

Privid

↓↓↓

ALEŠ MOHORIČ

→ Fotografija na naslovnici kaže pojav privida nad morskim zalivom, daleč na obzorju. Privid lahko opazimo tudi na cesti. Slika 1 kaže avtocesto na dan, ko ni bilo padavin in so bila tla suha. In vendar je cesta v daljavi videti mokra, kot da bi stale na njej luže, v katerih se zrcalita rdeč in moder avto. Ko se pripeljemo do tja, luž seveda ni. Kako nastane ta pojav?

Svetloba se lomi, ko prehaja med snovema z različnima lomnima količnikoma ali pa skozi snov, ki se ji lomni količnik spreminja zaradi okoliščin. Običajno zrak obravnavamo kot snov z lomnim količnikom 1; v večini primerov to popolnoma zadošča. Pravzaprav pa je lomni količnik zraka za malenkost večji od 1 in odvisen od temperature, tlaka, vlažnosti ter drugih manj pomembnih lastnosti. Opiše ga Ciddorjeva enačba [1]; na spletu najdemo nekaj strani, ki nam omogočajo izračun količnika pri različnih pogojih [2]. V prispevku o oddaljenosti obzorja je opisan primer ukrivljanja žarka navzdol, ker svetloba potuje skozi plasti ozračja z različno gostoto, ki je predvsem posledica padanja tlaka z višino. V primeru privida je pomembno spreminjanje lomnega količnika zaradi temperature. Če nas zanima zgolj odvisnost od temperature, tlak pa poznamo, lahko

Ciddorjevo enačbo približno nadomestimo z enačbo

$$\blacksquare n = 1 + a_1 \frac{p}{T},$$

ki velja za svetlobo z valovno dolžino 633 nm, 50-odstotno relativno vlažnost in $a_1 = 7,86 \cdot 10^{-7} \frac{\text{K}}{\text{Pa}}$. Vidimo, da se lomni količnik zraka manjša proti 1, ko temperatura narašča.

Privid je posledica ukrivljanja žarkov svetlobe v zraku, v katerem sta temperatura in s tem lomni količnik odvisna od višine. Temnejši asfalt se zaradi sončne svetlobe segreje bolj kot ozračje in ob njem nastane plast toplejšega zraka; hladno morje ali jezero pa lahko plast ozračja nad gladino ohladi. V prvem primeru lomni količnik z višino narašča, v drugem pa pada; zato se v prvem primeru žarki ukrivljajo navzgor, v drugem pa navzdol, kakor kaže slika 2. Če je oko opazovalca O na pravem mestu, ga dosežeta snopa žarkov od osvetljenega telesa iz dveh smeri. Opazovalec vidi predmet neposredno in tudi sliko predmeta, ki se nahaja pod ali nad predmetom, kot da bi se predmet zrcalil na zračni plasti.

Opis privida s pravim potekom žarkov je preveč zapleten, da bi se ga lotili tukaj, lahko si pa zamislimo preprost model, ki nam bo dal podobne rezultate. Pojav privida bomo obravnavali v približku, da je plast vročega zraka nad asfaltom tanka in ravna, meja med toplim in hladnim zrakom pa ostra. Slika 3



SLIKA 1.

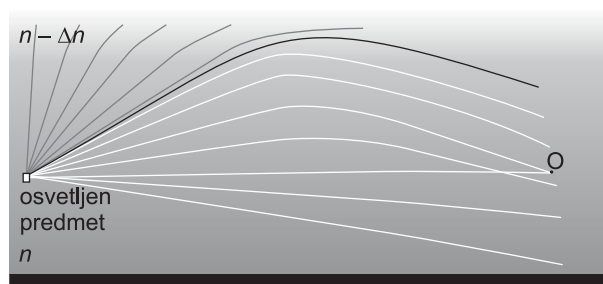
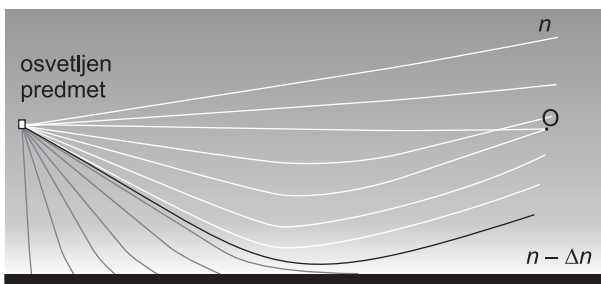


