Digitalni simulator u realnom vremenu za sistem upravljanja vatrom na protivavionskom topu

U nastavku je opisana jedna realizacija digitalnog simulatora u realnom

Opis rješenja problema praćenja

Na slici 1 prikazana je struktura sistema za upravljanje vatrom u režimu praćenja. Praćenje se odvija u dvije faze: ručno i poluautomatski. Ručno je kada su kontakti »prekidača« P u položaju »1« (kao na sl. 1), a poluautomatsko u položaju »2« prekidača P . U toku ručnog praćenja operator ima zadatak da pozicijsku grešku praćenja smanji na iznos koji omogućuje upotre-

vremenu za sistem upravljanja vatrom na protivavionskom topu u režimu praćenja. Najprije je dan opis rješenja problema praćenja, a potom je formi-

bu laserskog daljinomjera. Nakon što se počne mjeriti daljina do cilja laserom, i kada se greška praćenja po daljini smanji, prelazi se u fazu poluautomat-

skog praćenja. U petlju praćenja uključuje se integrator I_1 , na kojem je do tada postavljen početni uslov — procijenjena brzina cilja po određenoj koordinati. Ako se sa U_1^x označi izlaz prvog integratora, t_{12} — trenutak prelaska iz ručnog u poluautomatsko praćenje, tada je izlaz integratora I_1 :

$$U_1^x = \dot{X}, \quad P = 1 \text{ (ručno praćenje).} \quad (1)$$

$$U_1^x = \int \dot{X} dt + U_1^x(t_{12}), \quad P = 2 \text{ (poluautomatsko).}$$

Izlaz integratora I_2 je dat sa:

$$\begin{aligned} X &= \int \dot{X} dt & P &= 1. \\ X &= \int (\dot{X} + U_1^x) dt + X(t_{12}), & P &= 2. \end{aligned} \quad (2)$$

Izrazi (1) i (2) dani su za koordinatu X , a isto vrijedi i za druge dvije koordinate, što je naznačeno na slici 1. Potrebno je dati napomenu u vezi sa navedenim izrazima i oznakama na slici 1, a što će u nastavku biti jasnije kada se upozna struktura ulaznog para razlagača. Napomena se odnosi na oznake signala brzina — ove oznake vrijede samo za rad sistema u fazi ručnog praćenja sa zatvorenim petljom za praćenje po daljini (mjerjenje daljine cilja laserskim daljinomjerom, uz $P=1$). Druga napomena je u vezi sa time da su izrazi (1) i (2) tačni do »na konstantu«, tj. nisu uvedena pojačanja koja realno postoje

u sistemu. Konstante pojačanja nisu uvedene ni u izrazima (3) i (4) koji se odnose na transformacije realizirane na ulaznom paru razlagača, jer se željelo pojednostaviti objašnjavanje rada sistema. Ova pojačanja ($C_x, C_{1x}, \dots$) su uzeta u obzir pri formiranju diskretnog modela sistema.

Koordinatni sistem koji se koristi prikazan je na slici 2. Vidi se da je to takozvani »lijevi« koordinatni sistem. Cilj je dan u njegovom prirodnom — sfernom koordinatnom sistemu (SKS), dok analogno računalo sistema za upravljanje vatrom (SUV) podatke obrađuje u pravokutnom koordinatnom sistemu (PKS). Zbog toga je potrebno izvršiti transformaciju iz SKS u PKS. To se vrši na ulaznom paru razlagača koji je prikazan na slici 3. Sa ϵ i β je označena pozicija nišanske linije. Radijalna brzina u SKS je $\dot{D}$, a V_ϵ i V_β predstavljaju tangencijalnu brzinu u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini.

Sl. 3 Ulazni par razlagača.

Sl. 2 Koordinatni sistem.

