



Analiza błędów obliczania nastaw działowych przy zastosowaniu algorytmu zmiennego w czasie

WŁODZIMIERZ BOROWCZYK, WOJCIECH KACZMAREK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki,
Instytut Systemów Mechatronicznych,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy przedstawiono problematykę związaną z celownikami do przeciwlotniczych zestawów artyleryjskich bliskiego zasięgu. Szczególną uwagę zwrócono na możliwość zastosowania algorytmu zmiennego w czasie, uwzględniającego drugą i trzecią pochodną bieżących współrzędnych celu. W celu zbadania poprawności tezy opracowano programy komputerowe w języku C oraz przeprowadzono szereg symulacji komputerowych.

Słowa kluczowe: przeciwlotnicze zestawy artyleryjskie, algorytm wyliczania nastaw do strzelania, czas obserwacji

Symbole UKD: 623.418.2

1. Wstęp

Znajdujące się obecnie na wyposażeniu przeciwlotniczych zestawów artyleryjskich i artyleryjsko-rakietowych bliskiego zasięgu, celowniki tachometryczne na ogół nie mierzą poprawnie wielkości wejściowych niezbędnych do skutecznego ich funkcjonowania. Ponadto celowniki te w swej konstrukcji posiadają pewne uproszczenia w rozwiązaniu zadania spotkania pocisku z celem, wynikające właśnie z braku pomiaru wielkości wejściowych. Bardzo powszechne tachometryczne celowniki giroskopowe mierzą co prawda kątową prędkość śledzenia celu w płaszczyźnie jego ruchu, lecz pomiar ten jest poprawny tylko dla jednej kątowej prędkości celu. Celowniki takie rozwiązują zagadnienie trafienia w miarę poprawnie dla jednej uśrednionej odległości do celu i to w przypadku ruchu tego celu po okręgu.

Zasadę pracy celownika tachometrycznego rozpatruje się najczęściej dla szczególnego przypadku ruchu celu względem stanowiska ogniowego, ponieważ błędy są tutaj najmniejsze.

W założeniach przyjmuje się, że cel porusza się ze stałą prędkością, na niezmiennej (w danych konkretnych warunkach) wysokości, po okręgu o środku leżącym nad stanowiskiem ogniowym SO. Przypadek taki nie występuje jednak na rzeczywistym polu walki.

PZAR małego kalibru są przeznaczone do osłony wojsk i obiektów znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie ich stanowisk. W związku z tym zestawy te będą zwalczać cele powietrzne wykonujące atak na osłaniany obiekt. Taktyka działań współczesnego lotnictwa polega na skrytym podejściu do obiektu na małej wysokości i wykonaniu ataku z zastosowaniem złożonego manewru (np. zwrotu bojowego, pętli, półpętli) lub ataku z dużej wysokości przy zastosowaniu broni inteligentnej.

Przy drugim rodzaju ataku PZAR (Przeciwlotnicze Zestawy Artyleryjsko-Rakietowe) nie mogą niszczyć samolotów (jako nosicieli uzbrojenia), ponieważ są one poza zasięgiem armat, mogą natomiast niszczyć odpalane rakiety i bomby zbliżające się do stanowisk ogniowych, jeśli zostaną one wykryte.

Tor lotu samolotów podchodzących do obiektu na małej wysokości charakteryzuje się dużymi zmianami wysokości, kierunku i prędkości. Dlatego tak ważne jest tutaj poprawne rozwiązanie zagadnienia spotkania pocisku z celem.

Cały problem sprowadza się do rozwiązania równania wektorowego, którego schemat przedstawiono na rysunku 1.1.

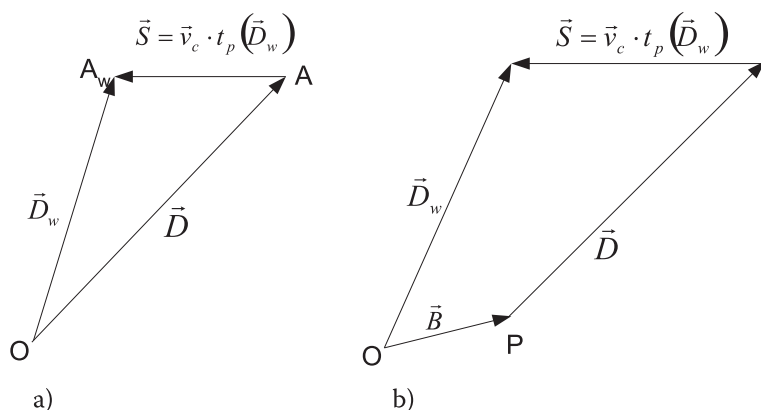
$$\vec{D}_w = \vec{D} + \vec{v}_c \cdot \tau_p \quad (1.1)$$

$$\text{lub} \quad \vec{D}_w = \vec{D} + \vec{B} + \vec{v}_c \cdot \tau_p, \quad (1.2)$$

gdzie: \vec{D} — wektor odległości;
 \vec{D}_w — wektor odległości wyprzedzonej;
 \vec{v}_c — wektor prędkości celu;
 \vec{B} — wektor odległości pomiędzy armatą i urządzeniem mierzącym odległość i znajdującym się w punkcie P.

