

## .Opadanje osvjetljenja kod širokokutnih objektivna

(»Der Lichtabfall bei Weitwinkelobjektiven«)

Referat držan na internacionalnom fotogrametrijskom kongresu u Washingtonu 1952.

Problem opadanja osvjetljenja kod širokokutnih objektivna od sredine prema rubovima snimka često se spominje u fotogrametrijskoj literaturi, pri čem ipak u pravilu susrećemo krive poglede i nejasnosti. Najčešće se u bilo kojem obliku uzima ili geometrijskim sredstvima nastoji dokazati, da kod objektivna sa malenom distorzijom osvjetljenje opada sa cosinusom četvrte potencije upadnog kuta (o. p.: prema optičkoj osi) koso upadajućeg snopa zraka, ne obazirući se na umjetne vignjetacije\* koje pridolaze uslijed rubova leća.

Ova hipoteza, koja se često označava kao »prirodno opadanje osvjetljenja« treba predstavljati granicu, koja se obzirom na fizikalne zakone ne može prekoračiti. Ta hipoteza o opadanju osvjetljenja sa cosinusom četvrte potencije dovela je do niza posljedica, koje su u mnogom pogledu kočile uspješan razvoj fotogrametrijske širokokutne optike u zadnjim decenijama.

Umjesto da se razvijaju novi objektivni bez distorzije sa povoljnijom raspodjelom osvjetljenja, pokušalo se prvo, da se opadanje osvjetljenja poznatih tipova objektivna kompenzira ili barem ublaži pomoću izjednačavajućih filtera, koji bi se stavili pred ili iza objektivna. Pri tom treba sredina biti toliko zadržavana, da bi eksponaža fotoemulzije izgledala jednolično pocrnjena. Kako aeroemulzije normalne gradacije mogu izjednačivati razlike u osvjetljenju od cca 40%, moraju ovi filteri kompenzirati, doduše samo dio opadanja osvjetljenja, no nedostatak tog načina ostaje ipak očigledan.

Ako se samo polovica središnjeg osvjetljenja mora zadržavati, bit će efektivna blenda već za čitavi stupanj uža nego stvarno primijenjena nominalna blenda.

Drugo se vjerovalo da se slikovni kut širokokutnih objektivna malene distorzije za aerosnimanje mora ograničiti na cca 100°, jer bi inače osvjetljenje u uglovima bilo navodno nedovoljno.

Treće hipoteza »prirodnog opadanja osvjetljenja« sa cosinusom četvrte potencije zavela je kod razvoja širokokutnih objektivna sa većim slikovnim kutem (o. p. vidnim poljem) od 100° do zaključka, da se bolje osvjetljavanje može postići samo kod objektivna sa jakim negativnom distorzijom. Bez obzira na maleno značenje ovakovih objektivna za kartografsku praksu, vodi razvoj na ovakvom temelju u čorsokak, jer on počiva na krivim pretpostavkama.

Ako se u pitanju opadanja osvjetljenja ne damo voditi teoretskom literaturom već odaberemo eksperimentalni put za određivanje neke zakonitosti, to ćemo ubrzo uvidjeti da su uobičajena naziranja o »prirodnom opadanju osvjetljenja« vrlo manjkava.

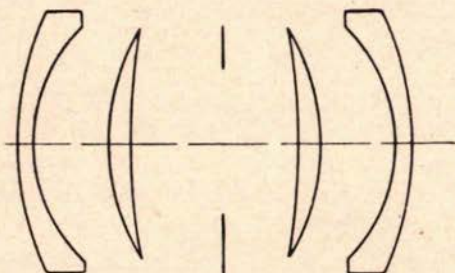
Stanovite opravdane sumnje u cosinusni zakon izrazio je uostalom u zadnje vrijeme i E. Wandersleb, a da nije ipak pri tom problem u cijelosti razjasnio.

\* Pod vignjetacijom smatramo nepoželjnu pojavu, kod koje dio svjetlosnih zraka koje bi blenda još propustila biva zadržavan kojim drugim dijelom na aparatu.