Transformacije koordinata $(\dot{D}, V_\epsilon, V_\beta) \rightarrow (\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$ su:

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= \dot{D} \sin(\epsilon) + V_\epsilon \cos(\epsilon) = \\ &= d/dt [D \sin(\epsilon)] = d/dt (Z), \\ \dot{D}_h &= \dot{D} \cos(\epsilon) - V_\epsilon \sin(\epsilon) = \\ &= d/dt [D \cos(\epsilon)] = d/dt (D_h), \\ \dot{X} &= \dot{D}_h \cos(\beta) - V_\beta \sin(\beta) = \\ &= d/dt [D_h \cos(\beta)] = d/dt (X), \\ \dot{Y} &= \dot{D}_h \sin(\beta) + V_\beta \cos(\beta) = \\ &= d/dt [D_h \sin(\beta)] = d/dt (Y), \end{aligned} \quad (3)$$

gdje su V_ϵ i V_β tangencijalne brzine date sa:

$$V_\epsilon = \dot{D}\epsilon, \quad V_\beta = \dot{D}_h\beta. \quad (4)$$

Servopogoni služe za pozicioniranje nišanske linije tako da se vrši transformacija iz PKS u SKS. Kao davač signala greške servopogona koristi se izlazni par razlagača (sl. 4) koji su njegov sastavni dio. Servopogon vrši svoj zadatak tako da signali grešaka $\Delta\epsilon$ i $\Delta\beta$ teže prema nuli. Time će pozicija nišanske linije (ϵ, β) težiti prema poziciji zadanoj sa (X, Y, Z). Naime, za $\Delta\beta=0 \rightarrow \beta = \arctg(Y/X)$, a u kanalu visine pri $\Delta\epsilon=0 \rightarrow \epsilon = \arctg(Z/D_h)$, što predstavlja zadane vrijednosti.

Sl. 4 Izlazni par razlagača.

Ako se posmatra struktura sistema u fazi ručnog praćenja (sl. 1, $P=1$) sa zatvorenim petljom za praćenje po daljini, vidi se da pri malim greškama praćenja po poziciji i daljini vrijedi:

$$\begin{aligned}(D, \epsilon, \beta) &\rightarrow (D_c, \epsilon_c, \beta_c), \\(X, Y, Z) &\rightarrow (X_c, Y_c, Z_c), \\(\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}) &\rightarrow (\dot{X}_c, \dot{Y}_c, \dot{Z}_c), \\(\dot{D}, V_\epsilon, V_\beta) &\rightarrow (\dot{D}_c, V_{\epsilon c}, V_{\beta c}), \\(\epsilon, \beta) &\rightarrow (\epsilon_c, \beta_c).\end{aligned}$$

Oznaka $\rightarrow$ je umjesto »teži ka«, a »c« u indeksu se odnosi na cilj.

Navedena analiza pokazuje slijedeće: ako se praćenjem ostvaruje da $(D_c - D) \rightarrow 0$, $(\epsilon_c - \epsilon) \rightarrow 0$, $(\beta_c - \beta) \rightarrow 0$ (tj. minimiziraju se iznosi grešaka praćenja), tada se iznosi pravokutnih koordinata računala u SUV-u minimalno razlikuju od koordinata cilja u PKS. Time se omogućuje da signali sa ulaznog para razlagača predstavljaju procjenu brzine cilja u PKS u navedenoj fazi praćenja ($P=1$ sa zatvorenim petljom po daljini). Prema izrazima (3), koji daju transformacije realizirane na ulaznom paru raz-

lagača, i slici 1, slijedi da signali sa upravljačke palice predstavljaju procjenu kutnih brzina (ϵ, β) cilja. Na taj način se može izvesti slijedeći zaključak: u režimu praćenja SUV predstavlja estimator parametara linearne trajektorije cilja. Pod pojmom linearne trajektorije podrazumijeva se pravolinijska trajektorija sa konstantnom brzinom.

Diskretni model sistema

Formiranje diskretnog modela sistema za upravljanje vatrom u režimu ručnog praćenja moguće je izvršiti na razne načine. Postupak koji se izabere treba odgovoriti na nekoliko zahtjeva:

- dovoljna vjernost reprodukcije polaznog modela;
- dovoljno veliki period diskretizacije u smislu realizacije na danom sklopovskom i programskom okruženju;
- mogućnost korišćenja simulatora za specificirane potrebe.

Trenutno, gornje zahtjeve ispunjava slijedeća metodologija formiranja diskretnog modela:

- integratori (I_1, I_2) u blokovima koordinata zamjenjuju se Eulerovim eksplicitnim diskretnim integratorima
- postupak diskretne analogije;
- model servopogona diskretizira se korišćenjem step invarijante metode;
- ne vrši se izračunavanje funkcija sinus i cosinus, već se iščitavaju iz tablica (look-up).