Współrzędne bieżące celu są obarczone błędami pomiarowymi. Przy uwzględnieniu błędów pomiarowych dla przypadku pokazanym na rysunku 1.1a równanie wektorowe przyjmuje postać

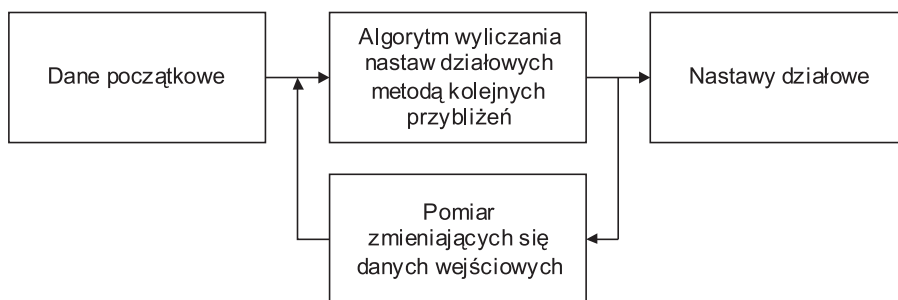
$$\vec{D}_w = \vec{D}(t_s) + \int_{t_s}^{t_s + \tau_p(D_w)} \vec{v}_c(t) \cdot dt + \delta \vec{D}_z \{E[\vec{z}], \vec{\Theta}, \tau_p\}, \quad (1.3)$$



Rys. 1.1. Szkic wektorowy: trójkąt wyprzedzenia; czworobok wyprzedzeń

gdzie: $\vec{D}(t_s)$ — odległość do celu w chwili strzału;
 $\delta\vec{D}_z \{E[\vec{z}], \vec{\Theta}, \tau_p\}$ — wektor poprawek uwzględniający warunki strzelania;
 $E[\vec{z}]$ — wartość oczekiwana wektora błędów, spowodowanych
 zaburzeniami balistycznymi i warunkami strzelania;
 τ_p — czas lotu pocisku do punktu wyprzedzonego;
 t_s — czas w chwili strzału.

Wyznaczenie nastaw do strzelania (rys. 1.2) jest możliwe tylko wówczas, kiedy znane są: prawo ruchu celu oraz warunki strzelania.



Rys. 1.2. Ogólny schemat wyliczania nastaw działowych

Z zależności (1.3) wynika, że do rozwiązania zadania spotkania pocisku z celem konieczna jest znajomość wektora prędkości celu \vec{v}_c , a wartość tę można otrzymać poprzez złożenie składowych wektora prędkości celu w zadanym układzie współrzędnych. Składowe wektora prędkości mogą być określone, jeśli znane są

współrzędne celu oraz prędkość ich zmian. W takim przypadku zadanie spotkania pocisku z celem będzie rozwiązywane dla chwilowych wartości tych wielkości. Najczęściej stosowanym układem współrzędnych w przelicznikach artyleryjskich jest układ współrzędnych prostokątnych (tylko w takim układzie współrzędnych, dla prostoliniowego jednostajnego ruchu celu, parametry ruchu celu są wartościami stałymi). Ponieważ prawo ruchu celu jest a priori nieznane, do rozwiązania zadania spotkania pocisku z celem należy przyjąć hipotezę o ruchu celu.

Przeciwnolotnicze zestawy artyleryjskie (PZA) charakteryzują się stosunkowo małym zasięgiem rażenia ogniem (np. dla 35 mm armat Oerlikon zasięg wynosi około 4000 m) i przeznaczone są głównie do niszczenia nisko lecących celów powietrznych. Samo wykrywanie celów nisko lecących jest dużym problemem i — co zostało udowodnione — od momentu wykrycia celu do znalezienia się go w strefie ognia zestawu pozostaje niewiele czasu. Czas ten można wyznaczyć ze wzoru:

$$t_{\text{przyg}} = \frac{D_{\text{wykr}} - D_{\text{Str.Og}}}{v_c}, \quad (1.4)$$

gdzie: D_{wykr} — odległość wykrycia celu powietrznego;
 $D_{\text{Str.Og}}$ — odległość do dalszej strefy otwarcia ognia;
 v_c — prędkość celu powietrznego.

