

**Dr Dragoslav Ugarak,**  
pukovnik, dipl. inž.  
Tehnicki opitni centar,  
Beograd

## **ODREĐIVANJE VISINE DEJSTVA BLIZINSKIH UPALJACA POMOCU TELEVIZIJSKIH KAMERA I ANALIZA GREŠAKA MERENJA**

UDC: 623.454.25 : 621.397

*Rezime:*

*U radu je opisan matematički model određivanja visine delovanja blizinskog upaljaca obradom video snimaka. Analizirani su izvori grešaka i doprinosi parametara koji uticu na veličinu grešaka. Odredene su vrednosti standardnog odstupanja, standardne greške i interval pouzdanosti.*

*Ključne reci: perspektivna projekcija sa video snimaka, visina delovanja blizinskog upaljaca, standardno odstupanje, standardna greška i interval pouzdanosti.*

---

### **ACTIVITY HEIGHT OF PROXIMITY FUZE EVALUATION USING TV CAMERAS AND MEASUREMENT ERRORS ANALYSIS**

*Summary:*

*This paper represents the mathematical model of determining the proximity fuze activity height by processing video shot. The errors' sources and contribution of effective parameters have been analysed. The values of standard deviation, standard error and reliability interval are defined.*

*Key words: perspective projection from video shot, proximity fuze activity height, standard deviation, standard error and reliability interval.*

---

#### **Uvod**

Razvoj elektronske tehnologije sedamdesetih godina XX veka omogućio je izradu elektronskih upaljaca za razne projekte sa blizinskim dejstvom na principu Doplerovog efekta. Ovi upaljaci omogućavaju dejstvo projektila na visini od 10 do 30 m iznad tla, čime se efikasnost parcadnog dejstva znatno povećava. U svetu su razvijeni blizinski upaljaci za projekte kalibra 35 mm do 155 mm. Kod nas je osamdesetih godina radeno na razvoju blizinskih upaljaca za artiljerijske projekte kalibra 105 mm, 120 mm, 122 mm, 130 mm i

152 mm i delimično je započeta proizvodnja za neke kalibre. Zbog raspada bivše Jugoslavije došlo je do prekida tek započete proizvodnje i razvoja blizinskih upaljaca. Nesporne prednosti blizinskih upaljaca nametnule su potrebu obnavljanja njihovog razvoja i proizvodnje. Paralelno sa nastavkom razvoja blizinskih upaljaca javlja se potreba za razvojem metoda i kriterijuma za ocenjivanje njihovog kvaliteta. U ovom radu prikazana je koncepcija metode za određivanje visine dejstva blizinskih upaljaca pomoću televizijskih kamera, kao najvažnijeg parametra za ocenu njihovog kvaliteta.

### Merenje visine dejstva blizinskog upaljaca

$$H = \frac{1}{f} hD \quad (1)$$

Metoda merenja visine dejstva blizinskih upaljaca zasniva se na principima perspektivne projektivne geometrije. Izvor informacija o objektima ili pojavama posmatranja je digitalna kamera koja formira sliku scene 2D postupkom perspektivne projekcije na žižnu ravan kamere. Osnovni zadatak perspektivne projektivne geometrije je inverzan problem, odnosno rekonstrukcija položaja i daljine objekta na osnovu analize i merenja snimaka. Rešenje tog problema zasniva se na uspostavljenoj korespondenciji između prostora 2D i 3D putem matematičkih relacija. Ti odnosi posmatraju se u koordinatnom sistemu vezanom za kameru, tako da se centar sistema O nalazi u centru objektiva (sociva) i naziva se tacka vizije.

Ocenjivanje funkcije i visine dejstva blizinskih upaljaca obavlja se ispitivanjem gadanjem iznad vodene površine sa amplitudom talasa do 0,2 m. Opseg padnih uglova za normalno funkcionisanje upaljaca treba da bude od 20° do 65°. Snimak dejstva blizinskog upaljaca iznad vodene površine uraden standardnom televizijskom kamerom prikazan je na slici 1.

Na slici se vidi sekvenca od nekoliko prvih uzastopnih snimaka dejstva projektila sa blizinskim upaljacem. Širenje produkata detonacije nastalih eksplozijom projektila traje 1,5 s, a cela pojava do smirivanja površine vode više sekundi, tako da ceo snimak eksplozije sadrži preko 50 kadrova.