On uzima ponajprije — promatrajući posve geometrijski — da zakon  $\cos^4\alpha$  vrijedi za objektiv bez distorzije, ali ipak primjećuje da mnogi objektivni kod malih blenda, kod kojih je isključena vignjetacija, propuštaju kod malenih upadnih kuteva nešto više svjetla nego u smjeru same osi, i tek kod većih upadnih kuteva nastupa opadanje. Da bi uzeo u obzir ova, kod njegovih primjera svakako malena odstupanja, uvodi on dodatni korekcionni član, koji već prema građi objektivna poprma vrijednosti koje pod stanovitim uvjetima mogu biti i veće od 1. Korekcionni član naziva on »faktor vignjetacije«.

Sa tim rješenjem za nuždu uzima Wandersleb doduše u obzir stanovite zapažene anomalije povezujući ih sa vignjetacijom, razjašnjenje ostaje međutim nepotpuno. Dio pojava obuhvaćenih njegovim korekcionnim članom nema u stvari sa pojmom vignjetacije ništa posla, već je samo funkcija sljeda leća, jer pravi faktor vignjetacije mora biti uvijek manji od 1 ili najviše 1. Osim toga nije u njegovoj raspravi pokazano, da kod konstrukcije objektivna možemo svjesno poduzeti mjere, da bi se u čitavom slikovnom polju u povoljnom smislu oslobodili četvrte cosinusove potencije, a da ne moramo pri tom uvesti negativne deformacije.

Tome se je tim više čuditi, što se na temelju sasvim jednostavnih eksperimenata i zaključivanja može doći do rezultata, da cosinusni zakon egzaktno vrijedi samo za blendu, koja se nalazi pred objektivom u prostoru objekta, nipošto međutim za blendu unutar objektivna. Činjenica jest da se u tom slučaju pretpostavljena četvrta cosinusova potencija mora još pomnožiti sa funkcijom koja ovisi o građi objektivna. Ova funkcija može biti određena eksperimentalno ili računski.



Sl. 1. Steinheilov objektiv prema engleskom patentu 21211 iz god 1901.

Mora se čovjek čuditi da teoretska optika, izuzevši nekoliko kratkih opaski u ruskoj literaturi, nije dosada dala zaista zadovoljavajuće objašnjenje za opadanje osvjtljenja, niti konkretne mogućnosti za ublaživanje tog opadanja, iako je već 50 godina poznat nacrt objektivna od Steinheila (sl. 1), kod kojeg je opadanje osvjtljenja kod malene deformacije znatno povoljnije nego što bi to odgovaralo cosinusnom zakonu.

Iako najjednostavnije eksperimentalno određivanje može biti izvršeno na isti način kao i mjerenje vignjetacije, ne bi bilo ispravno da se spomenuta funkcija nazove »funkcija vignjetacije«. Vignjetacija u uobičajenom smislu je samo jedna komponenta te funkcije, druga ovisi o načinu na koji snop zraka oslobođen vignjetacije prodre kroz prednju polovicu objektivna. Dok faktor vignjetacije, koji se mjenja sa upadnim kutem može biti samo manji ili najviše

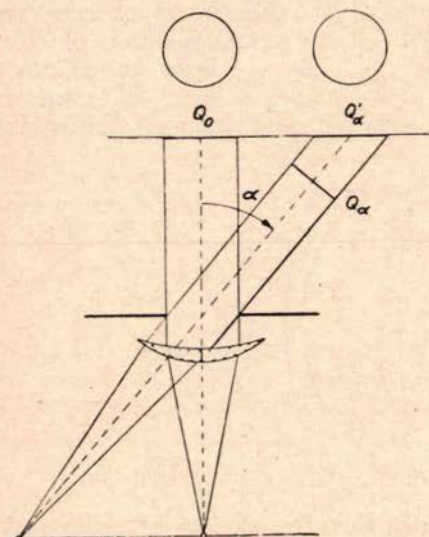
jednak 1, popriva drugi faktor, koji je ovisan o građi objektivna, u povoljnom slučaju i vrijednosti koje mogu biti znatno veće od jedan.