W celu wyznaczenia nastaw działowych należy przez określony czas, zwany czasem obserwacji, mierzyć bieżące współrzędne celu. Im mniejszy czas obserwacji, tym większe błędy wyznaczania nastaw działowych. Celem konstruktorów jest opracowanie przeliczników, które zawsze, bez względu na warunki umożliwiałyby dokładne wyliczenie zadania spotkania pocisku z celem.

Badania algorytmów umożliwiających wyliczenie nastaw do strzelania dowodzą, że powinny one łączyć w sobie różne cechy. W pierwszej fazie, kiedy informacji o celu jest niewiele, powinny być to algorytmy uproszczone, natomiast w sytuacji, kiedy śledzenie celu odbywa się przez pewien określony czas, lepsze rezultaty dają algorytmy uwzględniające wyższe pochodne. Ma to szczególne znaczenie wówczas, kiedy śledzone cele manewrują. Innymi słowy, można powiedzieć, że celowe wydaje się zastosowanie algorytmu zmiennego w czasie, który przełączałby się automatycznie w zależności od czasu śledzenia celu.

2. Analiza błędów obliczania nastaw działowych przy zastosowaniu algorytmu zmiennego w czasie

Duży czas oczekiwania na gotowość do strzelania (długi czas obserwacji T) jest niejednokrotnie nie do przyjęcia. Z drugiej strony zastosowanie filtrów obliczających

wartości wyprzedzone z uwzględnieniem pochodnych współrzędnych I, II i III rzędu wymagają stosowania stosunkowo długich czasów obserwacji (4÷5 s).

Z punktu widzenia „przeciwlotnika”, ogień do celu powietrznego powinno się „otwierać” bardzo szybko, najlepiej zaraz po wykryciu celu. Ze względu na to, że nie udaje się pogodzić dwóch sprzecznych wymagań: małego czasu reakcji zestawu i dużej dokładności strzelania, celowe wydaje się opracowanie algorytmu wyznaczania nastaw działowych dla przelicznika balistycznego, który częściowo uwzględniałby oba wymagania.

Przelicznik z takim algorytmem umożliwiłby stosunkowo wczesne otwieranie ognia do celu ze świadomością, że błędy obliczania nastaw działowych będą w początkowym okresie większe. Przyczyną większych błędów będzie zastosowanie w algorytmie przelicznika filtrów obliczających wyprzedzenia, wyznaczonych dla małych czasów obserwacji celu. W miarę upływu czasu wzrasta zbiór współrzędnych celu i będzie można zastosować w algorytmie przelicznika filtry wyznaczone dla większych czasów obserwacji poprawiając dokładność wyznaczania nastaw działowych. Schemat blokowy algorytmu przelicznika pokazano na rysunku 2.1. W algorytmie tym czasy obserwacji oznaczono przez T_1 , T_2 , T_3 , T_4 . Sprawą otwartą jest przyjmowanie tych wartości. Przyjmowanie wartości $T_1 < 2$ s nie ma sensu ze względu na duże błędy wyliczania nastaw działowych, które spowodują, że strzelanie będzie nieefektywne. W takim przypadku istnieje do rozwiązania następujący problem: zastosować w algorytmie przelicznika filtry III rzędu (uwzględniające 1, 2 i 3 pochodną każdej ze współrzędnych celu), czy w pierwszym okresie zastosować filtry II rzędu, a następnie filtry III rzędu.

