziteta zračenja koje se rasejava s površina meta i tumačenju izmerenih rezultata, kao i oceni valjanosti teorijskih modela i njihove fleksibilnosti u opisivanju fizičkog fenomena rasejanja s površina od različitih materijala, bilo da su prirodne površine ili veštački obrađene.

U eksperimentalnom delu rada tretirani su uzorci od elektrohemijski čistog bakra različitog stepena mehaničke obrade, i uzorci koji su poslužili kao predstavnici prirodnih

površina: crvena cigla, fasadna žuta cigla, betonski blok i krovni crep.

Karakterizacija površine koja rasejava zračenje

Koeficijent refleksijski, koji opisuje refleksijske osobine površine koja se ozračuje, unosi stepen neodređenosti u analizu zračenja rasejanog površinom.. Refleksijsnost površine se definiše kao deo površinske iradijance koja se reflektuje. Refleksijsnost površine zavisi od talasne dužine zračenja kao i od stanja površine (hrapavost, talasnost...). Zračenje koje se reflektuje od objekta ozračenog spoljašnjim izvorom zračenja zavisi od intenziteta izvora zračenja i refleksijski površine objekta. Usled velike raznolikosti površina koje se ozračavaju, kako u pogledu reljefa, tj. topografskih karakteristika površina, tako i u pogledu sastava površina koje se sreću u prirodnom okruženju (vegetacija, vlažnost,...), sigurno je da se sve ove raznolikosti ne mogu obuhvatiti poznatim eksperimentalnim rezultatima, pa se često mora vršiti orijentaciona procena. Hrapavost površina može da se predstavi srednjom visinom odstupanja površinskih neregularnosti u odnosu na neki srednji nivo površine, koji se obično proglašava nultim nivoom i predstavlja idealno glatku površinu, ili kvadratnim korenom srednje kvadratne vrednosti visine hrapavosti. Veza između topografskih karakteristika površine i intenziteta rasejanja ima posebnu važnost u industrijskom određivanju kvaliteta proizvoda [2-7].

Rasejanje, odnosno u specijalnim slučajevima, refleksija elektromagnetnog zračenja na graničnoj površini s materijalom (bilo da se radi o prirodnim materijalima ili materijalima koji su obrađeni na specifičan način), predstavlja složen fizički proces. Zavisno od toga ne razmatra li se ili je potrebno razmatrati stanje polarizacije (kako upadne tako i rasejane svetlosti), proračun efekata

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

rasejanja se svodi na skalarnu ili vektorsku teoriju, respektivno. Rasejanje elektromagnetnog zračenja s površina različitog stepena hrapavosti, posebno je tretirano u domenu radarske tehnike. Jedan od najboljih i najčešće korišćenih teorijskih pristupa skalarne prirode razvili su Beckmann i Spizzichino [8].

Refleksija elektromagnetnog zračenja s realnih površina (bilo da su prirodnog porekla ili obrađene na specifičan način) može da se, generalno gledano, predstavi u obliku sume spekularne i difuzne komponente. Koja će od komponentata da dominira i odnese prevagu u ukupnom 'uzorku' rasejanja, zavisi od stepena hrapavosti površine.

U analizi sprovedenoj u ovom radu, tretira se samo zračenje reflektovano (rasejano) s površine, a ne tretira se doprinos voluminoznog rasejanja iz unutrašnjosti materijala od kojeg je načinjena površina koja rasejava. Drugim rečima, sprovedena analiza se odnosi samo na netransparentne materijale.

Refleksija zračenja s glatkih površina

U slučaju površine koja se može smatrati makroskopski glatkom, odnosno kada površina ispunjava Rayleighev kriterijum [8] koji je zasnovan na jednostavnom geometrijskom prikazu zraka, elektromagnetno zračenje koje upada na površinu opisanih karakteristika, reflektuje se saglasno dobro poznatim zakonima, tako da reflektovano polje zavisi od talasne dužine, upadnog ugla i električnih osobina sredine (dielektrična konstanta, permeabilnost i provodnost). Iz Rayleighevog kriterijuma sledi da će površina težiti idealno glatkoj jedino ako ispunjava uslov da je visina neregularnosti mnogo manja od talasne dužine zračenja; ili ako se površina posmatra pod okrnim uglom (okrznim uglom predstavlja komplementarni ugao upadnom uglu) koji teži nuli.

Glatka površina dovoljno velikih dimenzija će reflektovati upadni talas spekularno, u pravcu koji je određen uglom refleksije i koji je jednak upadnom uglu. Idealno glatka površina realno ne postoji, već se smatra matematičkim modelom od izuzetne važnosti za dalje proučavanje rasejanja laserskog zračenja s površina koje se odlikuju različitim stepenom hrapavosti.

Refleksija svetlosti s glatkih površina uspešno se opisuje primenom Snellovog zakona i analizom upadanja ravanski polarizovanog talasa primenom graničnih uslova. Na taj način se dobijaju Fresnelove jednačine refleksije, koje povezuju jačine polja s obe strane granice. Iz relacija se vidi da je za opisivanje refleksije s glatkih površina potrebno poznavati stanje polarizacije upadne i reflektovane svetlosti i optičke konstante materijala [8,9].

Rasejanje zračenja s hrapavih površina

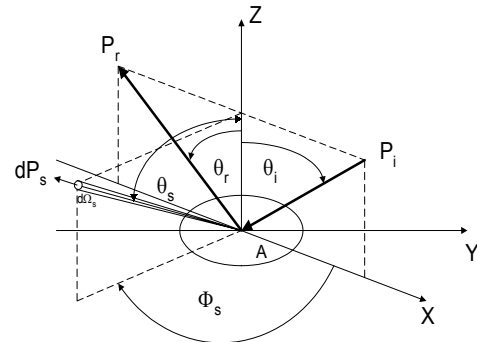
Reflektovano polje neposredno oko objekta koji se ozračava u različite svrhe, može da se opiše u obliku proizvoda upadnog elektromagnetnog talasa i neke determinisane dovoljno glatke funkcije (koeficijent refleksije). Međutim, ova pretpostavka nije uvek primenljiva. Pri difrakciji elektromagnetnog talasa javljaju se različita krivljenja reflektujuće površine do veličine koja je bliska i srazmerna talasnoj dužini upadnog zračenja. U opsegu optičkog zračenja na proces formiranja reflektovanog polja utiču razne mikroneravnine reflektujuće površine. Samo u slučaju kada je površina toliko glatka da nema takvih neravnina, može da se uvede koeficijent refleksije.

Većina realnih objekata se odlikuje površinama koje, u optičkom opsegu talasnih dužina, treba posmatrati kao

hrapave. Mikroneravnine na površini objekta se pojavljuju kao posledica tehnološke obrade. Površina svakog konkretnog objekta se odlikuje svojom slikom mikroneravnina, koja je karakteristična samo za nju.

Pomoću jednostavne geometrije rasejanja [6], prikazane na sl.1, može da se fizički predstavi proces rasejanja s površine proizvoljne hrapavosti, što će biti od važnosti za definisanje karakterističnih funkcija u procesu rasejanja. Indeksi "i" i "s" se odnose na upadnu ravan, i ravan u kojoj se posmatra rasejanje, respektivno.

U slučaju idealno glatke površine, postojaće samo spekularna refleksija (P_r), tako da će se ukupni intenzitet upadne svetlosti (P_i) reflektovati pod uglom θ_r , koliko iznosi i upadni ugao θ_i . Kako hrapavost površine raste, dominira difuzno rasejanje u celokupnoj hemisferi oko uzorka, predstavljeno diferencijalnim delom intenziteta zračenja (dP_s) rasejanog po jediničnom prostornom uglu ($d\Omega_s$), u pravcu koji je određen uglom rasejanja θ_s i azimutalnim uglom ϕ_s . Slučaj rasejanja s realne površine predstavlja kombinaciju spekularne refleksije i difuznog rasejanja, i upravo je geometrija rasejanja ovog opšteg slučaja data na sl.1.