Princip merenja visine dejstva blizinskog upaljaca prikazan je na slici 2. Iz slicnosti trouglova  $KEV$  i  $KE_1V_1$  dobija se jednačina za određivanje visine dejstva projektila sa blizinskim upaljacem:



Sl. 1 – Snimak dejstva blizinskog upaljaca

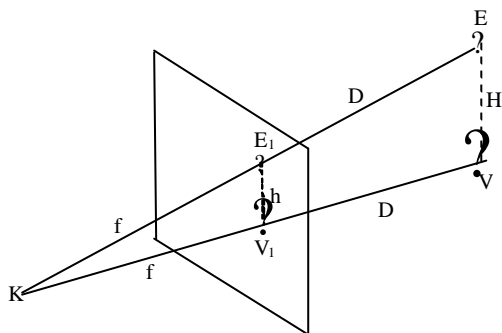
pri čemu je:

$H$  (m) – visina dejstva projektila,

$f$  (piksel) – daljina do ravni slike (žižna daljina),

$h$  (piksel) – visina dejstva projektila na slici,

$D$  (m) – daljina dejstva projektila od kamere.



Sl. 2 – Perspektivna projekcija dejstva projektila

Da bi se odredila visina dejstva bližinskog upaljaca  $H$ , kao što se vidi iz jednacine (1), potrebno je znati žižnu daljinu, odnosno daljinu do ravni snimka  $f$ , zatim izmeriti daljinu pojave eksplozije od kamere  $D$  i visinu eksplozije iznad uzemirene površine vode  $h$  na snimku dejstva projektila.

Daljina dejstva projektila od kamere može da se izmeri laserskim daljinomerom koji se nalazi u blizini kamere, a dobija odraz od vodenih stubova nastalih nakon udara parcadi projektila u vodenu površinu.

Visina eksplozije projektila na slici 1 može se odrediti merenjem rastojanja vatrene kugle od vodene površine uzburkane parcadnim dejstvom projektila. Ova visina meri se obradom digitalizovanog snimka na racunaru, pomocu pomicne koncanice u pikselima, i to od korena vodenih stubova

do sredine vatrene kugle na prvom snimku na kojem se uocavaju obe poja ve.

### Odredivanje žižne daljine snimka

Daljina ravni slike, odnosno žižna daljina, prethodno je određena velicina, koja zavisi od optic kog i elektronskog sistema kamere i predstavlja poznatu konstantu izraženu u milimetrima ili pikselima. Može se odrediti tako što se snimi neki reper poznate visine  $H_r$ , na poznatom rastojanju  $D_r$ , takvom da velicina lika repera  $h_r$  ispuni 90% kadra, a zatim se izmeri velicina lika repera u pikselima, obradom snimka na racunaru. Primenom jednacine (1) dobija se relacija za određivanje žižne daljine:

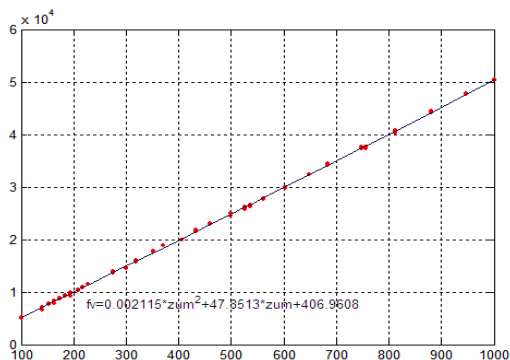
$$f = \frac{D_r}{H_r} h_r \quad (2)$$

Cesto se u ovim sistemima koriste objektivni sa promenljivim uvecanjem, takozvani zum objektivni, kod kojih velicina žižne daljine zavisi od velicine zuma. Velicina zuma registruje se u toku snimanja na svakom snimljenom kadru. Pomocu opisane metode može se snimanjem repera za razne vrednosti zuma odrediti za visnost  $f = f(\text{zum})$ .