U vezi primjene iščitavanja vrijednosti trigonometrijskih funkcija iz tablica, ustanovljeno je tri puta kraće vrijeme izračunavanja diskretnog modela SUV-a. To se odnosi na računalo bez matematičkog koprocesora.

Diskretni model ulaznog para razlagača je dat sa:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_k &= \dot{D}_k C_D [\sin(\epsilon_k) + V_{\epsilon k} C_\epsilon \cos(\epsilon_k)], \\ \dot{D}_{hk} &= \dot{D}_k C_D [\cos(\epsilon_k) - V_{\epsilon k} C_\epsilon \sin(\epsilon_k)], \\ \dot{X}_k &= \dot{D}_{hk} [\cos(\beta_k) - V_{\beta k} C_\beta \sin(\beta_k)],\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Y}_k &= \dot{D}_{bk} |\sin(\beta_k) + V_{\beta k} C_\beta |\cos(\beta_k), \\ V_{\epsilon k} &= \dot{\epsilon}_k D_k, V_{\beta k} = \dot{\beta}_k D_k, \dot{\epsilon}_k = C_{U\epsilon} \epsilon_{Uk}, \\ \dot{\beta}_k &= C_{U\beta} \beta_{Uk}, \\ \epsilon_{Uk} &= f_{N\epsilon}(\epsilon_{ck} - \epsilon_k), \beta_{Uk} = f_{N\beta}(\beta_{ck} - \beta_k), \\ \dot{D}_k &= 0 \quad \text{--- otvorena petlja praćenja po daljini,} \\ \dot{D}_k &= D_{Lk} - D_k \quad \text{--- petlja po daljini zatvorena.}\end{aligned} \quad (5)$$

Sl. 5 Diskretizirani kanal koordinate X u režimu ručnog praćenja ($P=1$).

Oznake u (5) su:

- $(\dot{X}_k, \dot{Y}_k, \dot{Z}_k)$ — izlazi razlagača u trenutku k,
- $|\sin(\cdot), |\cos(\cdot)$ — sinus i cosinus iz tablice,
- $f_{N\epsilon}(\cdot), f_{N\beta}(\cdot)$ — model operatora,
- $(D_{Lk}, \epsilon_{ck}, \beta_{ck})$ — koordinate cilja u SKS,
- $(D_k, \epsilon_k, \beta_k)$ — koordinate SUV-a u SKS,
- C_D — pojačanje petlje po daljini,
- C_ϵ — pojačanje V_ϵ ,
- C_β — pojačanje V_β ,
- $C_{U\epsilon}$ — pojačanje upravljačke palice po ϵ ,
- $C_{U\beta}$ — pojačanje upravljačke palice po β ,
- $(V_{\epsilon k}, V_{\beta k})$ — procjenjene brzine u trenutku k,
- $(\dot{D}_k, \dot{D}_{hk}, \dot{\epsilon}_k, \dot{\beta}_k)$ — procjenjene brzine u trenutku k,

$(\epsilon_{Uk}, \beta_{Uk})$ — pozicija upravljačke palice u k.

U režimu ručnog praćenja ($P=1$), diskretni model blokova koordinata, sa Eulerovim eksplicitnim integratorom, je:

$$\begin{aligned}X_{k+1} &= X_k + T \dot{X}_k C_X, \quad U_1^X = C_X \dot{X}_k, \\ T &\text{--- period disk.} \\ Y_{k+1} &= Y_k + T \dot{Y}_k C_Y, \quad U_1^Y = C_Y \dot{Y}_k, \\ C_{X(YZ)} &\text{--- pojačanja,} \\ Z_{k+1} &= Z_k + T \dot{Z}_k C_Z, \quad U_1^Z = C_Z \dot{Z}_k.\end{aligned} \quad (6)$$

Na slici 5 prikazan je diskretni model kanala koordinate X u računalu za fazu ručnog praćenja.