Slika 1. Geometrija rasejanja s proizvoljno hrapave površine.

U opisivanju statističkih svojstava površine, rasprostranjen je stohastički pristup. Osnovno korišćeno ograničenje pri opisivanju hrapavosti, predstavlja aproksimacija fluktuacije hrapavosti nekim slučajnim procesom s normalnom raspodelom.

Tretiranje rasejanja s hrapavih površina predstavlja veoma složen zadatak. Površine koje rasejavaju, generalno gledano, nisu periodične niti eksplicitno opisane, već su definisane samo svojim statističkim osobinama. Generalno korišćenje statističkih metoda podrazumeva rešavanje problema srednjih vrednosti, ali i celokupne raspodele verovatnoće u odnosu na srednje vrednosti. Posebni problemi se javljaju, kada je potrebno merenja prilagoditi ovakvom slučaju. Primena difrakcione teorije na veoma hrapave površine, ostvaruje rezultate samo u domenu važenja pretpostavki glatke površine, što omogućava sprovođenje proračuna.

Za većinu hrapavih površina, koje se sreću u prirodi, može se smatrati da se raspodela hrapavosti može opisati slučajnom raspodelom i da se površina može predstaviti kao suma velikog broja Fourierovih komponenti. U domenu ispitivanja prostornih karakteristika površine, uvodi se potpuna analogija s Fourierovom analizom u vremenskom domenu, što je poznato iz teorije telekomunikacija. Situacija se znatno usložnjava pošto se ne može sa sigurnošću tvrditi s kojih je prostornih frekvencija rasejanje nastalo.

Hrapave površine, koje se sreću u prirodi, najbolje se

opisuju statističkom raspodelom visinskog odstupanja neregularnosti u odnosu na definisani srednji nivo. Međutim, na ovaj način površina nije kompletno opisana, pošto ovakav vid raspodele ne pruža informaciju o međusobnoj prostornoj raspodeli izbočina i udubina na površini. Stoga se u analizu uvode korelacione funkcije koje objašnjavaju ovaj aspekt površine.

Većina teorija, koja opisuju i objašnjavaju rasejanje s hrapavih površina, koriste jednu ili više sledećih pretpostavki [8]: dimenzije elemenata koji rasejavaju na hrapavoj površini se definišu kao mnogo manje ili mnogo veće od talasne dužine upadnog zračenja; radijus krivine elemenata koji rasejavaju je mnogo veći od talasne dužine upadnog zračenja (važenje aproksimacije tangentne ravni); zanemaruju se efekti senčenja; analizira se samo polje u dalekoj zoni rasejanja; zanemaruju se efekti višestrukog rasejanja; ne uzima se u obzir gustina neregularnosti, tj. broj rasejavača po jedinici dužine oblasti površine koja rasejava.

Beckmann i Spizzichino [8] daju rezultate analize skalarnom teorijom rasejanja za jednodimenzionalne i dvodimenzionalne površine koje se definišu kao glatke, umereno hrapave i ekstremno hrapave površine koje se odlikuju slučajnom hrapavošću s normalnom (Gaussovom) raspodelom hrapavosti, što i jeste slučaj na koji se najčešće nailazi u praksi. Skalarna teorija rasejanja zasnovana je na Kirchhoffovim relacijama. Analizira se srednja kvadratna vrednost modula koeficijenta rasejanja pošto je proporcionalna srednjoj vrednosti snage rasejanog zračenja. Koeficijent rasejanja se definiše kao odnos rasejanog polja i reflektovanog polja u pravcu spekularne refleksije s glatke, savršeno provodne ravni. Kako površina postaje hrapavija, njen reprezent postaje odnos korelacione dužine i korena srednje kvadratne vrednosti hrapavosti (standardna devijacija), što znatno utiče na uzorak rasejanja. Kod površina koje mogu da se podvrgnu laboratorijskom ispitivanju, traženje pomenutog odnosa nije problem i obično su ovakva ispitivanja karakteristična za industrijsku primenu kontrole kvaliteta proizvoda. U slučaju prirodnih meta, kada nije moguće ili nije praktično merenjem odrediti odnos korelacione dužine i standardne devijacije hrapavosti, potrebno je posedovati ogromnu "banku" podataka za poređenje, koji omogućavaju približno određivanje željenog parametra.

Za dvodimenzionalnu površinu koja se odlikuje velikom hrapavošću, spekularni član gubi svoj privilegovani položaj u 'uzorku' rasejanja u kojem sada dominira difuzno rasejanje. Na osnovu detaljne analize iz [8], za dvodimenzionalnu hrapavu površinu koja se odlikuje slučajnom hrapavošću, dobija se izraz za veličinu srednjeg kvadrata modula koeficijenta rasejanja (što je proporcionalno snazi koja se rasejava) izražen u funkciji geometrijskog faktora rasejanja, korelacione dužine, standardne devijacije hrapavosti, talasne dužine primenjene svetlosti, prostornih frekvencija.

Vektorska teorija rasejanja, zasnovana na Rayleigh-Riceovoj teoriji malih perturbacija [2,10], češće se koristi od skalarnе teorije za definisanje ugaono razloženog rasejanja, pošto se u obzir uzimaju polarizacione osobine upadne i rasejane svetlosti. Rasejanje koje je uglovno raspodeljeno, ne zavisi samo od visina površinskih neregularnosti već i od njihovih nagiba, pa se stoga mora pretpostaviti i oblik za autokorelacionu funkciju. Upravo je vektorska teorija rasejanja primenjena u slučaju rasejanja svetlosti kada je površinska hrapavost mnogo manja od talasne dužine

zračenja, da bi se na osnovu intenziteta zračenja rasejanog površinom dobila informacija o stepenu hrapavosti površine i uporedili rezultati teorijskog modela s merenim vrednostima za hrapavost dobijenim opisanom optičkom mernom metodom [6,7,11] i klasičnom kontaktnom profilometrijskom metodom. Diferencijalni deo rasejane svetlosti s hrapave površine se izražava funkcijom bidirekionalne raspodele reflektanse [12] kao proizvod veličina koje obuhvataju talasnu dužinu primenjenog optičkog zračenja, upadni ugao, uglove rasejanja, optičke konstante materijala od kojeg je načinjena površina, polarizaciju upadnog i rasejanih snopova, dvodimenzionalnu funkciju spektralne gustine snage površine u domenu prostornih frekvencija [2]. U slučaju hrapavijih površina, kada je površinska hrapavost mnogo veća od talasne dužine zračenja, tretiranje rasejanja se zasniva na korišćenju aproksimacije tangentne ravni, pri čemu se površina aproksimira nizom planarnih faseta čije su površinske normale orijentisane u pravcima kompatibilnim sa srednjim nagibom površine prekrivene fasetama. Normale fasete se statistički opisuju raspodelom nagiba [10].

Jasno je da simuliranje mogućeg rasejanja s hipotetičke površine nije ni najmanje jednostavno. U simuliranju figuriše veliki broj parametara od čijih međusobnih odnosa i pravilnog izbora veličina zavisi konačni rezultat simulacije. Treba napomenuti da, posebno u slučaju tretiranja realnih površina, u primenama opažanja i prijema rasejanog zračenja na velikim udaljenostima od površine koja rasejava, veliku teškoću predstavlja upravo karakterizacija same površine (topografija površine i sastav materijala od kojeg je površina načinjena).