Bitna je s tim u vezi svakako činjenica, da je moguće poduzeti mjere pomoću kojih taj drugi faktor i kod objektivna oslobođenog distorzije postaje za čitavo slikovno polje veći od 1.

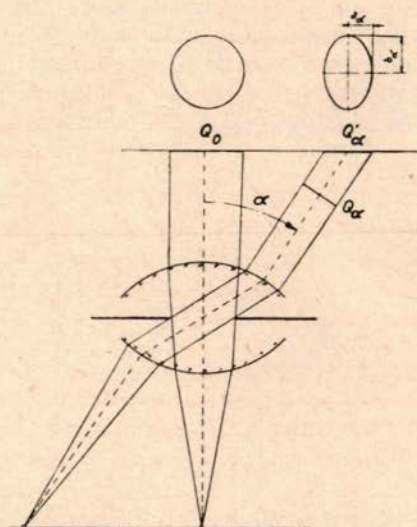
Eksperimentalno određivanje funkcije opadanja osvjetljenja je poznato. Slika svjetlećih točaka, koje se nalaze u ravnini preslikavanja, uhvati se na jednu ravninu pred objektivom okomitu na os. Već prema konstrukciji objektivna, vrijednosti blende i upadnom kutu  $\alpha$  dobivamo slikovne pločice površine  $Q'\alpha$ . Odnos  $Q'\alpha$  naprama  $Q_0$  u sredini slike za  $\alpha = 0$  kazuje, da li je opadanje osvjetljenja bolje, jednako ili lošije nego što odgovara cosinusovom zakonu, već prema tome da li je  $Q'\alpha/Q_0$  veće, jednako ili manje od 1. Procentualno opadanje osvjetljenja od sredine slike izračunava se iz

$$e = \frac{100 Q'\alpha}{Q_0} \cos^4 \alpha$$

Sl. 2 prikazuje uređaj za predblendu, kod koje su uhvaćene pločice uvijek krugovi jednakog radiusa. Uređaj za unutarnju blendu prikazan je na sl. 3.



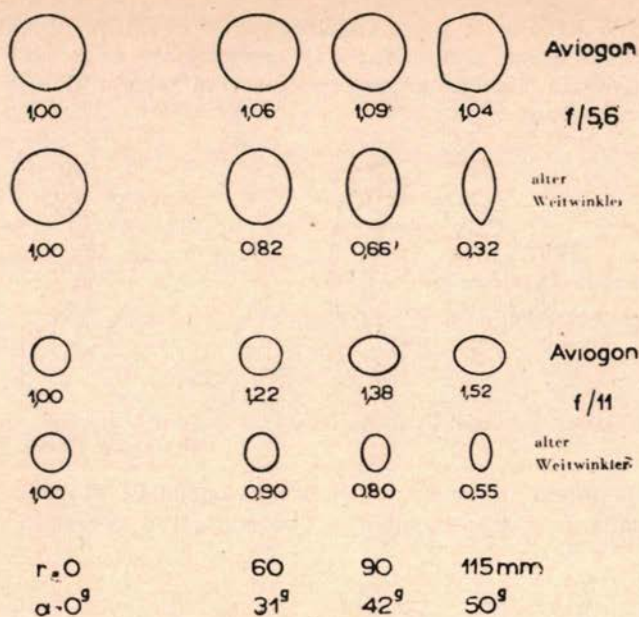
Sl. 2. Određivanje opadanja osvjetljenja kod objektivna sa predblendom. Kad nema vignjetacije slikovne su pločice jednako veliki krugovi.



Sl. 3. Određivanje opadanja osvjetljenja kod objektivna sa unutarnjom blendom. Veličina slikovne pločice ovisna je o konstrukciji objektivna.

Praktički primjer objektivna sa unutarnjom blendom prikazan je na sl. 4. Novi širokokutni objektiv Aviogon (sl. 5) od L. Bertele-a ima bitno povoljnije opadanje osvjetljenja, dok je opadanje osvjetljenja kod starijeg tipa širokokutnog objektivna nepovoljnije nego  $\cos^4 \alpha$ .