Na primer, za potrebe određivanja žižne daljine kamere u funkciji zuma izvršeno je snimanje vertikalnog repera visine 2 m na daljini od 526 m od kamere, pri raznim vrednostima zuma od 100 do 1000. Žižna daljina određena je prema relaciji (2), što je prikazano tackama na dijagramu na slici 3. Interpolacijom ovih podataka polinomom drugog stepena, metodom najmanjih kvadrata, dobija se

dovoljno tačna funkcionalna zavisnost žižne daljine od zuma kamere u obliku:

$$f = 0,002115 \cdot zum^2 + 47,8513 \cdot zum + 406,961 \quad (3)$$



Sl. 3 – Žižna daljina kamere u funkciji zuma

### Greške merenja visine dejstva blizinskog upaljaca

Smatrajuci da je žižna daljina kamere  $f$  dovoljno tačno određena, ona predstavlja konstantu za određenu vrednost zuma, korišćenu pri snimanju, i može se odrediti pomoću jednačine (3). Greška u određivanju žižne daljine predstavlja sistematsku grešku koja se može anulirati preciznim kalibrisanjem mernog sistema.

Merenje daljine  $D$  vrši se laserskim daljinomerom sa određenom rezolucijom, koja kod artiljerijskih laserskih daljinomera iznosi  $\Delta D = 5$  m. To predstavlja slučajnu grešku merenja daljine. Sistematska greška merenja daljine nastaje zato što se daljina meri na osnovu odraza od vodenog stuba sa oboda uzburkane vodene površine, koja je približno kružnog oblika. Ova greška može se eliminisati tako što se izmerena daljina uveća za poluprecnik uzburkane vodene površine,

koji se određuje po istom principu kao i visina dejstva projektila.

Tačnost merenja visine dejstva projektila sa televizijskih snimaka  $h$  zavisi od kvaliteta i rezolucije slike i preciznosti mernog sistema, što prouzrokuje slučajnu grešku  $\Delta h$ , koja utiče na tačnost određivanja visine dejstva blizinskog upaljaca  $H$ . Može se usvojiti da tačnost određivanja centra vatrene kugle i korena stubova vode iznosi  $\pm 1$  piksel, što znači da ukupna slučajna greška određivanja visine eksplozije na snimku iznosi do  $\Delta h = 4$  piksela.

Greška određivanja visine dejstva blizinskog upaljaca može se prikazati primenom konačno malih veličina u diferencijalnoj jednačini (1):

$$\Delta H = \frac{1}{f}(h\Delta D + D\Delta h) \quad (4)$$

Dominantan uticaj na veličinu greške  $\Delta H$ , pri istoj žižnoj daljini, ima drugi sabirak koji predstavlja proizvod daljine i greške merenja visine eksplozije na snimku:

$$h\Delta D \ll D\Delta h \quad (5)$$

Smanjivanje žižne daljine, koja se nalazi u imeniocu formule za određivanje greške merenja visine dejstva blizinskog upaljaca, znatno uvećava grešku merenja. Tako, na primer, ako se usvoji da je uobičajena daljina kamere  $D = 5000$  m, za zum koji iznosi 1000 i za zum koji je 500 dobijaju se sledeće približne vrednosti greške određivanja visine dejstva blizinskog upaljaca:

$$\begin{aligned} zum &= 1000 \\ \Delta H &\approx \frac{D\Delta h}{f} = \frac{5000 \cdot 4}{50000} = 0,4 \text{ m} \end{aligned}$$

zum = 500

$$\Delta \approx \frac{D \cdot h}{f} = \frac{5000 \cdot 4}{25000} = 0,8 \text{ m}$$

To znači da dejstvo projektila, radi određivanja visine delovanja blizinskog upaljača sa što manjom greškom, treba snimati sa većim zumom i na manjoj daljini od kamere.

### Primer određivanja visine dejstva blizinskog upaljača obradom video snimaka sa jedne kamere

U primeru prikazanom na slici 1 snimanje dejstva projektila izvršeno je digitalnom video kamerom sa zum objektivom, čija je vrednost iznosila 1000, a funkcionalna zavisnost žižne daljine od zuma data jednačinom (3). Merenjima izvršenim na računaru pomoću pomoćne končanice i laserskim daljinomerom u toku snimanja dobijene su sledeće vrednosti parametara:

- žižna daljina  $f = 50373$  piksela,
- visina dejstva na snimku  $h = 47$  piksela,
- daljina dejstva upaljača  $D = 5915$  m,
- širina uzburkane površine vode  $l = 392$  piksela.