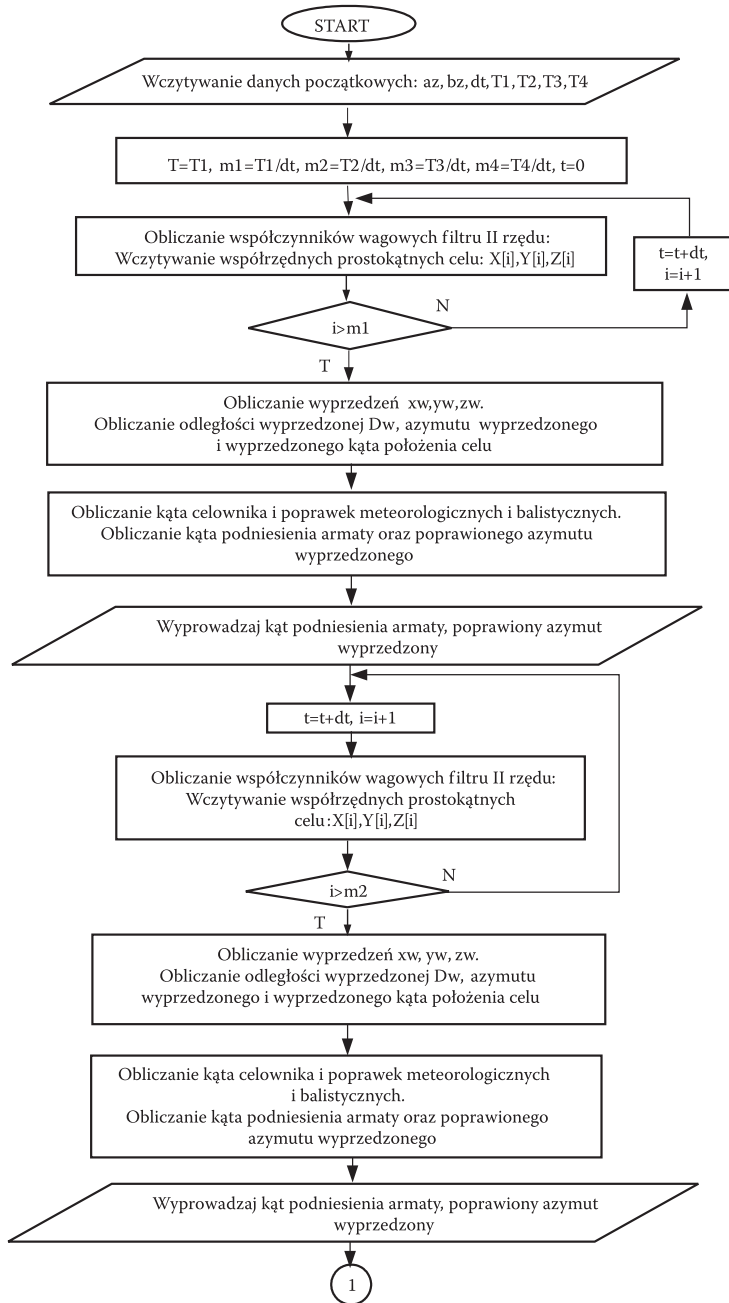
W celu rozwiązania powyższego problemu symulowano działanie przelicznika cyfrowego opracowanego dla obu przypadków, dla celu lecącego prostoliniowo i celu manewrującego. Dla celów symulacji przyjęto: $T_1 = 2$ s, $T_2 = 3$ s, $T_3 = 3$ s, $T_4 = 4$ s, $T_5 = 5$ s. Algorytm przelicznika opracowano dla 35 mm armaty Oerlikon z uwzględnieniem pełnych tabel balistycznych. Symulacje realizowano, wykorzystując, zakłócone losowymi błędami pomiarowymi, bieżące współrzędne celu lecącego prostoliniowo z prędkością 250 m/s na stałej wysokości równej 500 m (rys. 2.2) i w drugim przypadku celu manewrującego z przyspieszeniami (3÷4 g). Wyniki symulacji dla celu lecącego prostoliniowo przedstawiono na rysunkach 2.3-2.4.

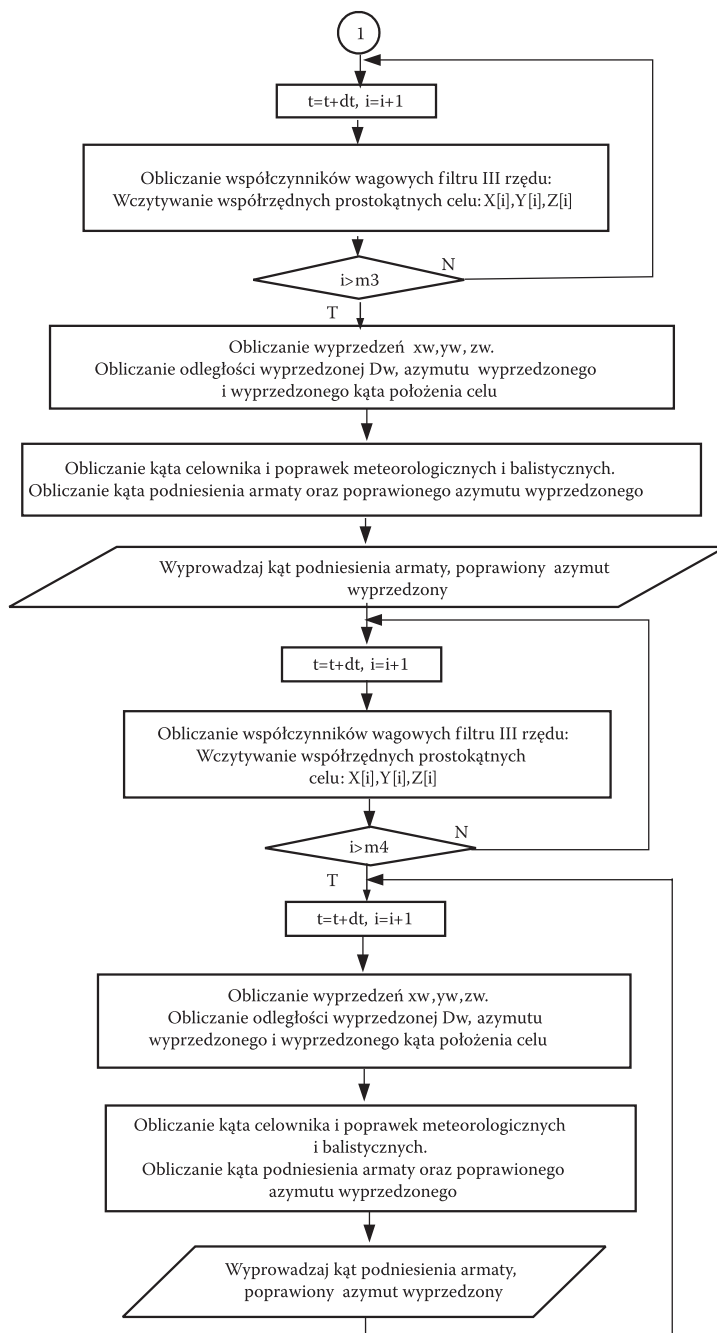
Dla celu manewrującego w dwóch płaszczyznach (rys. 2.5) wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 2.6-2.7.