zgoraj kaže nekaj žarkov svetlobe, ki od osvetljenega točkastega telesa potujejo v različne smeri. Žarki, označeni sivo, potujejo proti tlom v taki smeri, da je njihov vpadni kot (kot med žarkom in vpadno pravokotnico) na mejo med vročo in hladno plastjo dovolj majhen, da se zlomijo v toplejšo plast in končajo svojo pot v temnem asfaltu, kjer se absorbirajo in se ne odbijejo. Beli žarki vpadajo na mejno plast pod tako velikim vpadnim kotom, da se od mejne plasti popolnoma odbijejo - podobno, kot bi se od zrcala. Črni žarek med enimi in drugimi kaže mejni primer, torej najbolj strm žarek, za katerega se odboj zgodi. Opazovalec v točki O opazi snop žarkov le neposredno iz telesa, opazovalec O' pa opazi dva snopa, enega od predmeta in drugega od odboja, ki ga pripiše sliki predmeta. Do opazovalca O je na sliki 3 zgoraj sicer narisano še črtkan žarek, ki bi nastal, če bi bilo namesto mejne plasti zares zrcalo, ki bi odbilo prav vse žarke.

Oglejmo si še, kako opazovalec O vidi sliko podolgovatega, pokončnega predmeta (slika 3 spodaj). Opazovalec vidi predmet neposredno in ti žarki zaradi preglednosti niso vrisani. Ali vidi sliko točke predmeta, pa je odvisno od tega, kje se nahaja točka na predmetu. Žarki iz točke predmeta, ki se nahajajo nad točko A, bi dosegli opazovalca, če bi bilo na meji med plastema zrcalo (siv in črtkan žarek). Vendar na meji ne pride do odboja (oziroma je ta tako šibek, da

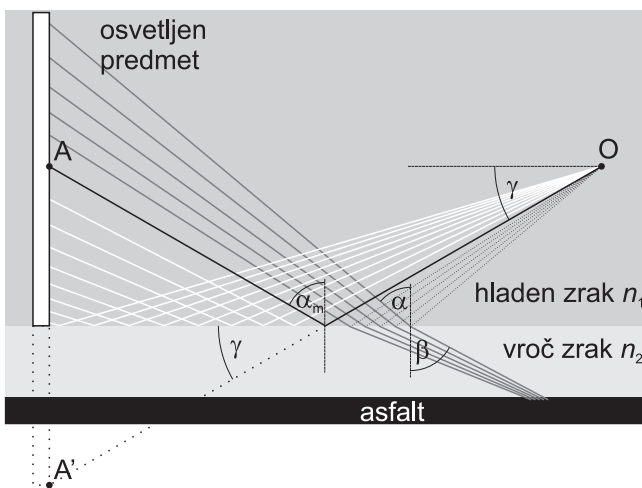
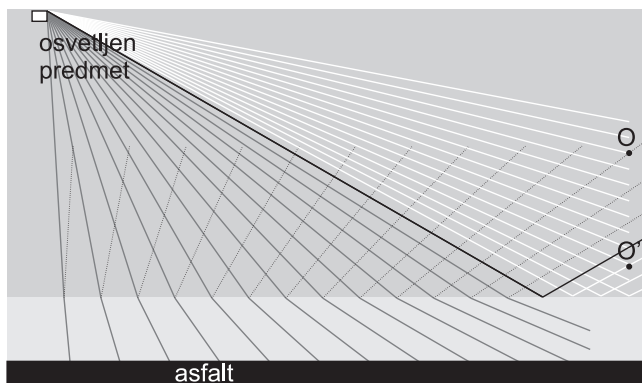
ga ne zaznamo) ampak do loma, tako da se svetloba absorbira v asfaltu. Žarek iz točke na predmetu pod točko A je narisano z belo; tak žarek se na meji popolnoma odbije. Pogoji za popolni odboj svetlobe je, da vpadni kot žarka presega mejni kot, ki je podan z enačbo $\sin \alpha_m = n_2/n_1$. Z n_2 smo označili lomni količnik v toplejši plasti zraka, z n_1 pa lomni količnik hladnejšega ozračja. Razlika lomnih količnikov je zelo majhna, zato je kot α_m skoraj enak $\pi/2$. Zapišimo $n_2 = n_1 - \Delta n$ in upoštevajmo približni izraz za majhne kote $\sin \alpha_m = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_m\right) = \cos \gamma \approx 1 - \frac{\gamma^2}{2}$. Torej velja $\Delta n = \frac{\gamma^2}{2}$, če za n_1 vzamemo kar 1. γ je zorni kot, pod katerim vidimo daljico AA' (višina zrcalne slike in dela telesa, ki to sliko ustvarja). Tu privzamemo, da je točka O na isti višini kot točka A. Vsi ti približki veljajo; slika 3 kaže razmere pretirano, pravo predstavo bi dobili, če bi jo v vodoravni smeri raztegnili za kakih petdesetkrat.

