
Prostiranje zračenja kroz atmosferu

Atmosfera je vazdušni omotač koji obavija Zemlju. Ona je sastavljena od smeše gasova, vodene pare i prašine. Atmosfera se prostire do 3000 km, ali se do visine od 11 km nalazi 75% ukupne vazdušne mase. Podela atmosfere na slojeve prikazana je u tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Slojevi atmosfere

Naziv atmosferskog sloja	Visina
Troposfera	do 11 km
Stratosfera	do 40 km
Mezosfera	do 80 km
Termosfera (jonosfera)	do 800 km
Egzosfera	do 3000 km

Za optiku i optoelektroniku od najvećeg značaja je troposfera, jer ona sadrži najveći broj činioca koji određuju prostiranje zračenja kroz atmosferu kao što su: apsorpcioni molekuli, čestice prašine, magla, kiša, sneg i oblaci. Atmosferski uticaji na prostiranje zračenja kroz atmosferu mogu se podeliti na tri osnovne grupe:

- slabljenje zračenja (smanjenje transmisije, $\tau < 1$),
- fluktuacije fluksa zračenja izazvane turbulencijama u atmosferi, ili rasejanjem zračenja na česticama raspoređenim u atmosferi,
- prelamanje zračenja u atmosferi koje je izazvano nehomogenom raspodelom gustine.

Osnovni procesi interakcije fluksa zračenja i atmosfere su:

- selektivna apsorpcija na gasovitim sastojcima atmosfere,
- rasejanje zračenja na česticama raspoređenim u atmosferi,
- modulacija fluksa zračenja izazvana brzim promenama nekih atmosferskih parametara (turbulencije).

Meteorološko stanje atmosfere, preko uticaja na prostiranje elektromagnetnog zračenja, otežava primenu optoelektronskih uređaja za osmatranje, nišanje, vođenje i samonavođenje projektila. Slabljenje zračenja pri prostiranju u atmosferi je osnovni mehanizam uticaja na primenu optoelektronskih uređaja i sistema. Pored slabljenja zračenja, značajnu ulogu ima i sopstveno zračenje atmosfere, posebno u primenama termovizijskih uređaja.

Prisustvo vode u atmosferi ima ključni uticaj kako na slabljenje zračenja, tako i na sopstveno zračenje atmosfere. Voda se u atmosferi nalazi u dva osnovna oblika: gasovito stanje – vodena

para, koja ima prvenstveno uticaj na apsorpciju, i tečno stanje – kapljice vode, koje imaju prvenstveno uticaj na rasejanje. Kapljice vode se ponašaju kao čestice koje doprinose rasejanju, pri čemu se može smatrati da se ponašaju kao stabilna mešavina – aerosoli (sumaglica), ili nestabilna mešavina – hidrometeori (magla, oblaci, rosa, sneg). Za proučavanje osobina atmosfere i uticaja atmosfere na optoelektronske uređaje i sisteme razvijen je veliki broj teorijskih modela i eksperimentalnih tehnika.

7.1 Apsorpcija u atmosferi

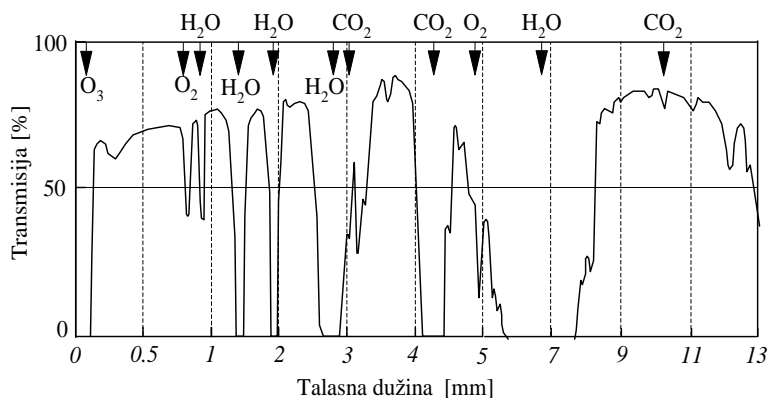
Apsorpcija je proces u kome se energija upadnog zračenja zadržava u atmosferi. Kada atmosfera apsorbira energiju, rezultat je nepovratna transformacija energije zračenja u neki drugi oblik energije. Atmosfera može da apsorbira samo deo ukupne energije zračenja. Ostatak energije zračenja će biti reflektovan (odbijen), refraktovan (prelomljen) ili rasejan.