Po przeprowadzeniu analizy wyników symulacji komputerowych przedstawionych na rysunkach 2.2-2.7 stwierdzono, że:

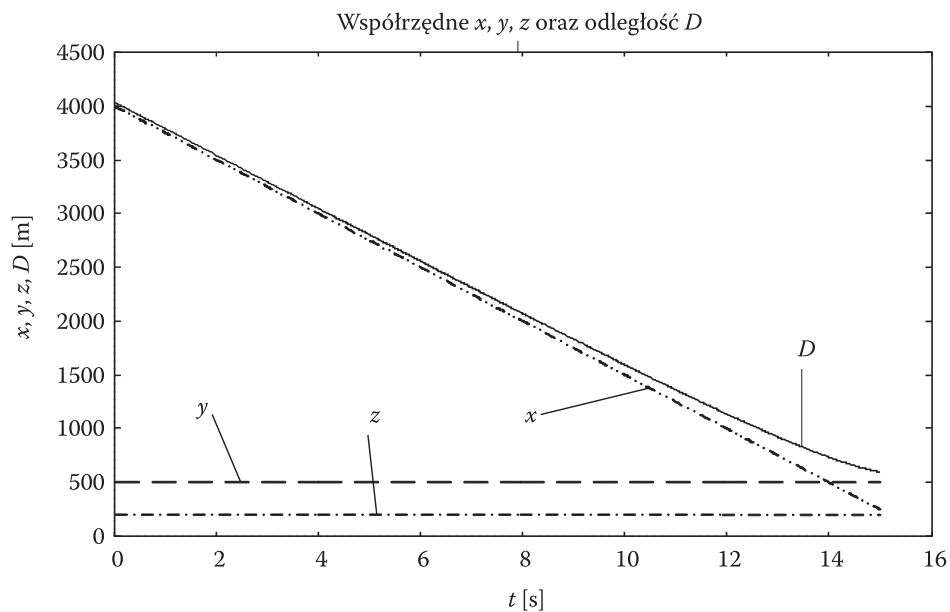
- przy strzelaniu do celu niemanewrującego najkorzystniejsze jest zastosowanie filtrów drugiego rzędu w całym okresie strzelania (mniejsze błędy nastaw działowych);
- przy strzelaniu do celu manewrującego w pierwszym okresie do czasu $t = 4$ s należy stosować filtry drugiego rzędu, a następnie trzeciego rzędu;

