

Specjalizowany cyfrowy system predykcyjny z prostą hipotezą o ruchu celu

Wiesław Madej

Wydział Elektroniki i Informatyki
Politechnika Koszalińska
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, Polska
e-mail: wieslaw.madej@tu.koszalin.pl

Streszczenie

Specjalizowane cyfrowe systemy predykcyjne są niezbędnym elementem zautomatyzowanego systemu kierowania ogniem artylerii przeciwlotniczej. Stanowią one podstawowy podsystem, który realizuje zadania modułu balistycznego. Moduł ten odpowiada za wypracowanie odpowiednich nastaw do wykonania zadania ogniowego. W pracy przedstawiono algorytm obliczeń oraz niezbędne funkcje do prawidłowego działania specjalizowanego systemu predykcyjnego realizującego predykcję punktu wyprzedzonego dla małokalibrowej artylerii przeciwlotniczej. Algorytm ten może być zaimplementowany w komputerze przemysłowym, systemie mikroprocesorowym z procesorem sygnałowym lub w sterowniku programowalnym PLC, który posiada możliwość programowania w języku C.

Słowa kluczowe: moduł obliczeń balistycznych, system czasu rzeczywistego, system predykcyjny, przelicznik, warunki strzelania

Wstęp

Zadanie predykcji punktu wyprzedzonego należy do głównych zadań, jakie należy wykonać podczas przygotowywania danych do strzelania w artylerii przeciwlotniczej. Problem ten był dotychczas realizowany przez analogowe systemy predykcyjne oparte w większości na analogowych lampowych maszynach liczących. Systemy te stały się przestarzałe oraz bardzo zawodne. Dlatego powstała konieczność zaprojektowania nowych systemów predykcyjnych do istniejących zestawów przeciwlotniczych, co stanowi również podstawę do testowania rozwiązań umożliwiających projektowanie systemów predykcyjnych dla nowo powstających zestawów. Zagadnienia związane z projektowaniem artyleryjskich systemów predykcyjnych pojawiają się w literaturze od kilku lat. Różne aspekty związane z projektowaniem specjalizowanych cyfrowych systemów predykcyjnych przedstawione są w pracach [1–7]. W pracy [1] autor przedstawia wpływ braku uwzględnienia poprawek na dokładność pracy specjalizowanego systemu predykcyjnego. Prace [2, 3] dotyczą analizy konieczności zastosowania odpowiednich filtrów niezbędnych do poprawnego określenia prędkości wypracowania prawidłowych wyprzedzeń. W pracach [4, 5] autorzy omawiają wpływ zastosowania algorytmów o zmiennym okresie próbkowania i przyspieszonym algorytmie obliczeń. Jednakże w tych pracach nie przedstawiono konkretnych funkcji jakie powinny być uwzględnione w algorytmie obliczeń w celu dokładnego odwzorowania toru lotu pocisku do celu, a co za tym idzie poprawnego rozwiązania zagadnienia trafienia. Próbę przedstawienia takich funkcji zawarto w pracy [6], jednak autorzy rozpatrując pełny układ równań ruchu pocisku stwierdzają, że czas potrzebny do obliczeń jest zbyt długi aby można było zrealizować taki algorytm w komputerach przemysłowych lub sterownikach

programowalnych. W związku z powyższym powstała konieczność opracowania takich funkcji, które będą w sposób dokładny odzwierciedlać tor lotu pocisku, co jednocześnie wpłynie na poprawność rozwiązania zagadnienia trafienia, a także da możliwość zrealizowania funkcji i algorytmu w komputerze przemysłowym, sterowniku programowalnym PLC lub systemie mikroprocesorowym z procesorem sygnałowym.

1. Istota zadania predykcji punktu wyprzedzonego i ogólny algorytm jego rozwiązania

Strzelanie do celów powietrznych poruszających się w przestrzeni z dużą prędkością i posiadających możliwości manewrowe wymaga uwzględnienia wyprzedzenia odpowiadającego przesunięciu się celu w czasie lotu pocisku do celu. Armatę wcelowuje się nie w punkt A_s (rys. 1), gdzie cel znajduje się w momencie wystrzału, lecz w pewien punkt A_w znajdujący się na przyszłej drodze celu, w którym według obliczeń pocisk powinien spotkać się z celem. Punkt ten nazywa się punktem wyprzedzonym. Aby skierować pocisk w punkt wyprzedzony, należy znać jego geometryczne współrzędne, na podstawie których określa się nastawy na działa.