I računsko određivanje  $Q'\alpha/Q_0$  kod širina snopova oslobođenih od vignjetacije dovodi do istog rezultata.



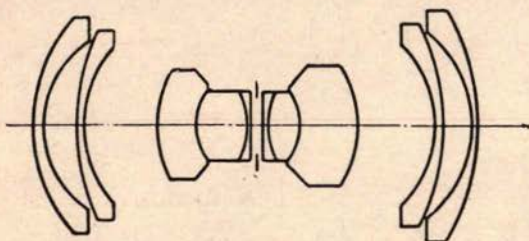
Sl. 4. »Aviogon« ima gotovo tri puta manje opadanje osvjjetljenja nego prijašnji širokokutni objektiv (primjer za  $f = 115$  mm).

Za numeričko tretiranje i zadovoljavajuće prosuđivanje opadanja osvjjetljenja najčešće je dovoljno promatrati širine snopova u meridionalnom presjeku (o. p.: presjek kroz optičku os). Ako prema sl. 3 označimo poluosi eliptičnih slikovnih pločica koje dobivamo kod blenda oslobođenih vignjetacije, sa  $a$  i  $b$ , to će odnosi  $a_a/a_o$  imati gotovo iste vrijednosti kao  $Q'a/Q_o$ , jer  $ba$  nek malo odstupa od  $b_o$ .

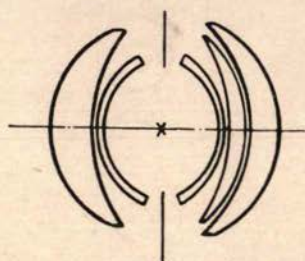
Općenito je za  $a_a \gg a_o$  i  $ba > b_o$ , te za  $a_a \ll a_o$  i  $ba < b_o$ . Ova tendencija odstupanja proizlazi iz komparacije vrijednosti  $Q'a/Q_o$  za  $a = 50^\circ$  na sl. 4 sa odgovarajućim vrijednostima  $Q'a/Q_o$  iz sljedeće tabele. Tabela sadrži za neke objektivne maksimalni odnos  $a_a/a_o$  kod blende koja je oslobođena vignjetacije zračunate prema podacima iz patenta za različite upadne kutjeva  $a$ .

br.	OBJEKTIV	slika	$A_a/A_o$ za			
			$0^\circ$	$38^\circ$	$50^\circ$	$67^\circ$
1	stari tip širokokutnog objektiva	6	1,00	0,84	0,67	—
2	Liar 6 od Russinow-Kosyrew	7	1,00	1,01	1,03	—
3	Steinheilov objektiv engl. patent 21211/1901	1	1,00	1,16	1,24	—
4	Russar US-Patent 2516724 franc. patent 935617	8	1,00	1,13	1,27	1,04
5	Aviogon od Bertele-a	5	1,00	1,20	1,40	1,68

Podaci tabele kazuju da dosada uobičajeni širokokutni objektivni imaju i bez vignjetacije još nepovoljnije opadanje osvjetljenja nego  $\cos^4\alpha$ . Objektiv »Liar« (sl. 7) odgovara slučajno gotovo cosinusovom zakonu, dok je Steinheilov objektiv očito povoljniji.

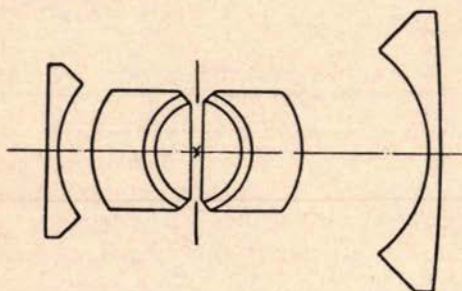


Sl. 5. Presjek širokokutnog objektivna »Aviogona«.

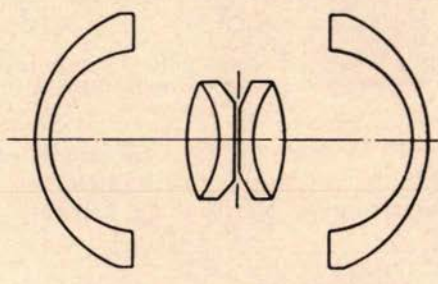


Sl. 6. Presjek širokokutnog objektivna starije konstrukcije.