Sastav atmosfere i uticaj gasova na apsorpciju u optičkoj oblasti elektromagnetnog spektra dat je u tabeli 7.2. Pošto su relativni odnosi gasova u atmosferi skoro konstantni do visine od 70 km, ti gasovi se nazivaju stalni sastojci atmosfere. Atmosfera sadrži i nekoliko drugih gasova koji se nazivaju promenljivi sastojci, jer njihove količine variraju sa temperaturom, visinom i položajem. Glavni činioac u promenljivim sastojcima atmosfere je vodena para.

Tabela 7.2. Sastojci suve atmosfere – Preuzeto iz [22]

Sastojak	Hemijska formula	Procenata zapremine	Apsorpcija u oblasti		
			UV, Vidljivo	Blisko IC	Srednje IC
Azot	N ₂	78.084	Ne	Ne	Ne
Kiseonik	O ₂	20.946	Ne	Da	Ne
Argon	Ar	0.934	Ne	Ne	Ne
Ugljen dioksid	CO ₂	0.032	Ne	Ne	Da
Neon	Ne	1.818 · 10 ⁻³	Ne	Ne	Ne
Helijum	He	5.24 · 10 ⁻⁴	Ne	Ne	Ne
Metan	CH ₄	2.0 · 10 ⁻⁴	Ne	Ne	Da
Kripton	Kr	1.14 · 10 ⁻⁴	Ne	Ne	Ne
Azot monoksid	NO	5.0 · 10 ⁻⁵	Ne	Ne	Da
Vodonik	H ₂	5.0 · 10 ⁻⁵	Ne	Ne	Ne
Ksenon	Xe	9.0 · 10 ⁻⁶	Ne	Ne	Ne
Vodena para	H ₂ O	promenljivo	Ne	Da	Da
Ozon	O ₃	promenljivo	Da	Ne	Da

Atmosfera, zbog velikog broja različitih gasova i čestica od kojih se sastoji, apsorbira i propušta različite talasne dužine elektromagnetnog spektra. Elektromagnetno zračenje određene talasne dužine koje prolazi kroz atmosferu bez apsorpcije naziva se atmosferski prozor. Na slici 18.1 dat je prikaz atmosferskih prozora u oblasti elektromagnetnog spektra koji je od interesa za optiku.



Slika 7.1. Prozori u atmosferi

Preuzeto iz [16]

Sa slike 7.1, vidi se da sledeći molekuli (koji su poređani po značaju) najviše apsorbuju zračenje u vidljivoj i infracrvenoj oblasti spektra: vodena para, ugljendioksid, ozon, azotmonoksid i metan.

Apsorpcija elektromagnetnog zračenja pomaže Zemlji na dva načina. Prvi način je da apsorpcija pomaže ljudima tako što onemogućava da visokoenergetsko zračenje, koje je veoma štetno, dospe do površine Zemlje. Atmosfera apsorbuje najveći deo ultravioletnih i X zraka. Drugi način na koji apsorpcija pomaže Zemlji je zagrevanje njene površine.

7.2 Rasejanje u atmosferi

Rasejanje zračenja je proces kod koga male čestice, koje se nalaze u sredini sa različitim indeksom prelamanja, difuzno rasipaju deo upadnog zračenja u svim pravcima. Kod rasejavanja, ne postoji nikakva energetska transformacija, već samo promena u spektralnoj raspodeli energije. Rasejanje zračenja na sitnim česticama u vazduhu (aerosoli) ima znatan uticaj na prostiranje zračenja kroz atmosferu. Uticaj rasejanja zračenja na česticama je često veći nego uticaj apsorpcije zračenja. Rasejanje zračenja se dešava na sitnim česticama (aerosoli) kako prirodnog porekla (sumaglica, magla), tako i veštačkog porekla (namerno razvijena dimna zavesa). Rasejanje zračenja se obično deli na tri kategorije:

- Rayleighjevo rasejanje,
- Mieovo rasejanje,
- neselektivno rasejanje.