W celu rozwiązania zadania spotkania należy znać bieżące współrzędne celu, wielkość i kierunek wektora prędkości celu, a także charakter ruchu celu w czasie lotu pocisku do punktu wyprzedzonego.

Bieżące współrzędne celu określa się w wyniku śledzenia go przez stację radiolokacyjną lub przyrządy optyczne. Określenie wielkości i kierunku wektora prędkości celu, rozwiązanie zadania spotkania oraz określenie nastaw na działa wykonuje w sposób ciągły przelicznik. Wypracowane nastawy – azymut wyprzedzony i kąt podniesienia są przekazywane w sposób ciągły na działa, przez co skierowuje się je w punkt wyprzedzony.

1.1. Hipotezy o ruchu celu

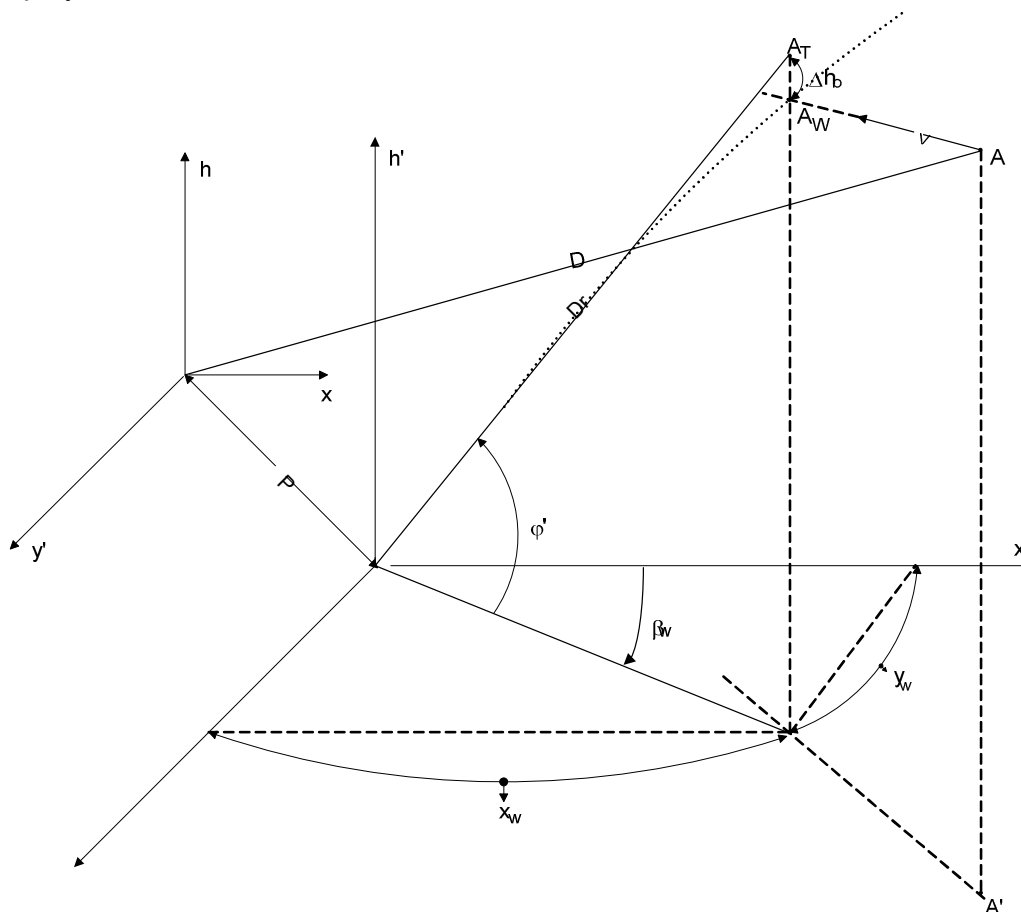
Do rozwiązania zadania spotkania pocisku z celem w określonym punkcie przestrzeni oraz w określonym momencie czasu niezbędna jest znajomość praw ruchu obydwu ciał i możliwość kierowania jednym z nich, w naszym przypadku prawem ruchu pocisku. Prawo ruchu pocisku zostało opracowane przez balistykę i możemy z dowolną dokładnością znać drogę ruchu pocisku, jego prędkość w różnych punktach toru, czas lotu do różnych punktów w przestrzeni. Znany jest nam także wpływ balistycznych i meteorologicznych warunków na lot pocisku i jego położenie w funkcji czasu. Dlatego po odpowiednim wycelowaniu działa można otrzymać pożądaną trajektorię pocisku przechodzącą przez punkt wyprzedzony. Prawo ruchu celu dla danego wystrzału może być ustalone tylko do punktu w przestrzeni, w którym cel znajduje się w momencie oddania wystrzału – punktu A_s , przy ciągłym określaniu bieżących współrzędnych i czynników ruchu celu. Przy dalszym ruchu, to znaczy w czasie wyprzedzonym na odcinku $A_s A_w$ ustalone prawo ruchu celu może być naruszone, czy to z woli pilota (w postaci manewru), czy też z przyczyn od jego woli niezależnych. Możemy jednak zakładać, że cel w czasie wyprzedzenia zachowa poprzedni charakter ruchu. Im czas wyprzedzenia będzie mniejszy, tym bardziej prawdopodobne, że charakter ruchu celu w tym czasie będzie mniej się różnił od charakteru jego ruchu do momentu wystrzału. Z powyższego wynika konieczność zakładania pewnych hipotez ruchu celu w czasie wyprzedzenia.