Prvo je potrebno odrediti prečnik uzburkane vodene površine, koji prema jednačini (1) iznosi:

$$L = \frac{1}{f} l D = \frac{392 \cdot 5915}{50373} = 46 \text{ m} \quad (6)$$

Sada je potrebno izvršiti popravku daljine merenja, odnosno eliminisati si-

stematsku grešku merenja daljine, dodavanjem izmerenoj daljini pola prečnika uzburkane vodene površine:

$$D_k = D + \frac{L}{2} = 5915 + \frac{46}{2} = 5938 \text{ m} \quad (7)$$

Sada je, pomoću jednačine (1), moguće odrediti visinu dejstva blizinskog upaljača:

$$H = \frac{1}{f} h D = \frac{47 \cdot 5938}{50373} = 5,54 \text{ m} \quad (8)$$

Greška određivanja visine dejstva blizinskog upaljača određuje se prema jednačini (4):

$$\begin{aligned} \Delta H &= \frac{1}{f} (h \Delta D + D \Delta h) = \\ &= \frac{47 \cdot 5 + 5938 \cdot 4}{50373} = 0,48 \text{ m} \end{aligned} \quad (9)$$

Može se smatrati da se stvarna visina dejstva blizinskog upaljača nalazi u intervalu definisanom izrazom:

$$\Delta H_s = H \pm \Delta H = 5,54 \pm 0,48 \text{ m} \quad (10)$$

Za ovako dobijeni interval pouzdanosti ne zna se verovatnoća sa kojom se može tvrditi da se stvarna visina dejstva blizinskog upaljača nalazi u tom intervalu. Radi toga, da bi se povećala tačnost merenja i sa unapred utvrđenom verovatnoćom odredile granice intervala pouzdanosti visine delovanja blizinskog upaljača, snimanje je potrebno izvršiti sa više kamera.

**Određivanje visine dejstva blizinskog upaljaca obradom video snimaka sa više kamera**

Visina dejstva blizinskog upaljaca obično se određuje sa tri do pet kamera, sa približno istim vrednostima zuma i daljine do dejstva projektila. Pri tome se za svaku kameru odredi visina  $H_i$  i greška  $\Delta H_i$ , kao što je prikazano u prethodnom primeru.

Ako se tačnost merenja iskaže kao recipročna vrednost greške merenja:

$$g_i = \frac{1}{\Delta H_i} \quad (11)$$

može se zaključiti da je tačnost utoliko veća što je manja greška merenja.

Kada je tačnost merenja približno ista za sve kamere, visina dejstva blizinskog upaljaca određuje se kao aritmetička sredina svih izmerenih visina:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \quad (12)$$

Kada tačnost merenja nije približno ista za sve kamere, visina dejstva blizinskog upaljaca određuje se kao ponderisana sredina svih izmerenih visina:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n g_i H_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad (13)$$

Slučajna greška pojedinačnih merenja procenjuje se pomoću standardnog odstupanja, koje se određuje iz rezultata pojedinih merenja pomoću formule:

$$S = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - H)^2}{n-1}} \quad (14)$$

Ocena o postojanju grubih grešaka daje se primenom kriterijuma Šovena (Chuvenneta). Po nje mu, ako je kolicnik apsolutne vrednosti odstupanja pojedinog merenja  $H_i$  od srednje vrednosti  $H$  svih merenja i standardnog odstupanja pojedinačnih merenja veći od neke vrednosti  $q$  (date u tabeli 1):

$$\frac{|H - H_i|}{S} > q \quad (15)$$

tada je rezultat merenja  $H_i$  sumnjiv i vrlo je verovatno da je nastao zbog neke grube greške. Takav rezultat treba eliminisati i obradu niza merenja vršiti bez tog merenja.

Tabela 1

n	2	3	4	5	6	7	8	9
q	1,15	1,38	1,54	1,65	1,73	1,80	1,86	1,91

Za ocenu tačnosti visine dejstva blizinskog upaljaca koristi se standardno odstupanje aritmetičke sredine, koje se naziva standardna greška i određuje se po formuli:

$$S_H = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (16)$$

Na osnovu poznavanja standardne greške, ocenjivanje stvarne vrednosti tražene visine dejstva blizinskog upaljaca vrši se određivanjem intervala pouzdanosti. To je interval unutar kojeg se stvarna visina  $H_S$  nalazi sa unapred datom verovatnoćom  $a$ , koja se naziva koeficijent pouzdanosti:

$$P(H - \Delta \leq H_S \leq H + \Delta) = a \quad (17)$$

Pri normalnoj raspodeli velicina  $\bar{x}$  iznosi:

$$\text{za } a = 0,95; \bar{x} = 2S_H \text{ i}$$

$$\text{za } a = 0,997; \bar{x} = 3S_H.$$

To je poznato pravilo 2s i 3s. Međutim, ove granice intervala pouzdanosti koriste se kada je uzorak veliki  $n = 30$ .