Pošto je mikrostruktura površina za većinu realnih objekata slučajna, određivanje rasejanja talasa na tim površinama predstavlja tipično statistički zadatak. Reflektovano polje se formira odvojenim "sjajnim" tačkama, odnosno njihovim neposrednim okolinama. Pod određenim uslovima te tačke su slučajno raspoređene po površini, nezavisno jedna od druge, i imaju slučajne koeficijente refleksije, takode nezavisne, a i njihov ukupan broj je slučajan. Struktura mrlja je karakteristična samo kad se koriste monohromatski izvori zračenja. Ako se metod analize rasejanog polja pomoću sjajnih tačaka primeni na površinu sa slučajnom hrapavošću koja se odlikuje Gaussovom raspodelom, gustina sjajnih tačaka [13] zavisi od dužine korelacije, standardne devijacije hrapavosti i upadnog ugla. I ova metoda potvrđuje činjenicu, da je za procenu rasejanog polja potrebno poznavati odnos korelacione dužine i standardne devijacije hrapavosti.

Postoji problem i u povezivanju rezultata koje predviđa teorija i realnih izmerenih podataka, odnosno njihovoj korektnoj interpretaciji. Hrapave površine imaju tendenciju da neregularno u okviru celokupne hemisfere (gledano u odnosu na površinu koja rasejava) rasejavaju zračenje, tako da je potrebno radi definisanja refleksivnih karakteristika te površine prikupiti celokupno zračenje rasejano u okviru hemisfere.

Da bi se ostvarila korektna interpretacija izmerenih podataka koji definišu rasejanje s hrapavih površina, moraju se definisati karakteristične funkcije pomoću kojih se mogu kvalitetno interpretirati merni uslovi [12,14]. *Reflektansa* se definiše kao odnos fluksa zračenja reflektovanog s površine i fluksa zračenja koji upada na površinu. Generalno gledano, reflektansa predstavlja odnos fluksa zračenja reflektovanog s površine unutar hemisfere, i

fluksa koji upada u okviru hemisfere na površinu. *Reflektansni faktor* predstavlja odnos fluksa zračenja reflektovanog s površine i fluksa zračenja reflektovanog s površine koja može da se predstavi idealnim difuzerom (Lambertova meta) u jedinicama apsolutne reflektanse, kada se oba merenja izvrše pod istim ozračenjem i pod istim uglovima posmatranja [14].

Merenje direkcionalnog-hemisferijskog reflektansnog faktora može da se smatra osnovnim merenjem reflektanse, upravo zbog toga što obezbeđuje kalibraciju referentnih površina korišćenih za namene sensorisanja (opažanja) na daljinu i radu u laboratoriji. Merenja se rutinski izvode korišćenjem spektrometra ili spektrofotometra s dva snopa [14]. Ovi instrumenti obezbeđuju snop uzane spektralne širine, koji upada naizmenično na površinu od interesa i referentnu površinu čija je kalibracija poznata. Naizmenični signali s detektora se potom dele. Ovaj odnos pomnožen apsolutnom reflektansom referentne površine, meren korišćenjem iste geometrije ozračavanja daje željeni parametar, tj. reflektansni faktor. Za merenje je potreban sistem akvizicije sa širokim vidnim poljem. Na žalost, podaci o kalibraciji standardnih referentnih površina nisu uvek dostupni.

Često se u slučajevima hrapavih površina polazi od pretpostavki da je hrapava površina izotropna ili da se može smatrati potpuno difuznom.

Teorijski refleksioni modeli hrapavih površina

U *Torrance-Sparrowom modelu* [1] površina se modelira skupom dugih, simetričnih, spekularnih šupljina oblika latiničnog slova "V", postavljenih u svim pravcima, za čije se površinske normale pretpostavlja normalni zakon raspodele. Proračun reflektovanog zračenja se zasniva na geometrijskoj optici. Geometrijska optika se primenjuje kada su površinske neregularnosti mnogo veće od talasne dužine upadnog zračenja. U većini predloženih modela difuzna komponenta rasejanja se predstavlja kao konstantan Lambertov član. Ovaj efekat je sadržan u *Oren-Nayarovom modelu* [1] koji se zasniva na istom modelu površine kao i Torrance-Sparrow model, ali se "V" šupljine tretiraju kao difuzni reflektori. Oba modela uzimaju u obzir geometrijske efekte maskiranja i senčenja. Pretpostavljeno je da su "V" šupljine veoma duge, tako da se efekti na krajevima šupljina mogu ignorisati, dok zahtev za površinskom izotropijom iziskuje da šupljine nemaju preferisani pravac. Očigledno je da ovakve površine ne mogu da postoje usled nekonzistentnosti geometrije, što predstavlja glavni nedostatak Torrance-Sparrowog i Oren-Nayarovog modela.

Ginneken je sa saradnicima [1] predložio *statistički model*, koji se primenjuje za izotropne hrapave površine koje se odlikuju i spekularnom i difuznom komponentom u ukupnom uzorku rasejanja. Ovaj model je zasnovan na stavu da dva ključna faktora određuju osobine refleksivnosti materijala: refleksivne osobine tačaka na površini u odnosu na njihove lokalne površinske normale i makroskopska struktura površine (hrapavost). U odnosu na prvi faktor, tj. lokalne refleksivne osobine, javljaju se dva granična slučaja. Svetlost može da bude reflektovana u savršeno spekularnom pravcu ili može da se raseji difuzno, uniformno u svim pravcima hemisfere, nezavisno od upadnog pravca. Spekularna refleksija predominira na poliranim metalnim površinama, dok materijali kao npr. kreda ili papir reflektuju približno celokupnu upadnu

svetlost difuzno. Za većinu površina i spekularna i difuzna komponenta pojavljuju se istovremeno. Drugi faktor, makroskopska površinska hrapavost, opisan je lokalnim odstupanjima u odnosu na srednju površinsku normalu, i znatno utiče kako na spekularnu tako i na difuznu komponentu. U slučaju spekularne refleksije, glatka površina deluje kao ogledalo koje reflektuje celokupnu upadnu svetlost u spekularnom pravcu, dok hrapave površine reflektuju svetlost u 'lepezastom' uzorku oko spekularnog pravca. U slučaju difuzne refleksije površina s nemakroskopskom hrapavošću će izgledati jednako osvetljena iz svih pravaca, što je prvo uočio Lambert. Međutim, ovo nije slučaj kod hrapave površine; delovi hrapave površine, s normalama koje su orijentisane ka izvoru zračenja, primaju više svetlosti, tako da površina izgleda svetlija kako se pravac posmatranja približava pravcu ozračavanja.