Możliwe są różne hipotezy o ruchu celu, na potrzeby tej pracy zakłada się prostą hipotezę, która brzmi: „W czasie wyprzedzenia cel porusza się prostoliniowo, jednostajnie, w dowolnej płaszczyźnie”.

1.2. Istota zadania predykcji punktu wyprzedzonego

Predykcja punktu wyprzedzonego (rozwiązanie zadania spotkania) jest zasadniczym etapem przygotowania wystrzału, w czasie którego określa się geometryczne współrzędne punktu wyprzedzonego A_w , tj. punktu, w którym według obliczeń powinno nastąpić spotkanie się pocisku z celem. Skierowanie pocisku do punktu A_s nie ma sensu, ponieważ w czasie lotu pocisku cel przesunie się z tego punktu o odległość $v_c \cdot \tau$ (τ – czas lotu pocisku do punktu wyprzedzonego) i spotkanie pocisku z celem nie nastąpi. Z tego wynika, że aby nastąpiło spotkanie pocisku z celem, należy skierować pocisk do punktu A_w leżącego na kursie celu i oddalonego od punktu A_s o wartość $v_c \cdot \tau$.

Istota rozwiązania zadania spotkania pocisku z celem polega na uzgodnieniu w czasie dróg celu i pocisku, przebywanych z różnymi prędkościami (stała celu i zmienna pocisku), dających na przecięciu się punkt wyprzedzony A_w . Samo rozwiązanie polega na określeniu geometrycznych współrzędnych punktu wyprzedzonego w dowolnym układzie współrzędnych.



Rys. 1. Istota predykcji punktu wyprzedzonego
gdzie: x, y, z – układ współrzędnych związany z urządzeniem telemetrycznym
 x', y', z' – układ współrzędnych związany z obiektem sterowania

P – wektor paralaksy

Δh_b – obniżenie balistyczne

A_w – predykowany punkt wyprzedzony

1.2.1 Predykcja punktu wyprzedzonego

W przypadku prostej hipotezy o ruchu celu, tzn. że cel w czasie wyprzedzenia porusza się prostoliniowo, jednostajnie i w dowolnej płaszczyźnie, gdy znane są jego współrzędne prostokątne x , y , h i składowe prędkości v_x , v_y , v_h należy określić współrzędne punktu $A_w(\beta_w, D_w, \varepsilon_w)$.

Wyznaczanie współrzędnych punktu wyprzedzonego realizuje się według następującego algorytmu:

1. Oblicza się odległość poziomą celu z zależności

$$d_p = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1)$$

2. Oblicza się odległość rzeczywistą celu z zależności

$$D = \sqrt{d_p^2 + h^2} \quad (2)$$

3. Oblicza się czas lotu pocisku do celu według tabel strzelniczych jako funkcję balistyczną

$$\tau = f(D_T, h_w) \quad (3)$$

W pierwszym przybliżeniu jako odległość pozorną D_T traktuje się odległość rzeczywistą D , natomiast jako wysokość wyprzedzoną h_w traktuje się wysokość rzeczywistą h .

4. Oblicza się współrzędne wyprzedzone według zależności

$$\begin{aligned} x_w &= x + v_x \cdot \tau \\ y_w &= y + v_y \cdot \tau \\ h_w &= h + v_h \cdot \tau \end{aligned} \quad (4)$$

5. Oblicza się wysokość pozorną h_T według zależności

$$h_T = h_w + \Delta h_b \quad (5)$$

gdzie Δh_b – obniżenie balistyczne.