Algorytm wyliczania nastaw działowych dla zmiennego czasu obserwacji T

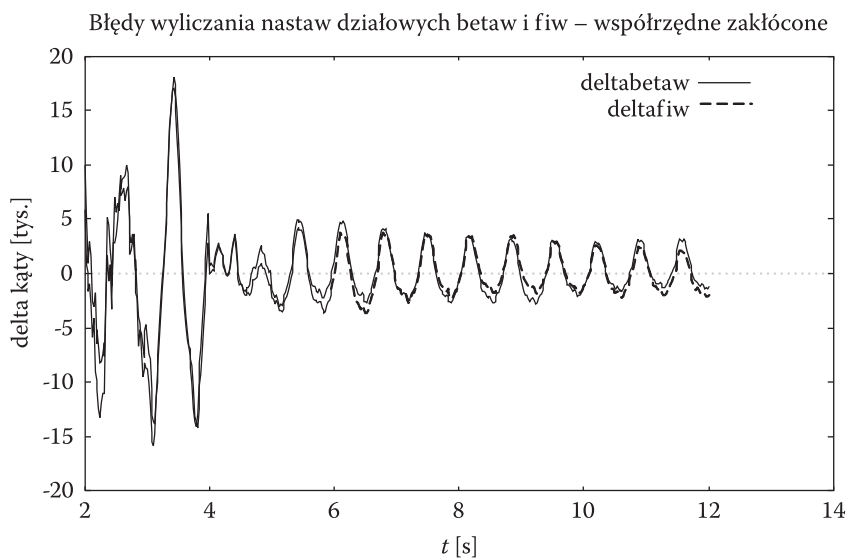




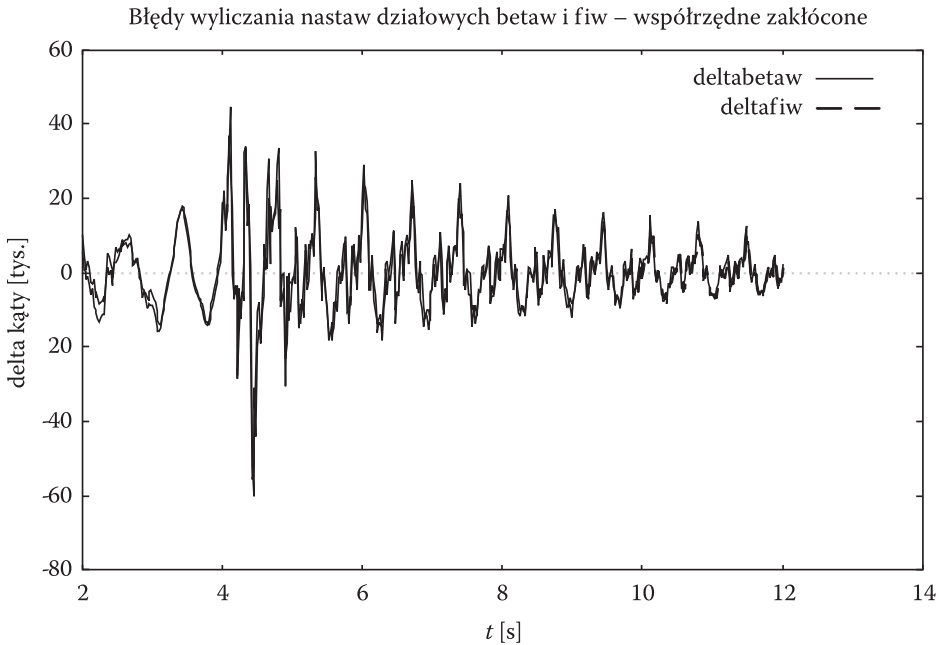
Rys. 2.1. Schemat blokowy algorytmu rozwiązania zadania trafienia dla zmiennych czasów obserwacji



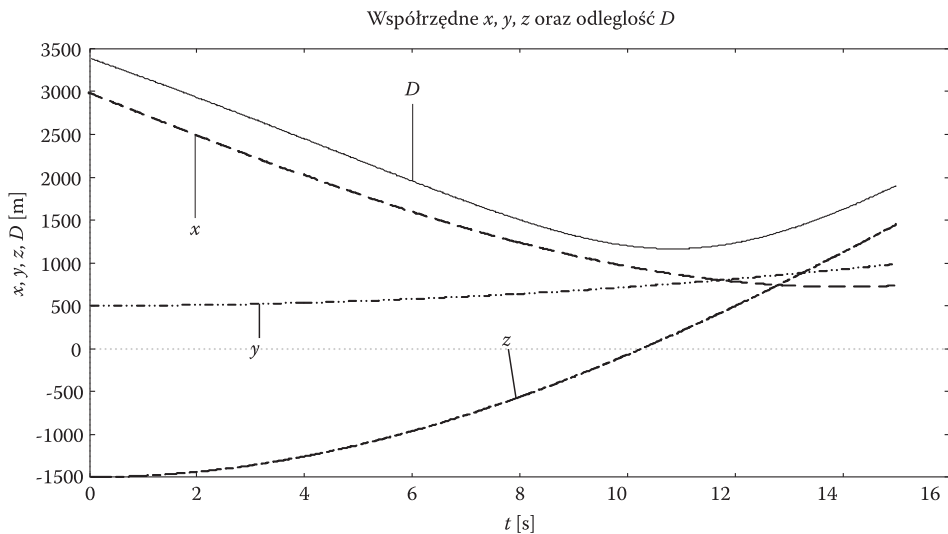
Rys. 2.2. Biejące współrzędne prostokątne dla lotu celu prostoliniowego ze stałą prędkością