Slabljenje zračenja usled rasejanja zavisi od radijusa čestica aerosola (r) i njihove koncentracije ($n(r)$). Pri analizi rasejanja zračenja dimenzije čestica se razmatraju preko faktora dimenzije čestica $\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda}$, gde je r - efektivni sferni radijus čestica, a λ - talasna dužina zračenja.

Slabljenje zračenja usled rasejanja je spektralno selektivno i zavisi od talasne dužine.

7.2.1 Rayleighjevo rasejanje

Rayleighjeva teorija rasejanja je primenljiva u slučaju kada je talasna dužina zračenja mnogo veća od efektivne dimenzije čestica u aerosolu ($r < 0.1 \mu\text{m}$). Zapreminski presek za rasejanje prema teoriji Rayleighjevog rasejanja se može izraziti kao

$$\sigma_r = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot N \cdot V^2}{\lambda^4} \cdot \frac{(n^2 - n_0^2)^2}{(n^2 + n_0^2)^2} \cdot \sin^2 \phi, \quad (7.1)$$

gde su:

σ_r – Rayleighjev koeficijent rasejanja,

N – broj čestica u jedinici zapremine,

V – zapremina rasejavajuće čestice,

n_0 – indeks prelamanja sredine u kojoj su čestice raspoređene,

n – indeks prelamanja rasejavajuće čestice,

ϕ – ugao pravca rasejanja.

Rayleighjevo rasejanje je, kao što se vidi iz jednačine (7.1), zavisno od talasne dužine. Što je talasna dužina manja, to je rasejanje veće. Ovo rasejanje postoji čak i u potpuno čistoj atmosferi, jer se rasejanje na molekulima atmosfere ne može izbeći. Intenzivno rasejanje na kraćim talasnim dužinama je uzrok plave boje neba i crvene boje zalazećeg sunca. Uticaj Rayleighjevog rasejanja je zanemarljivo mali na talasnim dužinama većim od mikrometra.

7.2.2 Mieovo rasejanje

Mieovo rasejanje izazivaju polen, prašina, dim, čestice vodene pare u donjim slojevima atmosfere. Ono se javlja kada su dimenzije čestica u aerosolu uporedljive sa talasnom dužinom zračenja. Mieov koeficijent efektivnog preseka za rasejanje K , definiše se kao odnos površine upadnog talasnog fronta na koga utiče rasejanje i površine poprečnog preseka čestice. Vrednost K menja se u opsegu 0 do 4, pri čemu se približava vrednosti 2 za krupne čestice.

Koeficijent Mieovog rasejanja se definiše kao

$$\sigma_m = N \cdot K \cdot \pi \cdot r^2. \quad (7.2)$$

Zbog Mieovog rasejanja oblaci izgledaju bele boje.

7.2.3 Neselektivno rasejanje

Neselektivno rasejanje je prisutno kada su dimenzije čestica mnogo veće nego talasna dužina zračenja. Rasejanje na krupnim česticama je posledica tri osnovna procesa interakcije čestica i zračenja:

- refleksija sa površine čestice (ogledalska ili difuzna),
- prolazak zračenja kroz česticu sa ili bez unutrašnje refleksije,
- difrakcija na ivicama čestica.

Obzirom na procese koji su prisutni prilikom neselektivnog rasejanja ukupni gubici zavise pre svega od oblika čestica i njihove koncentracije. Kako su aerosoli sa krupnim česticama nestabilni (proces koagulacije i taloženja), to je teško napraviti jednoznačne modele za neselektivno rasejanje na krupnim česticama, koji bi odgovarali prirodnim pojavama.

7.3 Zračenje atmosfere

Zračenje atmosfere je posledica rasejanja zračenja Sunca, ali i sopstvenog zračenja atoma, molekula i čestica koji sačinjavaju atmosferu. U analizi spektralne radijance atmosfere obično se razlikuju dve oblasti:

- oblast solarnog rasejanja ($\lambda \leq 3.0 \mu\text{m}$),
- oblast toplotnog zračenja ($\lambda \geq 3.0 \mu\text{m}$).