6. Oblicza się odległość wyprzedzoną poziomą d_{pw} i pozorną D_T celu według zależności

$$\begin{aligned} d_{pw} &= \sqrt{x_w^2 + y_w^2} \\ D_T &= \sqrt{d_{pw}^2 + h_T^2} \end{aligned} \quad (6)$$

7. Oblicza się kąty azymutu β_w i podniesienia φ według zależności

$$\begin{aligned} \beta_w &= \arcsin \frac{x_w}{d_{pw}} \\ \varphi &= \arcsin \frac{h_T}{D_T} \end{aligned} \quad (7)$$

8. Powraca się do punktu 3.

1.3. Tabele strzelnicze i funkcje balistyczne

Tabele strzelnicze do armaty przeciwlotniczej stanowią podstawę do teoretycznych obliczeń podczas rozwiązywania problemów dotyczących krzywej balistycznej pocisku. Sporządzone są na podstawie strzelań doświadczalnych oraz częściowo teoretycznych

obliczeń. W pracy wykorzystano tabele dla samoczynnej armaty przeciwlotniczej S-60, które zawierają stabilizowane dane liczbowe trajektorii pocisku artyleryjskiego wystrzelanego ze średnio zużytej lufy w tzw. tabelarycznych warunkach meteorologicznych i balistycznych.

Wpływ odchyłek od warunków tabelarycznych na trajektorię pocisku zapisany jest w formie tabel odchyłek i poprawek współrzędnych.

Do istotnych czynników decydujących o ruchu pocisku, a więc czynników, które należy uwzględnić przy strzelaniu należą:

- prędkość początkowa v_0
- temperatura ładunku t_τ
- rodzaj pocisku
- gęstość powietrza G_p
- temperatura powietrza t_p
- składowe wektora wiatru (wzdłużna i boczna) w_d, w_z
- derywacja pocisku z

Ponadto tabele strzelnicze zawierają informacje o rozrzucie naturalnym pozwalające obliczać prawdopodobieństwo trafienia w cel, a przy tym charakteryzujące celność broni.

Na podstawie tabel strzelniczych można odtworzyć przebieg dowolnej z następujących wielkości w funkcji jednej z nich przy potraktowaniu trzeciej jako parametru stałego:

- odległość pozioma D_p
- odległość rzeczywista D
- kąt położenia ε
- kąt celownika α
- zboczenie (derywacja) z
- czas lotu pocisku τ
- kąt nachylenia stycznej ω
- prędkość pocisku v
- kąt rzutu (podniesienia lufy) φ
- odchyłka donośności ΔD_p
- odchyłka wysokości ΔH

Ponadto pośrednio wyznaczyć można przebiegi:

- obniżenia balistycznego Δh_b
- odległości pozornej D_T

Odległość pozorna D_T to odcinek pomiędzy rzutem dowolnego punktu trajektorii pocisku A_T na styczną do trajektorii w punkcie wylotu i punktem wylotu.

Obniżenie balistyczne Δh_b to odcinek pomiędzy dowolnym punktem trajektorii pocisku i odpowiadającym mu punktem pozornym A_T .

Powyższe dwie wielkości są szczególnie przydatne przy budowaniu algorytmu przelicznika artyleryjskiego ze względu na efektywność obliczeń w przeliczniku.

Do sporządzenia tabel strzelniczych jako zmienną niezależną przyjęto odległość poziomą z krokiem 500 m, a jako parametr stały przyjęto wysokość z krokiem 500 m. Czas lotu pocisku podawany jest z dokładnością jednej dziesiątej sekundy i z krokiem do dwóch sekund.

Ze względu na zbyt duży krok i za małą dokładność czasu lotu pocisku nie można tabel strzelniczych w nieprzetworzonej postaci wpisać w pamięć komputera. Interpolacja liniowa

nie może być zastosowana z powodu dużej nieliniowości funkcji, natomiast interpolacja uwzględniająca nieliniowości wymagałaby zawarcia w algorytmie przelicznika dużej liczby funkcji pomocniczych.

Przy założeniu, że algorytmiczny błąd wyznaczenia punktu wyprzedzonego nie powinien być większy od jednego uchylenia środkowego rozrzutu naturalnego na średnich odległościach strzelania tj. ok. 1,5 m, to dokładność czasu lotu pocisku przy prędkości celu 300 m/s i kącie kursowym 45° nie powinna być gorsza niż 0,01 s.