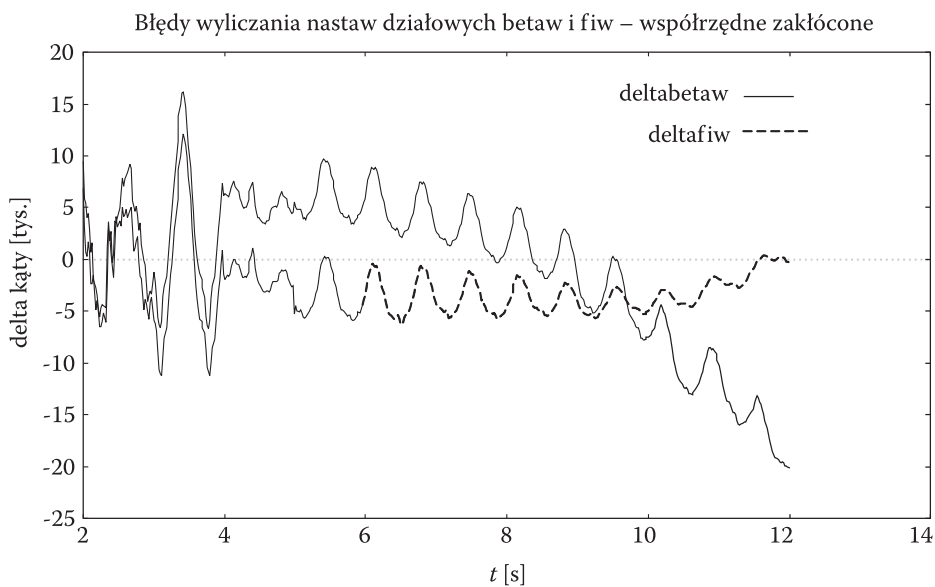
Rys. 2.3. Błędy wyznaczania nastaw działowych dla przypadku celu lecącego prostoliniowo i przy zastosowaniu w algorytmie filtrów drugiego rzędu dla różnych czasów obserwacji T



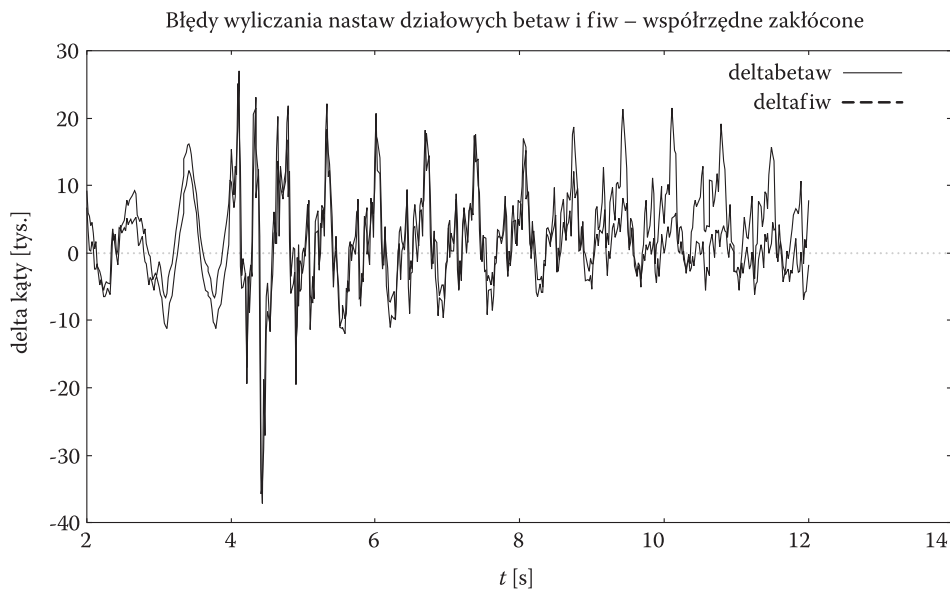
Rys. 2.4. Błędy wyznaczania nastaw działowych dla przypadku celu lecącego prostoliniowo i przy zastosowaniu w algorytmie filtrów drugiego rzędu, a następnie trzeciego rzędu dla różnych czasów obserwacji T



Rys. 2.5. Współrzędne prostokątne celu manewrującego w dwóch płaszczyznach ($\lambda_1 = 0,5$, $f_1 = 3,5$, $v_c = 250-340$, $n = 3,2$ g), $sgz_1 = 2,5$, $sgz_2 = 0,002$, $AZ = 3,85$, $BZ = 6,28$



Rys. 2.6. Błędy wyznaczania nastaw działowych dla przypadku celu manewrującego i przy zastosowaniu w algorytmie filtrów drugiego rzędu dla różnych czasów obserwacji T



Rys. 2.7. Błędy wyznaczania nastaw działowych dla przypadku celu manewrującego i przy zastosowaniu w algorytmie filtrów drugiego rzędu, a następnie trzeciego rzędu dla różnych czasów obserwacji T

- o włączaniu po czasie $t = 4$ s filtru drugiego lub trzeciego rzędu powinno się decydować na podstawie wyliczanej uśrednionej (w określonym czasie) wartości trzeciej pochodnej danej współrzędnej celu.