U oblasti solarnog rasejanja, radijansa atmosfere se može modelovati preko rasejanja i refleksije zračenja Sunca na atmosferskim aerosolima. U oblasti toplotnog zračenja, radijansa atmosfere se može modelovati korišćenjem modela sivog tela, na temperaturi koja je jednaka atmosferskoj temperaturi (300K). Emisivnost zavisi od strukture i sastava atmosferskih aerosola.

Ovako uprošćen model se mora modifikovati u oblasti solarnog rasejanja zbog apsorpcionih traka vodene pare na 0.94, 1.1, 1.4, 1.94, i 2.4 μm i ugljen dioksida na 2.7 μm . Takođe se mora voditi računa da je rasejanje proces koji jako zavisi od međusobnog položaja izvora zračenja i prijemnika.

U oblasti toplotnog zračenja nema značajnijih odstupanja od kontinualnih krivih zračenja apsolutno crnog tela, zato što se apsorpcija u oblasti apsorpcionih traka kompenzuje emisijom molekularnog zračenja. Izuzetak je oblast jake apsorpcije vodene pare na 6.3 μm , i ugljen dioksida na 15.0 μm .

7.4 Transmisija atmosfere

Transmisija atmosfere je najvažniji parametar koji utiče na karakteristike primene optoelektronskih uređaja i sistema. Na prigušenje zračenja utiču gubici usled procesa apsorpcije na molekulima i gubici usled rasejanja.

Vrednost spektralne transmisije atmosfere duž puta prostiranja zračenja za poznat sastav atmosfere, može se odrediti korišćenjem poznatih vrednosti transmisije pojedinih gasovitih sastojaka. Ukupna vrednost transmisije atmosfere dobija se množenjem usrednjenih vrednosti transmisija za pojedine spektralne opsege

$$\tau_{am} = \tau_{1\lambda} \cdot \tau_{2\lambda} \cdot \dots \cdot \tau_{N\lambda}, \quad (7.3)$$

gde su:

τ_{am} –transmisija atmosfere,

$\tau_{i\lambda}$ –transmisija za pojedine spektralne opsege.

U opštem slučaju, izračunavanje je dosta obimno zbog složenosti molekularnih spektara.

Za vrlo uske spektralne opsege (spektralne linije), u slučaju kontinualnih promena (slabe spektralne zavisnosti), primenljiv je Beer-Lambert zakon slabljenja kao korisna aproksimacija za izračunavanje transmisije atmosfere

$$\tau_{atm}(\lambda) = e^{-(\alpha_1(\lambda) + \alpha_2(\lambda) + \alpha_3(\lambda)) \cdot l}, \quad (7.4)$$

gde su:

$\alpha_1(\lambda)$ – koeficijent slabljenja usled molekularne apsorpcije,

$\alpha_2(\lambda)$ – koeficijent slabljenja na atmosferskim gasovima,

$\alpha_3(\lambda)$ – koeficijent slabljenja usled rasejanja na aerosolima,

l – dužina puta prostiranja zračenja.

Postoje mnogi modeli i računarski programi za izračunavanje transmisije atmosfere duž proizvoljnog puta, za različite temperature i pritiske u atmosferi, kao i za različite sastave aerosola. Najpoznatiji među njima je familija programa sa nazivom LOWTRAN, koji je razvijen u AFGL (Air Force Geophysics Laboratory – Geofizička laboratorija vazduhoplovnih snaga SAD). LOWTRAN izračunava transmisiju i radijansu atmosfere. Program se konstantno dorađuje i osavremenjava korišćenjem najnovijih eksperimentalnih podataka.

7.5 Meteorološka vidljivost

Meteorološka vidljivost je standardni parametar za definisanje stanja atmosfere, odnosno, za opis uticaja rasejanja na vizuelnu percepciju. Meteorološka vidljivost se definiše kao udaljenost na kojoj se ostvaruje pojavni kontrast od 2%, za veliki crni (nereflektujući i neemitujući) cilj, sa nebom u blizini horizonta kao pozadinom. Vrednost kontrasta od 2% je usvojena kao granična vrednost za osetljivost prosečnog posmatrača na kontrast. Meteorološka vidljivost R_v (izražena u km), po ovoj definiciji je povezana sa koeficijentom slabljenja za vidljivo zračenje σ_v (km^{-1}), preko jednačine

$$R_v = \frac{\ln 0.02}{\sigma_v} = \frac{3.912}{\sigma_v}. \quad (7.5)$$

Transmisija vidljivog zračenja za zadato rastojanje l , može se izračunati koristeći meteorološku vidljivost R_v , preko sledeće jednačine

$$\tau_v = e^{-(\sigma_v \cdot l)} = e^{-\frac{3.912 \cdot l}{R_v}}. \quad (7.6)$$