Taką właśnie dokładność wyliczania czasu lotu pocisku przyjmuje się w algorytmie przelicznika cyfrowego.

Ponieważ współrzędne predykowanego punktu wyprzedzonego są funkcjami czasu lotu pocisku, to dokładności ich wyznaczania są różniczkami zupełnymi ze względu na współrzędne celu oraz jego wektor prędkości.

Istnieje wobec tego konieczność aproksymacji tabel strzelniczych funkcjami matematycznymi odpowiednio do przyjętego algorytmu predykcji punktu wyprzedzonego. Funkcje te powinny być w miarę proste z powodu ograniczonego czasu obliczeń, a przy tym zapewniające niezbędną dokładność wyznaczania punktu wyprzedzonego.

W przedstawionym w podpunkcie 3.1 algorytmie obliczeń do wyliczania bieżącego czasu lotu pocisku stosuje się pętle sprzężeń z odpowiednimi funkcjami balistycznymi w pętlach tych sprzężeń.

Zakłada się następującą postać tych funkcji:

$$f_1(\tau, W) = D_{T_0}^* + \Delta D_T^*(v_0) \cdot \Delta v_0[\%] - \Delta D_T^*(G_p) \cdot \Delta G_p[\%] + \Delta D_T^*(W_d) \cdot W_d[m/s] \quad (8)$$

gdzie:

$\Delta D_{T_0}^*$ - teoretyczna odległość punktu pozornego A_T przy tabelarycznych warunkach strzelania;

$\Delta D_T^*(v_0)$ - zmiana odległości pozornej na 1% zmiany prędkości początkowej;

$\Delta v_0[\%]$ - procentowa odchyłka prędkości początkowej;

$\Delta D_T^*(G_p)$ - zmiana odległości pozornej na 1% zmiany gęstości powietrza;

$\Delta G_p[\%]$ - procentowa odchyłka gęstości powietrza;

$\Delta D_T^*(W_d)$ - zmiana odległości pozornej na 1m/s składowej wzdłużnej wiatru;

$W_d[m/s]$ - wartość składowej wzdłużnej wiatru;

$$f_2(\tau, W) = \Delta h_{b_0} + \Delta h_b(W_d) \cdot W_d[m/s] \quad (9)$$

gdzie:

Δh_{b_0} - teoretyczna wartość obniżenia balistycznego przy tabelarycznych warunkach strzelania;

$\Delta h_b(W_d)$ - zmiana obniżenia balistycznego na 1m/s składowej wzdłużnej wiatru;

$$f_3(\tau, W, \beta_w) = \Delta \beta_d + \Delta \beta(W_b) \cdot W_b[m/s] \quad (10)$$

gdzie:

$\Delta \beta_d$ - poprawka azymutu wyprzedzonego ze względu na derywację pocisku;

$\Delta \beta(W_b)$ - zmiana azymutu wyprzedzonego na 1m/s składowej bocznej wiatru;

$W_b[m/s]$ - wartość składowej bocznej wiatru.

$$f_4(\tau, W, \beta_w) = 0 \quad (11)$$

Funkcja jest zbiorem pustym przy założeniu, że rozpozniowanie armaty jest do pominięcia. Nigdzie nie są publikowane konkretne wyrażenia matematyczne reprezentujące powyższe funkcje.

Przedstawione w niniejszej pracy funkcje aproksymują tabele strzelnicze z dokładnością nie gorszą niż 0,3% czasu lotu pocisku przy wysokości do 1500 m i nie gorszą niż 0,5% czasu lotu pocisku przy wysokości większej niż 3000 m.

Uwzględniając fakt, że czas lotu pocisku podawany w tabelach strzelniczych jest zaokrąglany do 0,1[s] stwierdzić można iż wspomniane wyżej funkcje gwarantują uzyskanie wymaganej dokładności predykcji punktu wyprzedzonego. Nie przewiduje się uwzględniania w przeliczniku odchyłki ciężaru pocisku ze względu na mało znaczący wpływ w strefie ostrzału. Odchyłkę temperatury powietrza uwzględnić można pośrednio poprzez współczynnik liczbowy, jako dodatkową odchyłkę gęstości powietrza.

Algorytm pracy przelicznika powinien być tak zaprojektowany aby umożliwiał wyliczanie i przekazywanie nastaw działowych w czasie rzeczywistym, z częstotliwością nie mniejszą niż 50 punktów na sekundę.