Ginnekenov model se koristi za određivanje reflektanse makroskopski hrapavih površina koje se odlikuju i spekularnom i difuznom komponentom. Koristi se Gaussov model površine pri čemu se za raspodelu visina površinskih neregularnosti pretpostavlja normalna raspodela. Standardna devijacija visina neregularnosti i autokorelaciona funkcija određuju koren srednje kvadratne vrednosti površinskog nagiba, koji predstavlja parametar površinske hrapavosti. Model definiše izraze za radijansu u funkciji geometrije ozračavanja i uglova posmatranja, za spekularnu i za difuznu lokalnu refleksiju. U ovom modelu se tretira rasejanje s hrapave površine, tako da se uvodi lokalna normala na površinu koja se ne poklapa sa srednjom površinskom normalom, i u odnosu na koju se definišu lokalni upadni ugao i lokalni uglovi rasejanja. Olakšicu kod ovog statističkog modela predstavlja pretpostavka da je posmatrana površina izotropna. Koren srednje kvadratne vrednosti nagiba predstavlja ukazatelj hrapavosti i koristi se kao parametar u modelu, pri čemu se pod nagibom podrazumeva izvod visine u datom pravcu a ne nagib u pravcu maksimalnog porasta po visini. Pošto se modelira hrapava površina, realno je očekivati da pojedine tačke na površini neće primati svetlost (slučaj senčenja), a pojedine neće biti vidljive (slučaj maskiranja). Razlikuju se dva tipa senčenja i maskiranja: samosenčenje i samomaskiranje, što znači da je tačka postavljena daleko od zraka koji ozračava i položaja iz koga se prati rasejanje; i senčenje i maskiranje pomoću preseka, koji nastaju kada zrak koji ozračava ne može da dosegne tačku pošto je presečena površinom. Prvi tip je lokalnog a drugi tip je globalnog karaktera. Samo ozračeni i vidljivi delovi površine doprinose direktno reflektovanom fluxu, tako da je u modelu uvršćena verovatnoća da tačka nije ni osenčena ni maskirana, po oba navedena kriterijuma. Ukupna radijansa u *Ginnekenovom modelu* predstavljena je sumom spekularne i difuzne radijanse, gde se kao član normalizovane konstante u spekularnom članu sume pojavljuje i konfluentna hipergeometrijska funkcija [1,15]. Model sadrži tri parametra: koren srednje kvadratne vrednosti nagiba, parametar koji ukazuje na balans između difuzne i spekularne refleksije na površini i parametar koji je proporcionalan upadnom svetlosnom fluxu i celokupnom albedu. Eksperimentalni podaci iz [1], koji se odnose na uzorke od realnih materijala (cigla, beton, keramička pločica), ukazuju da će za većinu prirodnih materijala biti potpuno adekvatna jednostavna linearna kombinacija difuzne i spekularne komponente. Linearna kombinacija odražava tvrdnju da uzorci predstavljaju nehomogenu "mešavinu" čije pojedine oblasti na površini

delom reflektuju zračenje na spekularan način, a delom ga rasejavaju difuzno. Kompletno razdvajanje spekularne i difuzne komponente je uprošćenje stvarnog fizičkog procesa rasejanja svetlosti koja interaguje s materijalom.

Ugaona zavisnost funkcije bidirekionalne raspodele reflektanse povezana je s mikroskopskim osobinama površine. Leader izvodi analitičke izraze [16] koji povezuju funkciju bidirekionalne raspodele reflektanse s parametrima površine, odnosno s mikro i makrohrapavošću, nagibom površine, korelacionom dužinom i indeksom prelamanja materijala površine. Leaderov model površine pretpostavlja da je mikrohrapavost nadređena na makroneravnine površine. Ipak, ovakav model, iako veoma precizan, upravo zbog korišćenja glomaznog matematičkog aparata neophodnog za proračun integrala rasejanja postaje komplikovan za praktičnu primenu.

Radi dobijanja jednostavnijeg modela koji korektno opisuje ukupno rasejanje s površina, a koji iziskuje modeliranje manjeg broja relevantnih parametara, *Steinval* koristi ideje Ginnekena i Leadera i ukupno rasejanje opisuje modelom kod kojeg kritičan parametar predstavlja nagib površine. Steinvall izvodi relaciju za ukupnu funkciju bidirekionalne raspodele reflektanse u slučaju primene lidara [17]:

$$BRDF = BRDF_{spec} + BRDF_{dif} = \frac{A}{\cos^6(\theta)} \exp\left[-\frac{\tan^2(\theta)}{s^2}\right] + B \cos^m(\theta) \quad (sr^{-1}) \quad (1)$$

gde $BRDF_{spec}$ i $BRDF_{dif}$ predstavljaju spekularnu i difuznu komponentu ukupnog rasejanja, respektivno, A je konstanta spekularnosti, B je konstanta difuznosti, s je nagib površine, m predstavlja koeficijent difuzije, dok je sa θ označen upadni ugao, odnosno ugao refleksije, pošto se relacija odnosi na ozračenje površine u slučaju lidara. Faktor A/B ukazuje na odnos karakteristika sjajnih tačaka površine i difuznog ponašanja. Međutim, potrebno je naći opši oblik relacije koji će važiti za opisivanje rasejanja s realnih površina, ne samo u slučaju lidarske primene.

Detaljnim analizom relacija koje su izveli Ginneken i Leader, a koja je u ovom radu izbegnuta radi ukazivanja na konačni oblik relacije i njenog značaja, uz korišćenje Steinvallovog prikaza linearne kombinacije za $BRDF$ funkciju spekularnog i difuznog dela, dobija se relacija za ukupnu funkciju bidirekionalne raspodele reflektanse uz pretpostavku da se zračenje rasejano s površine nalazi u upadnoj ravni, u sledećem obliku:

$$BRDF = BRDF_{spec} + BRDF_{dif} = \frac{A}{\cos(\theta_s) \cos^5(\theta_i)} \exp\left[-\frac{(\tan(\theta_s) - \tan(\theta_i))^2}{s^2}\right] + B(\cos(\theta_i - \theta_s))^m \quad (sr^{-1}) \quad (2)$$

gde uglovi θ_i i θ_s odgovaraju uglovima sa sl.1. Ova modifikovana Steinvallova relacija poslužiće dalje u radu za definisanje funkcija rasejanja s različitih površina, jer je jednostavna za proračun, iziskuje mali broj parametara koji se modeliraju, i može da se primeni za fitovanje eksperimentalnih rezultata pošto su merenja zbog dizajnerske ograničenosti merne aparature obavljena samo u upadnoj ravni.

Specijalan slučaj hrapavih površina – Lambertove površine

Rezultat procesa rasejanja s realnih, hrapavih površina, može da bude veoma složen, pošto takve površine rasejavaju celokupno upadno zračenje u okviru hemisfere u frontalnom delu površine. Ipak, radi sprovođenja proračuna, uvode se mnoge aproksimacije.

Najčešća pretpostavka u slučaju velikog broja difuznih uzoraka je da se rasejana radijansa definiše kao konstanta. Ovo znači, da rasejana snaga po jediničnom prostornom uglu opada kao kosinus ugla rasejanja, a pretpostavka važi bez obzira na upadni ugao. Ako je intenzitet rasejane svetlosti proporcionalan kosinusu ugla rasejanja, bidirekionalna funkcija rasejanja svetlosti je konstantna. Uzorci koji rasejavaju upadno zračenje na navedeni način, poznati su kao Lambertove površine.

Lambert je postavio zakon na osnovu posmatranja belog zida osvetljenog sunčevim zracima, koji je pod svim uglovima posmatranja izgledao jednako osvetljen [18]. Takva površina se ponaša kao samostalni izvor, koji ne zavisi od toga pod kojim je uglom ozračen. Idealni difuzni reflektor (Lambertov difuzer) se definiše sa osobinom da ugaona raspodela reflektovanog zračenja ne zavisi od upadnog ugla.

Kao grafička predstava posmatranog učinka zračenja može da se prikaže ili gustina zračenja u funkciji ugla rasejanja (pri čemu se po Lambertu po apcisi rezultira paralela) ili se nanosi po Bouguerovom predlogu izmereni učinak zračenja kao radijus vektor u odgovarajućem pravcu koji je određen uglom rasejanja da bi se dobila polarna kriva koja se označava kao indiktrisa [18,19]. Za Lambertov izvor, ova indiktrisa predstavlja krug koji dodiruje površinu koja rasejava. Prečnik indiktrise je proporcionalan intenzitetu zračenja. Zračenje rasejano unutar jediničnog prostornog ugla je takođe uglovno izotropno, ali samo u odnosu na azimutalni ugao (ϕS), a ne i u odnosu na ugao rasejanja. Zbog toga se nekada ovakvo rasejanje kategoriše kao "cirkularna difuzna refleksija" [18]. Za difuzno rasejano zračenje se pretpostavlja da je nepolarizovano, bez obzira na stanje polarizacije upadnog zračenja [19].