Za manji uzorak, kao što je slučaj sa merenjem visine dejstva blizinskog upaljača, za određivanje granica intervala pouzdanosti koristi se Studentova raspodela sa stepenom slobode  $n-1$ . Granice intervala pouzdanosti u ovom slučaju određuju se pomoću izraza:

$$\bar{x} = t_{a,n} S_H \quad (18)$$

Koeficijent Studentove raspodele prikazan je u tabeli 2.

Tabela 2

n	2	3	4	5	6
a = 0,95	12,7	4,3	3,2	2,8	2,6
a = 0,99	63,7	9,9	5,8	4,6	4,0

### Primer određivanja visine dejstva blizinskog upaljača obradom video snimaka sa više kamera

U eksperimentu iz prethodnog primera, za određivanje visine dejstva blizinskog upaljača korišćene su tri televizijske kamere. Nakon obrade snimaka dobijeni su sledeći podaci za visinu dejstva blizinskog upaljača:

i	1	2	3
H <sub>i</sub>	5,33 m	5,54 m	5,79 m

Primenom prethodno datih formula dobijene su sledeće vrednosti za srednju

visinu, standardno odstupanje i standardnu grešku:

$$\begin{aligned} H_S &= 5,55 \text{ m} \\ S &= 0,23 \text{ m}, \\ S_H &= 0,13 \text{ m} \end{aligned} \quad (19)$$

Uočava se da su granice intervala pouzdanosti kod Studentove raspodele za mali broj merenja (3 do 5) znatno veće nego kod normalne raspodele. U ovom primeru, za  $n = 3$  i sa verovatnoćom od 0,99 granice intervala pouzdanosti iznose:

$$\bar{x} = t_{a,n} S_H = 9,9 \cdot 0,13 = 1,29 \text{ m} \quad (20)$$

Granice intervala pouzdanosti za normalnu raspodelu srednje vrednosti visine delovanja blizinskog upaljača sa verovatnoćom od 0,997 iznose:

$$\bar{x} = 3S_H = 0,39 \text{ m} \quad (21)$$

Pošto su u sprovedenim merenjima eliminisane grube i sistematske greške i procenjena je vrednost slučajne greške na približno 0,4 m, može se zaključiti da je za ocenu intervala pouzdanosti dovoljno pouzdano primeniti normalnu raspodelu sa pravilom 3s.

### Zaključak

U radu je pokazano da je moguće dovoljno tačno odrediti visinu delovanja blizinskog upaljača obradom video snimka uz primenu kvalitetne optike sa preciznim očitavanjem žižne daljine. Utvrđeni su poreklo i velicine grešaka merenja i date metode za eliminisanje sistematskih i grubih grešaka. Dokazano je da je greška određivanja visine obrnuto srazmerna

žičnoj daljini video sistema, a direktno srazmerna daljini. To znači da će greške određivanja visine biti manje sa povećanjem žične daljine video sistema i sa smanjivanjem daljine snimanja.

Primenom metoda za eliminisanje grubih i sistematskih grešaka dobijaju se ocene visine delovanja blizinskog upaljača u granicama intervala velicine procenjene slučajne greške mernog sistema. Upotrebom više kamera dobijaju se vrednosti za standardno odstupanje, standardnu grešku i interval pouzdanosti koji, usled eliminisanja grubih i slučajnih grešaka, odgovaraju normalnom zakonu ras-

pedele srednje vrednosti visine delovanja blizinskog upaljača.

Primena metode za određivanje visine delovanja blizinskog upaljača obradom video snimaka ima veliki praktični značaj, jer se jednostavno i brzo dobijaju pouzdani podaci o merenoj veličini sa prihvatljivom i pouzdano ocenjenom greškom merenja.

*Literatura:*

- [1] Haralik, R. M.: Computer and Robot Vision, Volume I, II, Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [2] Guter, R. S.; Ovcinski, B. V.: Elementi numeričke analize i matematičke obrade rezultata opita, Nauka, Moskva, 1970.
- [3] Vukadinovic, S.: Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike, Privredni pregled, Beograd, 1973.