Kod razvoja objektivna »Russara« (sl. 8) i Aviogona (sl. 5) išlo se već svjesno zatim da se opadanje svjetlosti poboljša upoređujući sa četvrtom cosinusovom potencijom.



Sl. 7. Presjek objektivna »Liar 6« od Russinow-Kosyrewa (Iz istraživanja o aeroizmjeri i fotogrametriji, Moskva 1939.) Opadanje osvjetljenja tog objektivna odgovara gotovo zakonu  $\cos^4\alpha$ .



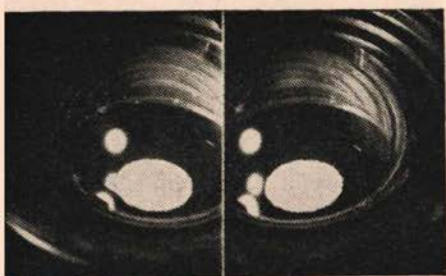
Sl. 8. Presjek ultraširokokutnog objektivna »Russar« od Russinowa.

M. Russinov išao je pri tom zatim, da dođe do ultraširokokutnog objektivna bez distorzije sa podnosljivim opadanjem osvjetljenja.

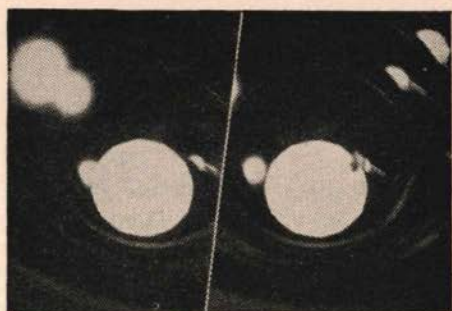
L. Bertele izveo je 1946. naprotiv temeljni tip jednog svjetlosno jakog širokokutnog objektivna od samo 100<sup>g</sup> slikovnog kuta sa što manje mogućom distorzijom a najvećom oštrinom. Kako se kvalitet slike zadovoljavajući za preciznu fotogrametriju upostizava samo kod dobro osvjetljenih rubova, moralo se po duzeti odgovarajuće mjere.

Već prema dioptriji grupe leća koja se nalazi pred Iris-blendom prema strani objekta bit će, kako je poznato, ulazna pupila povećana ili umanjena: slika Iris-blende. Konstatira se da omjer povećanja tog preslikavanja u meridionalnom presjeku između Iris-blende i ulazne pupile može već prema nagibu stošca jače varirati. Ako želimo postići malo opadanje osvjetljenja, tada treb

nastojati da bi ulazna pupila kod jako nagnutog promatranja obzirom na optičku os prema promatranju u smjeru optičke osi ispala što veća (sl. 9 i 10). To je zaista moguće postići prikladnim formiranjem leća, što je prvi puta primjenio Steinheil godine 1901. kod objektiva prikazanog na sl. 1. On sadrži jako savitu frontalnu rastresaču u formi meniskusa, koja prouzrokuje željeni efekt.



Sl. 9. Uvid u jedan stari širokokutni objektiv. Ravnina blende pričinja se da se otklanja od promatrača. Prolazi manje svijetla nego kod predblende.



Sl. 10. Isti kosi uvid u »Aviogon« jednake žarišne daljine. Ravnina blende pričinja se da se okreće prema promatraču. Prolazi više svijetla nego kod predblende.

Dokaz povoljnijeg opadanja osvjjetljenja kod objektiva sa slabom distorzijom i unutarnjom blendom, kao što su Steinheilov, Russinowov i Berteleov, trebao bi biti dovoljan da se napusti pogrešna hipoteza u fotogrametriji o »prirodnom opadanju osvjjetljenja prema četvrtoj cosinusovoj potenciji« zajedno sa uobičajenim posljedicama i da ju se zamjeni ispravnim predodžbama.