Transmisija srednjetalasnog infracrvenog zračenja za zadato rastojanje l računa se koristeći sledeću aproksimativnu formulu

$$\tau_s = e^{-\frac{2.24 \cdot l}{R_s}}. \quad (7.7)$$

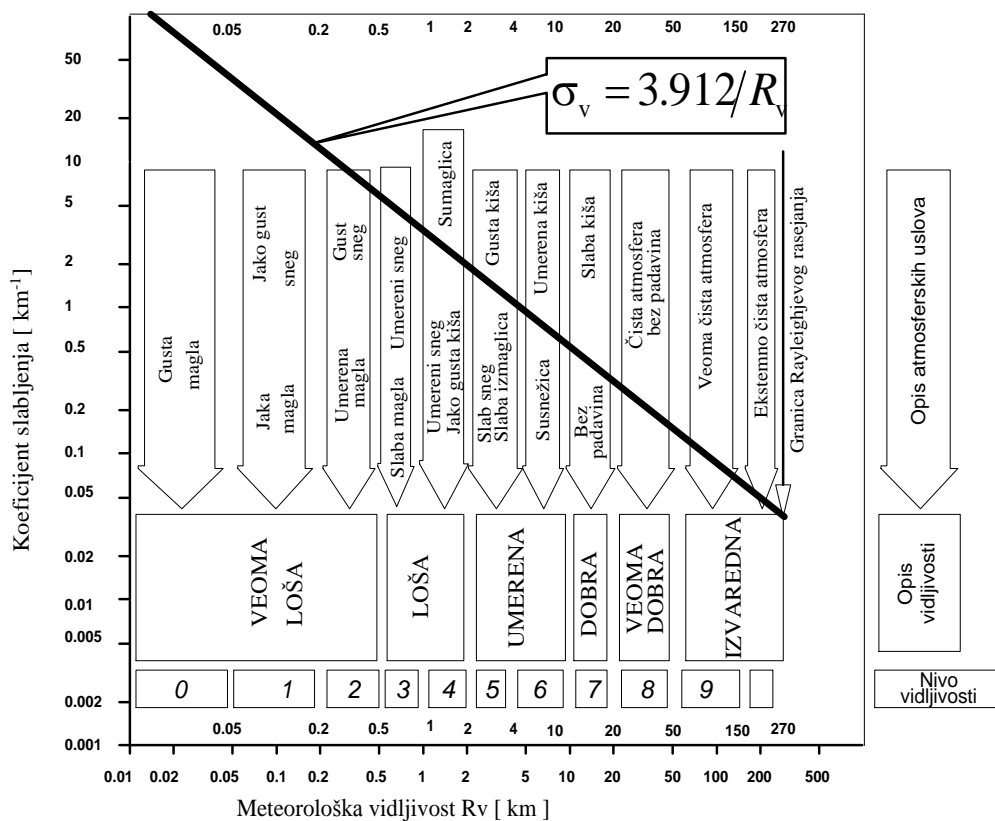
Transmisija dugotalasnog infracrvenog zračenja za zadato rastojanje l računa se koristeći sledeću aproksimativnu formulu

$$\tau_s = e^{-\frac{0.85}{R_v} \cdot l}$$

(7.8)

Izračunatu vrednost transmisije u srednjetalasnom i dugotalasnom infracrvenom području potrebno je korigovati množenjem sa faktorom za apsorpciju u vodenoj pari i ugljendioksidu.

Veza meteorološke vidljivosti sa meteorološkim stanjem u atmosferi je slikovito prikazana na slici 7.2.



Slika 7.2. Meteorološka vidljivost za različite meteorološke uslove
Preuzeto iz [22]