Prvi pokušaj da se difuzna refleksija makroskopske površine objasni teorijski pripada Bougueru, koji je pretpostavio da difuzna refleksija potiče od regularne refleksije na elementarnim ogledalima makroskopske površine, čije su normale statistički raspodeljene pod svim mogućim uglovima. Zračenje koje prodire u površinu i koje se, pošto se nije apsorbovalo, pojavljuje na površini, uopšte ne uzima u obzir. Relevantan proračun se dalje svodi na određivanje, tj. pretpostavljanje optimalnog broja elementarnih ogledala i određivanje statističke raspodele nagibnih uglova elementarnih reflektujućih površina, u odnosu na makroskopsku površinu. Prema korišćenoj funkciji raspodele, dobijaju se različite vrednosti za regularni deo refleksije, tako da je veoma teško dati opštevažeći zakon, pošto se svaka realna površina može predstaviti modelom koji obuhvata postojanje i difuznih i elementarnih površina koje regularno reflektuju, a koje mogu da budu nagnute u odnosu na makroskopsku površinu. U praksi simuliranja rasejanja s realnih površina često se koriste različiti modeli aproksimacija za spekularni i difuzni deo zračenja rasejanog od hrapavih površina [1,16].

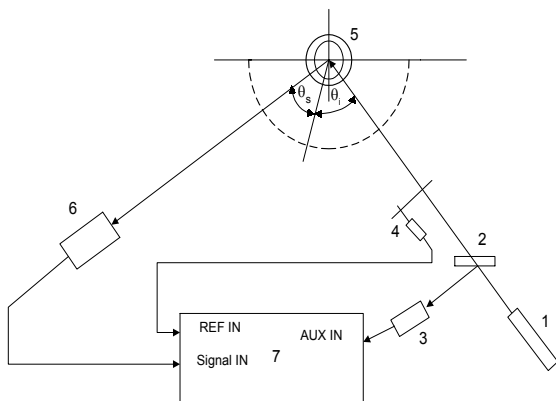
Na osnovu merenja standardnih neapsorbujućih difuzera (praškovi presovani pod velikim pritiskom, korišćeni u hemijskoj spektroskopiji) [18], za upadne uglove između 0°

i 40° i uglove rasejanja, odnosno uglove pod kojima se posmatra rasejano zračenje od 0° do 80°, Lambertov zakon se potvrđuje unutar tačnosti merenja od 2%, dok se pri velikim upadnim uglovima greška nalazi daleko van tačnosti merenja. Pri velikim i upadnim i uglovima posmatranja uočavaju se primetni maksimumi, što predstavlja veliko odstupanje od Lambertovog zakona. Ako pravac upadnog zračenja i pravac posmatranog rasejanog zračenja zaklapaju ugao od 180° a vrednost upadnog ugla je jednaka s vrednošću ugla rasejanja, javlja se jaka refleksija što ukazuje na to da postoji udeo koji čini regularna refleksija. Ovo je posebno primetno pri velikim upadnim uglovima, kada indikatrisa gubi oblik kruga i poprima oblik spljoštenog elipsoida.

Posebnu pažnju treba posvetiti talasnom opsegu korišćene svetlosti i apsorpcionim osobinama materijala u tom opsegu, kao i uticaju oblika površine na rasejanje. Odstupanje od Lambertovog zakona u oblasti selektivne apsorpcije kod materijala koji apsorbuju je znatno veće i nastaje pri manjim vrednostima ugla rasejanja nego u spektralnim oblastima, u kojima ozračeni materijal ne apsorbuje [18,19].

Poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata simulacije

Eksperiment sproveden u laboratoriji za elektrooptiku *Elektrotehničkog fakulteta* u Beogradu, imao je za cilj sticanje uvida u to koliko se realne površine mogu smatrati Lambertovim, i da li se modifikovana Steinvallova relacija može primeniti za definisanje zračenja rasejanog od korišćenih uzoraka. Kao izvor zračenja korišćen je He-Ne laser, talasne dužine zračenja 632.8 nm, i aparatura prikazana na sl.2. Aparatura, postupci i uslovi koji treba da se ispune pri merenju hrapavih površina detaljno su opisani u [11]. Ozračavanje je vršeno pod konstantnim upadnim uglom od 10° za sve vrste uzoraka, a merenje rasejanja je izvršeno samo u upadnoj ravni.



Slika 2. Blok šema uređaja za merenje ugaono razloženog rasejanja: 1- izvor laserskog zračenja: He-Ne laser, snage 1mW, koji radi u kontinualnom režimu, talasne dužine 632.8 nm; 2- delilac svetlosnog snopa (transmisija 90%); 3- detektor direktnog laserskog zračenja; 4- čoper SR540, učestanost čopovanja 1.1 kHz, faktor ispune 0.5; 5- držać s uzorkom koji se ispituje; 6- detektor zračenja koje se rasejava od uzorka, detektor se sastoji od podešljive aperture, difuzera i fotodiode (rastojanje uzorak-detektor iznosi 53.7 cm); 7- lock-in pojačavač:SR850 DSP

Radi obezbeđivanja veće tačnosti merenja, izvršena je normalizacija izmerenih vrednosti snage zračenja rasejanog od uzorka na upadnu snagu lasera.

Uzorci koji se mogu klasifikovati kao "glatki" su

izrađeni od elektrohemijski čistog bakra, a obrađeni u završnom delu metalografske pripreme uzoraka poliranjem dijamantskom pastom od 6μm (uzorak Cu#1), 3μm (uzorak Cu#2), i 1/4 μm (uzorak Cu#3). O načinu pripreme navedenih uzoraka detaljno je bilo reči u [6,11].

Uzorci, koji su poslužili kao predstavnici realnih površina (na uzorcima nije primenjen bilo kakav oblik dodatne obrade) su: uzorak #4a- crvena cigla, uzorak #4b- fasadna cigla žute boje, uzorak #4c- betonski blok, uzorak #4d- krovni crep.

Uzorci koji predstavljaju dvodimenzionalne, izotropne hrapave površine izrađeni su od elektrohemijski čistog bakra, i obrađeni mehaničkim brušenjem gornje površine silicijum karbidnim brusnim hartijama (proizvođač *Buehler LTD*) krupnoće 320, 240 i 120 za uzorak Cu#5, Cu#6 i Cu#7, respektivno. Brušenje je izvršeno ručno u dva uzajamno normalna pravca na površinu uzoraka u ukupnom trajanju od 1 minuta. Oznake na brusnim hartijama 320, 240 i 120 odgovaraju po ASTM standardu krupnoćama zrna od 35μm, 45μm i 100μm, respektivno.

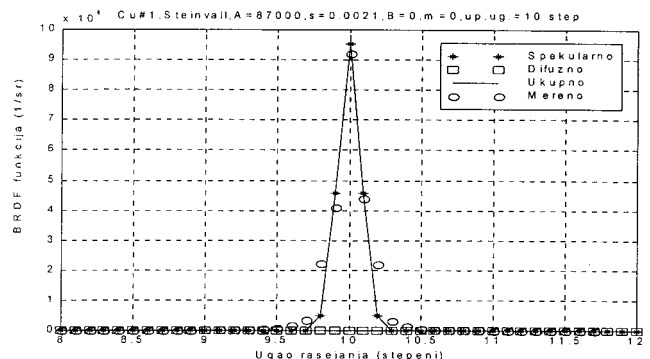
Svi uzorci su cilindričnog oblika, visine 13 mm i prečnika osnove 13 mm. Prečnik laserskog spota na uzorcima iznosi oko 2 mm.