U režimu poluautomatskog praćenja ($P=2$) za blokove koordinata vrijedi slijedeći diskretni model:

$$\begin{aligned}X_{k+1} &= X_k + T(\dot{X}_k C_X + U_{1k}^X C_{1X}), \\ U_{1k+1}^X &= U_{1k}^X + T \dot{X}_k, \\ Y_{k+1} &= Y_k + T(\dot{Y}_k C_Y + U_{1k}^Y C_{1Y}), \\ U_{1k+1}^Y &= U_{1k}^Y + T \dot{Y}_k, \\ Z_{k+1} &= Z_k + T(\dot{Z}_k C_Z + U_{1k}^Z C_{1Z}), \\ U_{1k+1}^Z &= U_{1k}^Z + T \dot{Z}_k.\end{aligned} \quad (7)$$

Diskretni model kanala X koordinate u režimu poluautomatskog praćenja prikazan je na slici 6.

Daljina sistema kao povratna informacija petlje za praćenje po daljini računa se na izlaznom paru razlagača:

$$\begin{aligned}D_{hk} &= X_k |\cos(\beta_k) + Y_k |\sin(\beta_k), \\ D_k &= D_{bk} |\cos(\epsilon_k) + Z_k |\sin(\epsilon_k).\end{aligned} \quad (8)$$

Kao model servopogona usvojen je oscilatorni element drugog reda čiji je

Sl. 6 Diskretni model kanala X koordinate u režimu poluautomatskog praćenja ($P=2$).

diskretni ekvivalent određen step in-
varijantnom metodom:

$$\begin{aligned}x_{1k+1} &= \varphi_{11}x_{1k} + \varphi_{12}x_{2k} + \vartheta_1 u_k, \\x_{2k+1} &= \varphi_{21}x_{1k} + \varphi_{22}x_{2k} + \vartheta_2 u_k,\end{aligned}\quad (9)$$

gdje su:

x_1 — stvarna pozicija nišanske li-
nije (ε ili β),

x_2 — stvarna kutna brzina nišan-
ske linije ($\dot{\varepsilon}$ ili $\dot{\beta}$),

Sl. 7 Analiza utjecaja određivanja sinus i
cosinus funkcija iz tablica. Brzina cilja:
 $D_c = 350$ m/s, $T = 25$ ms; a) usporedba greša-
ka po doljini $e_D' = e_D^s - e_D^d$; b) usporedba
grešaka po visini $e_e' = e_e^s - e_e^d$; c) uspo-
redba grešaka po pravcu $e_\beta' = e_\beta^s - e_\beta^d$; »s«
sin/cos kao funkcije; »I« sin/cos iz tablica.

u_k — ulaz u servopogon, $u_k = \arctg$
(Y_k/X_k) za kanal β ,

$u_k = \arctg(Z_k/D_{hk})$ u kanalu ε .

Sl. 8 Analiza vjernosti reprodukcije polaznog
kontinuiranog modela SUV-a sa realiziranim
digitalnim simulatorom u realnom vremenu.
 $T = 25$ ms, »d« — digitalni simulator »c« —
kontinuirani model SUV.

φ_{ij} i ϑ_i su dati sa:

$$\varphi_{11} = C_5 \sin(C_3) / C_1, \quad C_1 = \sqrt{(1 - \zeta^2)},$$

$$\varphi_{12} = C_5 \sin(\omega C_1 T) / (\omega C_1),$$

$$C_2 = C_1 / \zeta, \quad C_5 = \exp(-\zeta \omega T),$$

$$\varphi_{21} = \omega C_5 [\cos(C_3) - \sin(C_3)],$$

$$C_3 = \omega C_1 T + \arctg(C_2),$$

$$\varphi_{22} = C_5 \cos(\omega C_1 T) - \sin(\omega C_1 T) / C_2,$$

$$\begin{aligned}\vartheta_1 &= 1 + C_5 \sin(C_3)/C_1, \\ C_4 &= \omega C_1 T - \arctg(C_2), \\ \vartheta_2 &= \omega C_5 [\cos(C_4) - \sin(C_4)/C_2].\end{aligned}\quad (10)$$

U (10) je:

- ω — vlastita frekvencija neprigušenih oscilacija pojedinog kanala (ε ili β),
- ξ — koeficijent relativnog prigušenja.

Sl. 9 Promjena grešaka praćenja sa diskretnim modelom računala, $T = 25$ ms. Model servopogona: a) kontinuirani; b) diskretiziran step invarijant metodom.

Formirani diskretni model SUV-a u režimu praćenja testiran je obimnim simulacijama. Na slici 7 prikazana je razlika između grešaka praćenja diskretnih modela u slučaju računanja funkcija sinus i cosinus, te određivanja

iz tablica, tj. korišćenja funkcija $\text{lsin}()$ i $\text{lcos}()$ u (5) sa korakom od 10 mrad.