Ocenimo razliko lomnih količnikov za naš primer. Slika 1 kaže izsek fotografije, narejene s teleobjektivom z goriščno razdaljo 157 mm. Višina slike na fotoaparatu je 24 mm, slika pa ima v navpični smeri 3264 slikovnih elementov. V povečavi na sliki 4 lahko preštejemo 94 slikovnih elementov, ki ustrezajo sliki daljice AA' na tipalu fotoaparata. Torej je slika daljice AA' na tipalu kamere dolga $s = \frac{94}{3264} 24 \text{ mm} = 0,69 \text{ mm}$.



SLIKA 2.

Levo zgoraj. Svetlobni žarki se ukrivljajo navzgor, ko vstopajo v bolj vročo plast zraka pri tleh, saj se lomni količnik manjša. Desno zgoraj. Svetlobni žarki se v plasti, kjer temperatura narašča z višino, ukrivljajo navzdol. Opazovalec O vidi dva snopa žarkov, enega neposredno od osvetljenega telesa, drugega pa od ukrivljanja svetlobe, v primeru levo od spodaj, v desnem pa od zgoraj. Obe zgornji sliki sta raztegnjeni v navpični smeri zaradi preglednosti. Žarki, ki pri tem pojavu v resnici nastopajo, so vsi skoraj vodoravni (spodaj).

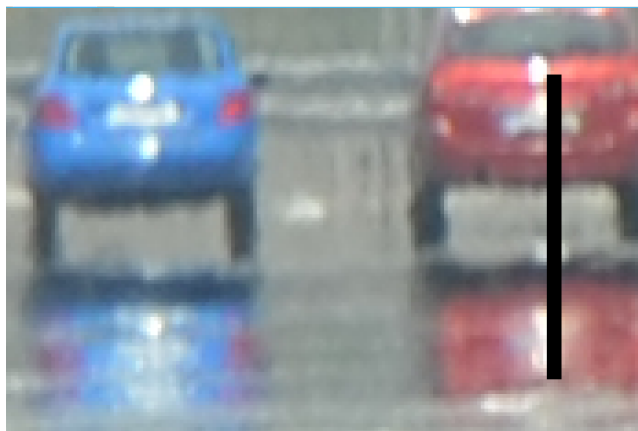


SLIKA 3.

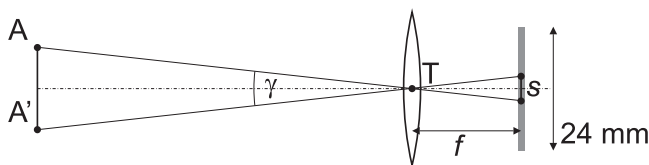
Slika 5 nam pomaga razumeti, kako iz znane velikosti slike na tipalu kamere določimo zorni kot: $\gamma \approx \frac{s}{f}$. Uporabili smo ločno definicijo kota in daljico s , ki ustreza velikosti slike na tipalu kamere, nadomestili z lokom krožnice s središčem v točki T s polmerom f , ki ustreza kotu γ .

Z našimi podatki je $\gamma = \frac{94 \cdot 24 \text{ mm}}{3264 \cdot 157 \text{ mm}} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$. Od tu dobimo razliko lomnih količnikov $\Delta n = 8 \cdot 10^{-6}$. Torej je razlika zgolj nekaj milijonink! Na hitro lahko ocenimo tudi oddaljenost avtomobila. Ocenimo dolžino AA' na 1,5 m in iz ločne definicije kota sledi $\frac{1,5 \text{ m}}{0,0044} = 340 \text{ m}$.

Če upoštevamo Ciddorjevo enačbo, je v okolici $T_0 = 20 \text{ °C}$ lomni količnik približno premo sorazmeren s temperaturo $n \approx 1 + k(T - T_0)$ s koeficientom



SLIKA 4.



SLIKA 5.

$k = \frac{\Delta n}{\Delta T} = -9 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Za izračunano razliko lomnih količnikov sledi, da je temperatura v ozračju za 9 °C nižja kot temperatura v plasti.

V razmerah, ko je hladnejša plast zraka spodaj, pride do zrcaljenja na ravnini nad predmetom in zrcalno sliko vidimo nad predmetom. Tako lahko vidimo tudi telesa za obzorjem. Lom svetlobe v plasteh atmosfere morajo upoštevati tudi geodeti, kadar s teodoliti ocenjujejo višine oddaljenih hribov (t. i. zemeljska refrakcija), in astronomi, ko določajo smeri zvezd (t. i. astronomska refrakcija).

Literatura

- [1] P. E. Ciddor, *Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared*, Appl. Opt. 35 (1996), 1566-1573.
- [2] emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Ciddor.asp, ogled 20. 5. 2020.

× × ×