Pomoću jednostavne merne aparature sa sl.2, koja predstavlja optički beskontaktni merač rasejanog zračenja jednostavne konstrukcije, izvršeno je merenje reprezentativnog raspodeljenog rasejanja, odnosno funkcije bidirekionalne raspodele rasejanja [12], definisane kao:

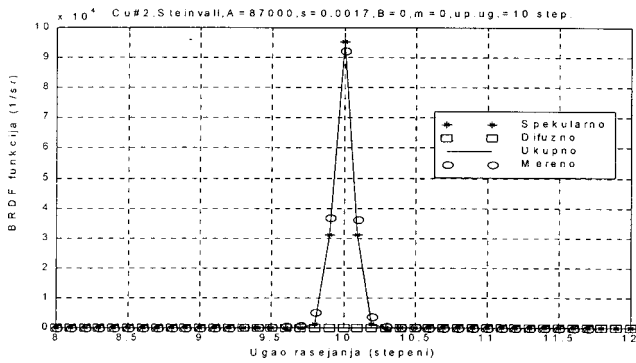
$$BRDF = \frac{P_s / \Omega_s}{P_i \cos \theta_s} \quad (sr^{-1}) \quad (3)$$

gde su: P_i - snaga upadnog zračenja, P_s - snaga zračenja koje se rasejava u oblasti prostornog ugla Ω_s , a θ_s - ugao rasejanja.

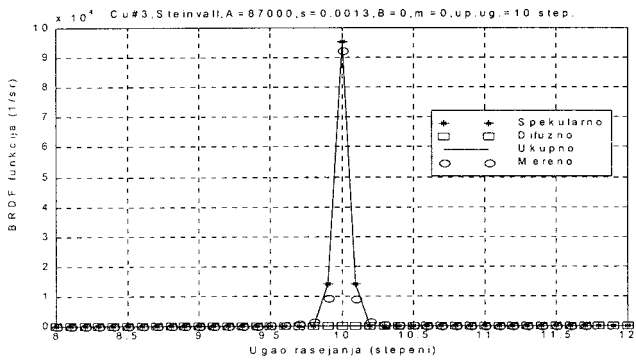
Merenja *BRDF* funkcija su izvršena s ugaonom rezolucijom od 0.1° za sve uzorke. Za glatke uzorke Cu#1, Cu#2 i Cu#3, i hrapave uzorke Cu#5, Cu#6 i Cu#7, merenja su ponovljena četiri puta i izvršeno je usrednjavanje izmerenih rezultata, dok su za uzorke #4a, #4b, #4c i #4d merenja ponovljena pet puta za svaki uzorak, takođe s usrednjavanjem rezultata.



a)



b)

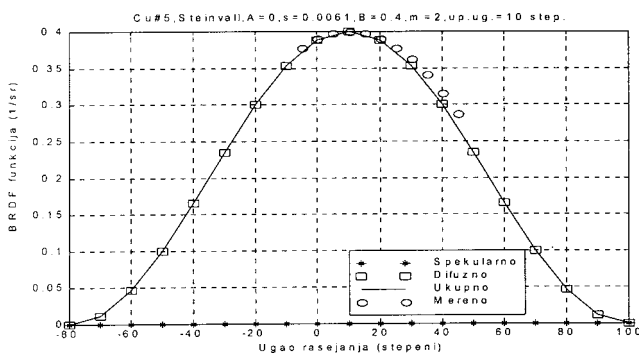


c)

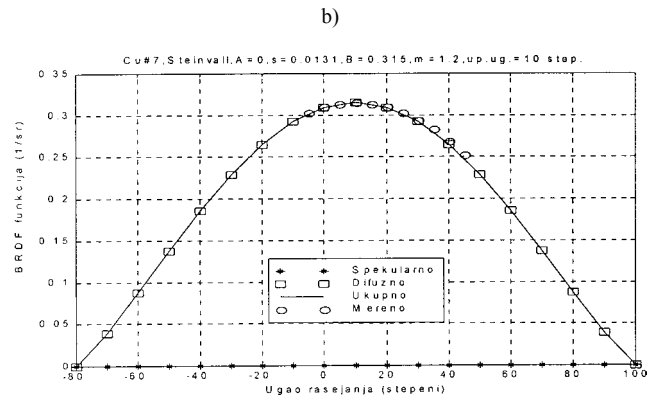
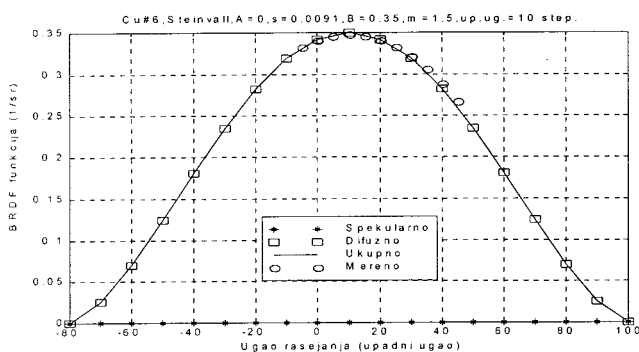
Slika 3. Izmerene vrednosti $BRDF$ funkcije i teorijska kriva za Cu#1, Cu#2 i Cu#3

Na sl.3a, 3b i 3c su prikazani rezultati merenja (označeni kružićima) i teorijska kriva za ukupnu $BRDF$ funkciju dobijena relacijom (2) (označena punom linijom) sa izborom parametara za Cu#1, Cu#2 i Cu#3, respektivno.

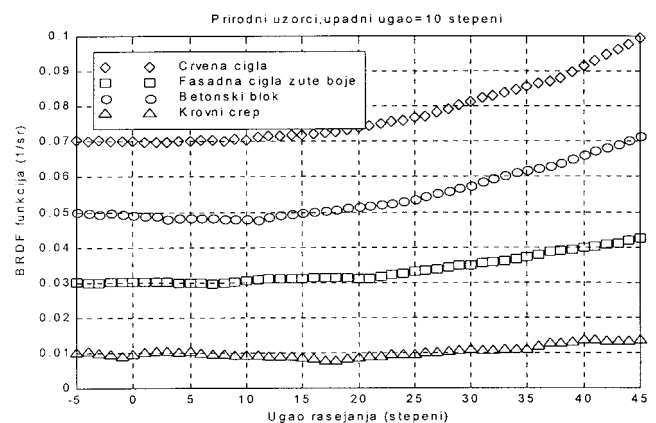
Na sl.4a, 4b i 4c su prikazani rezultati merenja (označeni kružićima) i teorijska kriva za ukupnu $BRDF$ funkciju dobijena relacijom (2) (označena punom linijom) sa izborom parametara za Cu#5, Cu#6 i Cu#7, respektivno.



a)



c)

Slika 4. Izmerene vrednosti za $BRDF$ funkciju i teorijska kriva za Cu#5, Cu#6 i Cu#7.Slika 5. Izmerena $BRDF$ funkcija uzoraka #4a, #4b, #4c i #4d.

Na sl.5 su predstavljene usrednjene vrednosti merenja za uzorke #4a, #4b, #4c i #4d, a zbog bolje i lakše preglednosti rezultati merenja su prikazani s korakom od 1° , dok su međuvrednosti aproksimirane. Za uzorak #4a merene vrednosti prikazane su rombovima, za uzorak #4b vrednosti su prikazane kvadratićima, za uzorak #4c vrednosti su prikazane kružićima, a za uzorak #4d vrednosti su prikazane pomoću trouglova.