Na slici 8 se vidi velika vjernost reprodukcije polaznog modela SUV-a njegovim ekvivalentnim diskretnim modelom, koji je formiran na opisani način.

Korektnost postupka diskretizacije modela servopogona može se ustanoviti i na slici 9, gdje je prikazan odziv SUV-a sa kontinuiranim (a) i diskretnim (b) modelom servopogona.

Na slikama 7—9 usvojen je model operatora dan sa:

$$\begin{aligned}f_{N\beta} (\beta_{ek} - \beta_k) &= \beta_{ek} - \beta_k, \\ f_{N\varepsilon} (\varepsilon_{ek} - \varepsilon_k) &= \varepsilon_{ek} - \varepsilon_k.\end{aligned}\quad (11)$$

Rezultati primjene simulatora za obuku operatora

Kao što je rečeno u uvodu, primjena simulacija u realnom vremenu je višestruka. Jedan od prvih ciljeva koji se je želio postići izloženom realizacijom digitalnog simulatora za SUV jeste unapređenje metodologije obuke operatora u rukovanju SUV-om. Kao što se vidi iz strukture SUV-a (sl. 1), operator je sastavni element SUV-a u smislu djelovanja petlje za pozicijsko praćenje cilja. U tom smislu, čovjek-operator mora se prilagoditi na dinamiku tehničkog dijela SUV-a u uslovima praćenja realnih ciljeva. Digitalni simulator SUV-a u realnom vremenu je nezamenjiv u postupku obuke, a čini je jeftinijom i efikasnijom.

Na slikama 10 i 11 prikazani su rezultati promjene grešaka praćenja sa uključenim realnim operatorom u petlji za praćenje. Prva slika (10) pokazuje rad operatora sa svega desetak praćenja, dok je na drugoj slici (11) vidljiv napredak istog operatora nakon pedesetak praćenja. Iako je brzina cilja u drugom slučaju tri puta veća, kvaliteta praćenja je znatno bolja.

Sl. 10 Greške praćenja sa realnim operatorom u petlji za praćenje po poziciji; $T=25$ ms, $\dot{D}=50$ m/s.

Sl. 11 Greške praćenja sa realnim operatorom u petlji za praćenje po poziciji; $T=25$ ms, $\dot{D}=150$ m/s.

Zaključak

Prikazana realizacija digitalnog simulatora za sistem upravljanja vatrom u režimu praćenja omogućuje njegovo korišćenje na danom sklopovskom i programskom okruženju: personalno računalo ATARI ST, programski jezik pascal i assembler za mikroprocesor M68000.

Ekvivalentni diskretni model SUV-a je formiran kombinacijom postupka

diskretne analogije sa Eulerovim eksplisnim integratorom i step invarijantne metode. Metodologija formiranja diskretnog modela pokazala se uspješnom u smislu omogućavanja realizacije na spomenutom okruženju.

Realizirani simulator omogućuje njegovu primjenu u različite svrhe, kao što su: obuka operatora za upravljanje sistemom, dijagnostika i računalom podržana ispitivanja, te projektiranje novih sistema za upravljanje vatrom.

Literatura:

- [1] Charles L. Phillips, H. Troy Nagle Jr.: DIGITAL CONTROL SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN, Prentice-Hall, New York, 1984.
- [2] Adrinek S.: Matematski model, simulacija i identifikacija sistema za upravljanje vatrom na protivavionskom topu, VVTŠ KoV JNA, Zagreb, 1985.
- [3] Gajić M.: Simulator cilja u realnom vremenu za SUV na protivavionskom topu, Diplomski rad, VVTŠ KoV JNA, Zagreb, 1988.
- [4] Adrinek S., Gajić M.: Realizacija simulatora cilja SUV na protivavionskom topu, VI susret inovatora u JNA, Sarajevo, 1988.
- [5] Adrinek S., Gajić M., Marković S.: Simulator u realnom vremenu za sistem upravljanja vatrom na protivavionskom topu, Zbornik radova JUREMA-89, Plitvice, 1989.
- [6] Adrinek S., Marković S.: Simulacija cilja u realnom vremenu za SUV na PA topu, Susret inovatora V vojne oblasti, Karlovac, 1989.