3. Wnioski

Wykonywane przez artylerię przeciwlotniczą zadania mają swoją specyfikę (m.in. duże prędkości celów). Powoduje to konieczność wprowadzania dużych kątów wyprzedzeń. Większość obecnie wykorzystywanych przeliczników do armat przeciwlotniczych bliskiego zasięgu opiera się na prostych hipotezach ruchu celów. Hipotezy te, w dobie szybkich celów manewrujących nie zdają egzaminu.

Konstruktorzy od wielu lat starają się wyposażyć przeciwlotnicze zestawy artyleryjskie w nowoczesne systemy kierowania ogniem (SKO). Systemy takie z całą pewnością powinny charakteryzować się dużą elastycznością, co w efekcie umożliwiłoby wyliczanie nastaw do strzelania z dużą dokładnością. Możliwość taka pojawiła się w momencie zastosowania w przelicznikach komputerów, które umożliwiają implementowanie różnych algorytmów.

Przedstawione w artykule wyniki symulacji komputerowych wykazały, że zastosowanie algorytmu zmiennego w czasie, który przełączałby się automatycznie w zależności od czasu śledzenia celu, daje możliwość opracowania elastycznego przelicznika.

Po przeprowadzeniu analizy wyników symulacji komputerowych przedstawionych na rysunkach 2.2-2.7 stwierdzono, że przy strzelaniu do celu niemanewrującego najkorzystniejsze jest zastosowanie filtrów drugiego rzędu w całym okresie strzelania (mniejsze błędy nastaw działowych niż przy zastosowaniu filtrów wyższego rzędu). Inaczej jest w przypadku celu manewrującego. Badania wykazały, że w tym przypadku najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie dwóch różnych typów filtrów (w pierwszym okresie czasu $t \leq 4$ s filtru drugiego rzędu, a następnie dla $t > 4$ s filtru trzeciego rzędu). Włączanie po upływie czasu $t = 4$ s filtru drugiego lub trzeciego rzędu powinno być realizowane na podstawie wyliczanej uśrednionej (w określonym czasie) wartości trzeciej pochodnej danej współrzędnej celu.

Artykuł wpłynął do redakcji 21.05.2007 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w styczniu 2008 r.

LITERATURA

- [1] W. BOROWCZYK, *Analiza dokładności rozwiązania zagadnienia trafienia dla przypadku pomiaru odległości do celu za pomocą dalmierza laserowego*, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna CRAAS, 2005, 142-155.
- [2] W. BOROWCZYK, *Analiza przydatności różnego rodzaju filtrów do wyznaczania wyprzedzeń współrzędnych celu oraz metody ich wyznaczania*, Biul. WAT, 54, 9, Warszawa, 2005.

- [3] W. BOROWCZYK, *Analiza wpływu rzędu zastosowanych filtrów cyfrowych na dokładność rozwiązania zagadnienia trafienia*, Biul. WAT, 54, 9, Warszawa, 2005.
- [4] W. BOROWCZYK, *Synteza optymalnego filtra liniowego spełniającego warunek minimum wariancji błędu losowego, przeznaczonego do wygładzania i predykcji*, Postępy Cybernetyki, 1988.
- [5] W. BOROWCZYK, *Wpływ przyjętej hipotezy ruchu celu na dokładność wyznaczenia nastaw działowych artylerii przeciwlotniczej*, Materiały Konferencji nt. Kierowanie ogniem naziemnych systemów obrony powietrznej (przeciwlotniczej), Koszalin–Wicko Morskie, 2000.
- [6] W. BOROWCZYK, A. WOCHNA, W. KACZMAREK, *Badanie wpływu czasu obserwacji i okresu dyskretyzacji na dokładność wyliczania nastaw działowych w armatach przeciwlotniczych*, Materiały III Międzynarodowej Konferencji Uzbrojenia nt. Naukowe aspekty techniki uzbrojenia, Waplewo, 2000.
- [7] W. BOROWCZYK, W. KACZMAREK, *Badanie wpływu poprawek na dokładność wyliczania nastaw działowych w oparciu o uproszczone tablice balistyczne*, Biul. WAT, 54, 9, Warszawa, 2005.
- [8] C. Z. KUZMIN, *Osnovy projektowaniya sistem cifrowoj obrabotki radiolokacjonnoj informacii*, Radio i Swiaź, Moskwa, 1986.
- [9] F. K. NIEUPOKOJEV, *Strielba zenitnymi raketami*, Wojennoje izdatelstwo, Moskwa, 1970.

W. BOROWCZYK, W. KACZMAREK

Analysis of calculation of gun-setting errors using time-variable algorithm

Abstract. The paper deals with the problems connected with sights for anti-aircraft artillery systems of a close range. Special attention was paid to a time-variable algorithm. This algorithm considers the second and third derivatives of current co-ordinates of a target. The authors developed computer programs and made a lot of computer simulations the results of which are presented here.

Keywords: anti-aircraft artillery systems, observation time, gun-setting errors, gun-setting

Universal Decimal Classification: 623.418.2