Na sl.3a, b, i c su prikazani rezultati merenja ugaono razložene $BRDF$ funkcije, što je predstavljeno kružićima, i simulacione krive date relacijom (2), prikazane punom linijom, za uzorke Cu#1, Cu#2, i Cu#3, respektivno. Simulacione krive su dobijene podesebnim odabiranjem parametara iz relacije (2), tako da se postigne što je moguće bolje slaganje sa izmerenim vrednostima. Pošto su sva tri uzorka veoma glatka, na osnovu izmerenih vrednosti može da se zaključi da dominira spekularni deo, tako da parametri B i m mogu da se izjednače sa nulom. Za parametar A je u sva tri slučaja dobijena vrednost od 87000. Iako je u [17] navedeno da su A i B konstante, nije navedeno da to nisu bezdimenzionalne konstante, već da su izražene u sr^{-1} , tako da je korektno pisati $A = 87000 sr^{-1}$. Ova vrednost se jednostavno može povezati s inverznom vrednošću prostornog ugla pod kojim se svetlost rasejava. Pošto je za merenje korišćena kružna apertura poluprečnika 1 mm, a rastojanje uzorak-detektor iznosi 53.7 cm, prostorni ugao je oko $1.1 \cdot 10^{-5} sr$, a inverzna vrednost od A iznosi $1.15 \cdot 10^{-5} sr$. Jedan od parametara koji se odabira je i nagib površine. Da bi se proverila tačnost određivanja nagiba u simulacionoj metodi, vrednosti za nagib dobijene simulacionom metodom i stvarni izmereni nagib prikazane

su u tabeli 1. Nagib je izmeren kontaktnim profilometrom Form Talysurf (*Taylor Hobson*) [11], a merenja su izvršena u *IKL* Barajevo. Izvedeno je po tri merenja za svaki uzorak. Radijus kontaktne igle profilometra iznosi 2 μm , dok interval uzorkovanja iznosi 20 μm . Nagib se primenom kontaktne profilometrije dobija iz odnosa srednje hrapavosti (R_a) i intervala uzorkovanja.

Tabela 1. Vrednost nagiba dobijena simulacijom i merenjem

Uzorak	R_a (μm)	s mereno	s srednje	s simulacija
Cu#1	0.073	$3.65 \cdot 10^{-3}$	0.0025	0.0021
	0.037	$1.85 \cdot 10^{-3}$		
	0.039	$1.95 \cdot 10^{-3}$		
Cu#2	0.038	$1.9 \cdot 10^{-3}$	0.0015	0.0017
	0.033	$1.65 \cdot 10^{-3}$		
	0.019	$9.5 \cdot 10^{-4}$		
CU#3	0.031	$1.55 \cdot 10^{-3}$	0.0014	0.0013
	0.026	$1.3 \cdot 10^{-3}$		
	0.025	$1.25 \cdot 10^{-3}$		

I sa sl.3 i na osnovu vrednosti za nagib iz table 1, može da se zaključi da relacija (2) dobro aproksimira vrednosti dobijene stvarnim merenjem *BRDF* funkcije.

Na sl.4a, b, i c su prikazane izmerene vrednosti za *BRDF* funkciju (označene kružićima) i teorijska kriva dobijena relacijom (2) (označena punom linijom), za Cu#5, Cu#6 i Cu#7, respektivno. Na osnovu izmerenih vrednosti za ove dvodimenzionalne izotropne hrapave uzorke [11], može da se zaključi da se ne uočava jasno izražen spekularni pik, pa se za *A* može uzeti vrednost nula, tako da dominiraju samo difuzne vrednosti rasejanja. Kontaktnim profilometrom su izmereni nagibi površina, što je takođe prikazano na slikama. Odabiranjem parametara *B* i *m*, najbolje slaganje sa izmerenim vrednostima *BRDF* funkcije ostvareno je kada je $B = 0.4 \text{ sr}^{-1}$ i $m = 2$ za Cu#5, $B = 0.35 \text{ sr}^{-1}$ i $m = 1.5$ za Cu#6 i $B = 0.315 \text{ sr}^{-1}$ i $m = 1.2$ za Cu#7.

Sa sl.5 se uočava da sve četiri krive, koje reprezentuju površine koje se sreću u prirodi, pokazuju tendenciju ravnog dela u širokom opsegu uglova rasejanja. Porast *BRDF* vrednosti na većim uglovima rasejanja može da se objasni velikom promenom u Fresnelovoj reflektansi s upadnim uglom što je povezano s materijalima koji se odlikuju malom reflektansom [18]. Pri normalnom upadanju svetlosti na uzorak, ozračena površina će direktno doprinositi uzorku rasejanja, dok će u slučaju ozračavanja površine pod upadnim uglom većim od nultog, upadni zrak nailaziti na veći broj planarnih faseta različite orijentacije, tako da postoji i mogućnost dodatne refleksije između faseta na većim uglovima rasejanja. Zrak koji upada pod većim upadnim uglovima će se manje apsorbovati od zraka koji upada po normali na uzorak. Porast se, s druge strane, može objasniti time što na većim uglovima rasejanja, zbog jednostavne konstrukcije aparature (pre svega držača za uzorke) može da se detektuje neželjeno rasejana svetlost s držača uzoraka ili nekog drugog dela merne opreme. Jedino validno merenje koje se može ostvariti ovako jednostavnim, i samim tim, aparaturom ograničenih mogućnosti rada, jeste upravo merenje ugaono raspodeljenog rasejanja. Uzorci se mogu smatrati Lambertovim u dovoljno širokom opsegu uglova rasejanja od približno 30° , što se vidi sa sl. 5. Zbog ograničenosti aparature, merni opseg je sveden na opseg uglova rasejanja od -5° do 45° . U širokom opsegu uglova rasejanja od -5° do 25° za sva četiri uzorka se može proglasiti da je $m = 0$,

dok konstante *B* iznose: za crvenu ciglu $B \approx 0.07 \text{ sr}^{-1}$, za fasadnu ciglu žute boje $B \approx 0.03 \text{ sr}^{-1}$, za betonski blok $B \approx 0.05 \text{ sr}^{-1}$ i za uzorak krovnog crepa $B \approx 0.013 \text{ sr}^{-1}$, tako da se u ovom opsegu uglova uzorci mogu smatrati Lambertovim difuzerima.

Merna oprema kojom je vršeno merenje *BRDF* funkcije je jednostavna i omogućava merenje uglovno raspodeljenog zračenja samo u jednoj ravni (upadnoj ravni) i nema mogućnost detektovanja rasejanja u celokupnoj hemisferi oko uzorka, što predstavlja njen osnovni nedostatak. Rotiranje uzoraka je sprovedeno, da bi se omogućilo merenje upravno na prethodni pravac merenja. Svi korišćeni uzorci su, sasvim korektno, opravdali činjenicu da se mogu smatrati izotropnim.

Zaključak

Problem rasejanja elektromagnetnog zračenja s površina koje se odlikuju slučajnom hrapavošću ima veliki značaj u oblasti telekomunikacija i daljinskog osmatranja.

Zahvaljujući velikom značaju problema, razvijen je veliki broj različitih teorijskih pristupa kao što su npr. Kirchhoffov pristup [8], teorija malih perturbacija [10], metod rešavanja integralnih jednačina [20], koji se zasnivaju na različitim aproksimacijama i odlikuju se različitim opsezima važenja. U svim ovim metodama površina je opisana stacionarnim stohastičkim dvodimenzionalnim procesom s datom funkcijom gustine verovatnoće, za koju se, obično, pretpostavlja Gaussova raspodela i pretpostavljenom funkcijom korelacije, za koju se, obično, koristi Gaussova raspodela, eksponencijalna raspodela ili njihov kombinovani oblik. Takođe, površina mora da se okarakterise s parametrima standardne devijacije visina neregularnosti i dužinom korelacije da bi se izvršila provera korišćenog teorijskog pristupa na osnovu rezultata za intenzitet rasejanog polja, dobijenog merenjem. Rezultati proračuna za polje koje se rasejava od hrapave površine i koji su izloženi u već pomenutim referencama, slažu se s numeričkim simulacijama i laboratorijskim merenjima obavljenim na veštački obrađenim površinama po zahtevu korišćenog modela. Međutim, poređenje s realnim vrednostima nije tako uspešno. Razlog tome je prisustvo zapreminskog rasejanja koje se ne razmatra, kao i ograničenja korišćenog modela. Profilometrijsko merenje standardne devijacije visine neregularnosti površine i korelacione dužine u slučaju prirodnih meta, zavisi od dužine razmatranog profila tako da proces nije stacionaran [20]. Takođe, većina refleksionih modela podrazumeva izotropnost površina, što sigurno nije slučaj s površinama iz prirode koje se odlikuju neregularnom hrapavošću.

Poslednjih godina se razvija novi, podesniji koncept opisivanja rasejanja s prirodnih hrapavih površina, zasnovan na geometriji fraktala [21] (pri čemu je potrebno proceniti dimenzije fraktala i izvršiti rekonstrukciju površine pomoću fraktala) ili na dvodimenzionalnom procesu frakcionalnog Brownovog kretanja [20]. Efikasnost korišćenja geometrije fraktala za opisivanje rasejanja s realnih površina, ogleda se upravo u generisanju realnih sintetičkih reljefa terena.

U ovom radu je korišćena modifikacija jednostavnog modela za aproksimiranje ukupnog rasejanja (i spekularni i difuzni član) s površina različitih hrapavosti. Neosporno je da korišćeni model poseduje nedostatke, pre svega jer u obzir nisu uzeti svi aspekti interakcije zračenja s materijalom. Ipak, korišćeni model je obezbedio dobijanje

korektnih rezultata koji se dobro slažu s izmerenim vrednostima dobijenim optičkom beskontaktnom metodom. Ne treba prenebrežniti ni ograničenost merne aparature, koja se sigurno odražava na tačnost izmerenih rezultata. Ovakav jednostavan model treba da posluži samo kao korak ka daljem radu u pravcu što vernijeg modelovanja rasejanja s hrapavim površinama.

Da bi se moglo zaključiti u potpunosti kako realne površine reflektuju lasersko zračenje određene talasne dužine, potrebno je sprovesti niz opsežnih istraživanja i eksperimenata u realnim uslovima, tj. sa uzorcima realnih površina koji se sreću u praksi i uzimanja u obzir uticaja atmosfere na prostiranje zračenja. Pri izvođenju takvih eksperimenata, strogo se mora voditi računa o zaštiti ljudi koji rade sa zračenjem u infracrvenom opsegu talasnih dužina i laserskim sistemima velike snage, posebno kada se vrše eksperimenti u vojne svrhe. Izvođenje eksperimenata radi formiranja baza podataka za različite površine koje se sreću u praksi ili koje mogu da se simuliraju na osnovu izmerenih podataka, iziskuje velika finansijska sredstva. U trenutnim uslovima praktično je nemoguće doći do potrebnih podataka o površinama koje se koriste kao referentne, pa se u radiometrijske izraze uvrštavaju procenjene vrednosti za koeficijent refleksije, odnosno rasejanja s realnih površina na osnovu dostupne literature.

Neophodno je obezbediti potrebne i dovoljne uslove da se izvrše konkretna ispitivanja i u praksi provere rezultati predviđeni teorijom ili geometrijskim sagledavanjem i uproščavanjem realnih situacija. Tek na osnovu rezultata proverenih u praksi u realnim uslovima, moguće je sagledati sve aspekte ovako složenog problema i otkloniti greške koje se ne mogu predvideti bez eksperimentalne provere. Paralelno sa eksperimentalnom proverom, potrebno je usavršavati refleksione modele pomoću kojih se estimiraju osnovni parametri relevantni za objašnjenje procesa rasejanja s površinama.

Literatura

- [1] GINNEKEN,B., STAVRIDIS,M., KOENDERINK,J. Diffuse and specular reflectance from rough surfaces. *Applied Optics*, jan. 1998, vol.37, no.1, p. 30-139.
- [2] ELSON,J.M., BENNETT,J.M. Relation between the angular dependence of scattering and the statistical properties of optical surfaces. *J. Opt. Soc. Am.*, jan. 1979, vol.69, no.1, p.31-47.
- [3] STOVER,J., SERATIS,S., GILLESPIE,C. Calculation of surface statistics from light scatter. *Opt. Engineering*, 1984, vol.23, no.4, p.406-412.
- [4] CHURCH,E.L., JENKINSON,H.A., ZAVADA,J.M. Relationship between surface scattering and microtopographic features. *Opt. Engineering*, march-april 1979, vol.18, no.2, p.125-136.
- [5] KIERKEGAARD,P. Reflection properties of machined metal surfaces. *Opt. Engineering*, march 1996, vol.35, no.3, p.845-857.
- [6] NIKOLIĆ,M., ELAZAR,J. Proračun statistike površine na osnovu izmerenih podataka o rasejanju sa površinskih neregularnosti. *Naučnotehnički pregled*, 2000, vol.L, no.4-5, p.75-84.
- [7] NIKOLIĆ,M., ELAZAR,J. *Određivanje stepena hrapavosti metalne površine na osnovu merenja uglovno raspodeljenog rasejanog zračenja*. XLV konferencija ETRAN, Arandelovac, jun 2001, zbornik u štampi.
- [8] BECKMANN,P., SPIZZICHINO,A. *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*. MacMillan, New York, 1963.
- [9] HECHT,E., ZAJAC,A. *Optics*. Addison Wesley, New York, 1981.
- [10] ELSON,J.M., BENNETT,J.M. Vector scattering theory. *Opt. Engineering*, march-april 1979, vol.18, no.2, p.116-124.
- [11] NIKOLIĆ,M. *Modeliranje i merenje refleksivnosti optičkog zračenja hrapave površine*. magistarski rad, Elektrotehnički fakultet Beograd, 2000.
- [12] NICODEMUS,F.E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity. *Applied Optics*, june 1970, vol.9, no.6, p.1474-1475.
- [13] LU,R., KOENDERINK,J., KAPPERS,A. Surface roughness from highlight structure. *Applied Optics*, may 1999, vol.38, no.13, p.2886-2894.
- [14] SLATER,P. Radiometric considerations in remote sensing. *Proceedings of the IEEE*, june 1985, vol.73, no.6, p.997-1011.
- [15] MIDDLETON,D. *Introduction to statistical communications theory*. Mc Graw-Hill, New York, 1960.
- [16] LEADER,C. Analysis and prediction of laser scattering from rough-surface materials. *J. Opt. Soc. Am.*, april 1979, vol.69, no.4, p.610-628.
- [17] STEINVALL, O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections. *Applied Optics*, aug. 2000, vol.39, no.24, p.4381-4391.
- [18] KORTUM,G. *Reflexionsspektroskopie: Grundlagen, Methodik, Anwendungen*. Springer Verlag, 1969.
- [19] WENDLANDT,W., HECHT,H. *Reflectance spectroscopy*. John Wiley and Sons, New York, 1966.
- [20] FRANCESCHETTI,G., IODICE,A., MIGLIACCIO,M., RICCIO,D. Scattering from natural rough surfaces modeled by fractional Brownian motion two-dimensional processes. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, sept. 1999, vol.47, no.9, p.1405-1415.
- [21] ARAKAWA,K., KROTKOV,E. Fractal modeling of natural terrain: analysis and surface reconstruction with range data. *Graphical models and image processing*, sept. 1996, vol.58, no.5, p.413-436.

Rad primljen: 10.8.2001.god.