Równania matematyczne algorytmu przelicznika nie mogą posiadać punktów osobliwych nawet pierwszego rodzaju, w przedziale możliwych wartości zmiennych i parametrów.

Ponieważ meteorologiczne odchyłki od tabelarycznych warunków strzelania zależą od wysokości celu dlatego też do przelicznika powinno wprowadzać się podczas przygotowania wstępnego niezbędne dane dla różnych wysokości, a w trakcie strzelania system powinien samoczynnie wybierać odpowiednie poprawki.

Ze względów praktycznych najczęstszym sposobem określania odchyłki początkowej prędkości pocisku jest jej obliczenie na podstawie wydłużenia komory naboju (Δλ) lub liczby strzałów (N).

Funkcje odchyłki początkowej prędkości pocisku Δv₀₁(Δλ) lub Δv₀₁(N) w postaci tabelarycznej są dostępne w literaturze.

Celowe więc jest wpisanie w pamięć komputera kompletu tabel oraz algorytmu obliczania na ich podstawie sumarycznej odchyłki prędkości początkowej pocisku od tabelarycznej.

$$\Delta v_{0sum} = \Delta v_{01} + 0,1 \cdot (t_{\tau} - 15^{\circ} C) [\%] \quad (12)$$

Podobnie sumaryczna balistyczna odchyłka gęstości powietrza uwzględniana w przeliczniku jest sumą kilku składowych:

$$\Delta G_{sum} = \Delta G_p(H) + 0,07 \cdot \Delta t_p(H) + 0,01 \cdot (H_{SM} - H_{SO}) + \Delta G_K [\%] \quad (13)$$

gdzie:

H_{SM} - wysokość stacji meteorologicznej npm.

H_{SO} - wysokość stanowiska ogniowego npm.

ΔG_K - poprawka ze względu na rodzaj pocisku

Δt_p(H) - odchyłka temperatury powietrza na danej wysokości [°C]

ΔG_p(H) - odchyłka gęstości powietrza na danej wysokości [°C]

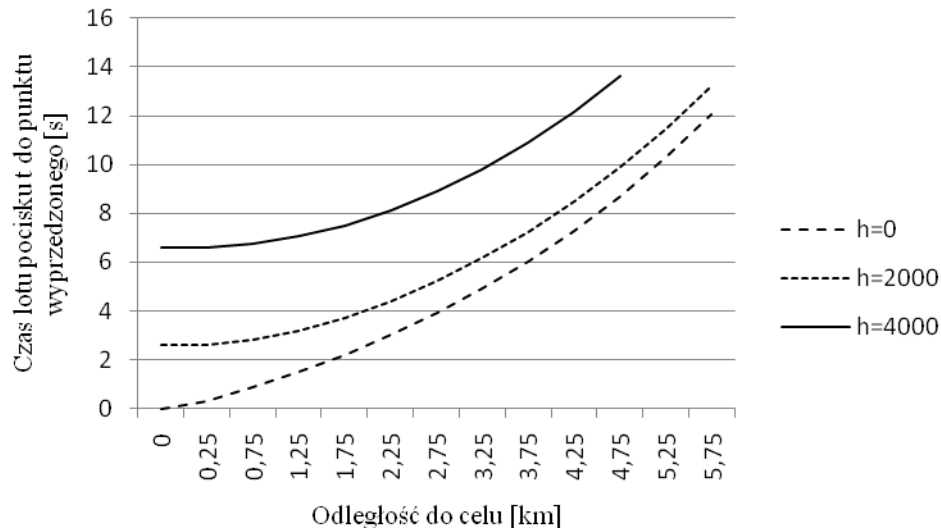
2. Funkcje balistyczne.

Podczas pracy sterownik cyfrowy wyznacza następujące funkcje balistyczne:

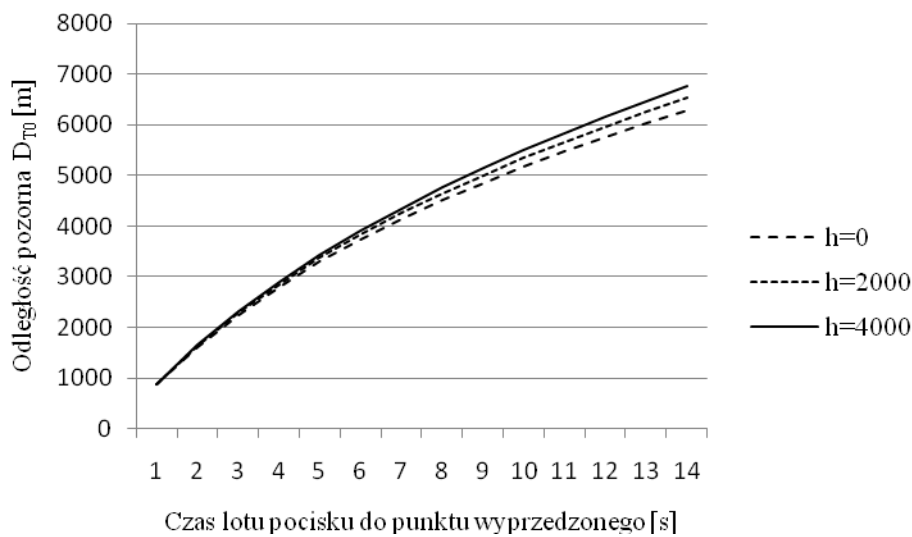
- ✓ czas lotu pocisku t do punktu wyprzedzonego w zależności od odległości i wysokości (rys. 2), jako wynik iteracji,

- ✓ odległość pozorną D_{T0} – rys. 3 – według zależności:

$$D_{T0} = \frac{V_0 \cdot \tau}{1 + \frac{V_0 \cdot \tau}{10^4 + 0,32 \cdot h} - \frac{\tau^2}{V_0}} \quad (16)$$



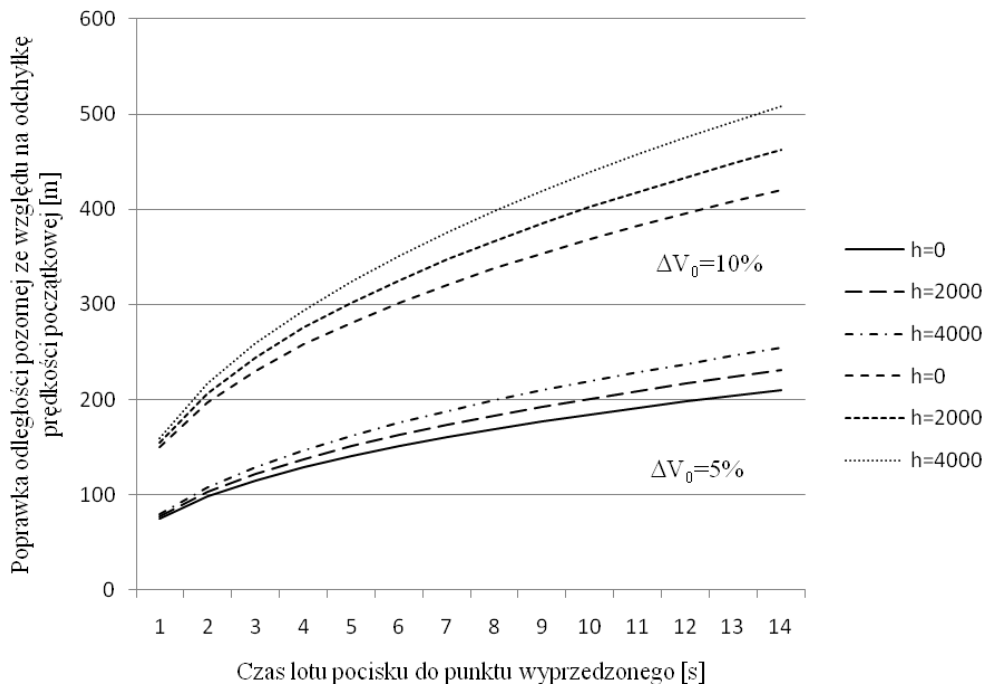
Rys. 2. Czas lotu pocisku t do punktu wyprzedzonego w zależności od odległości i wysokości



Rys. 3. Odległość pozorną D_{T0} dla różnych wysokości

- ✓ poprawkę odległości pozorną ze względu na odchyłkę prędkości początkowej $\Delta D_T(\Delta v_0)$ – rys. 4 – według zależności:

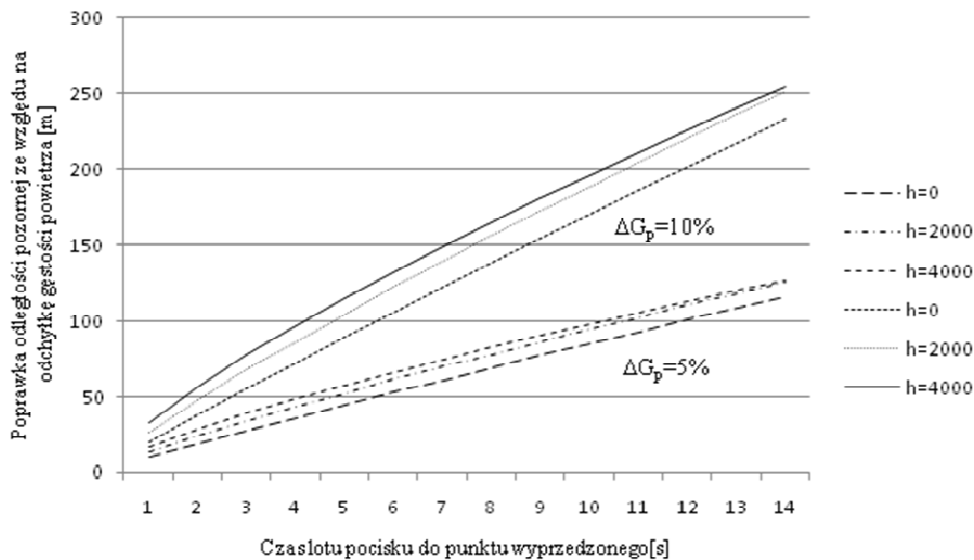
$$\Delta D_T(\Delta v_0) = \left(15 + \frac{10^{-3}}{4} \cdot h \right) \cdot \tau^{(0,39 - 0,012 \cdot 10^{-3} \cdot h)} \cdot \Delta v_0 \quad (17)$$



Rys. 4. Poprawka odległości pozornej ze względu na odchyłkę prędkości początkowej $\Delta D_T(\Delta V_0)$

- ✓ poprawkę odległości pozornej ze względu na odchyłkę gęstości powietrza $\Delta D_T(\Delta G_p)$ – rys. 5 – według zależności:

$$\Delta D_T(\Delta G_p) = \left(2 + \frac{10^{-3}}{3} \cdot h \right) \cdot \tau^{(0,39 - 0,04 \cdot 10^{-3} \cdot h)} \cdot \Delta G_p \quad (18)$$



Rys. 5. Poprawka odległości pozornej ze względu na odchyłkę gęstości powietrza $\Delta D_T(\Delta G_p)$

- ✓ poprawkę odległości pozornej ze względu na składową wzdłużną wiatru $\Delta D_T(W_d)$ – rys. 6 – zgodnie z zależnością:

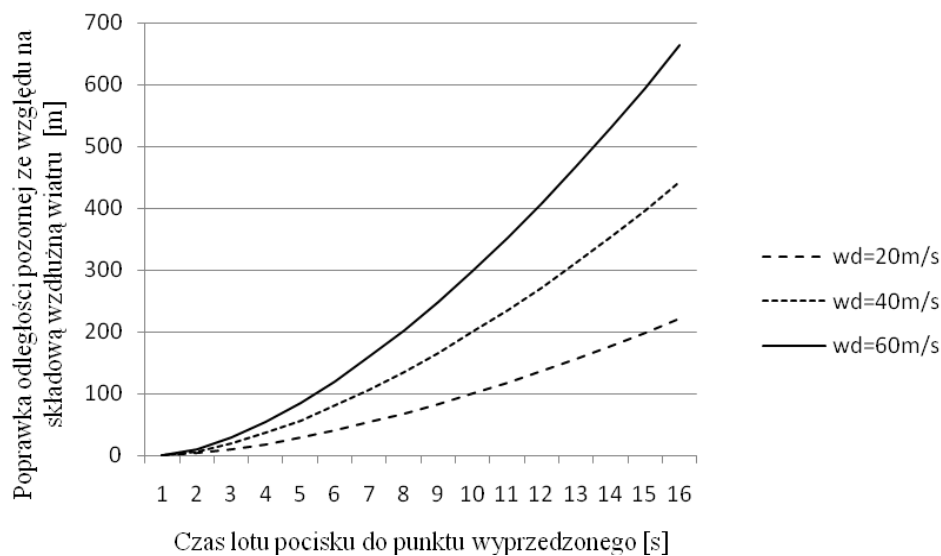
$$\Delta D_T(W_d) = \frac{0,1}{\cos \varphi} \cdot (1,65 - 0,076 \cdot 10^{-3} \cdot h) \cdot \tau^{1,55} \cdot w_d \quad (19)$$

- ✓ przewyższenie balistyczne Δh_{b0} – rys. 7 – zgodnie z zależnością:

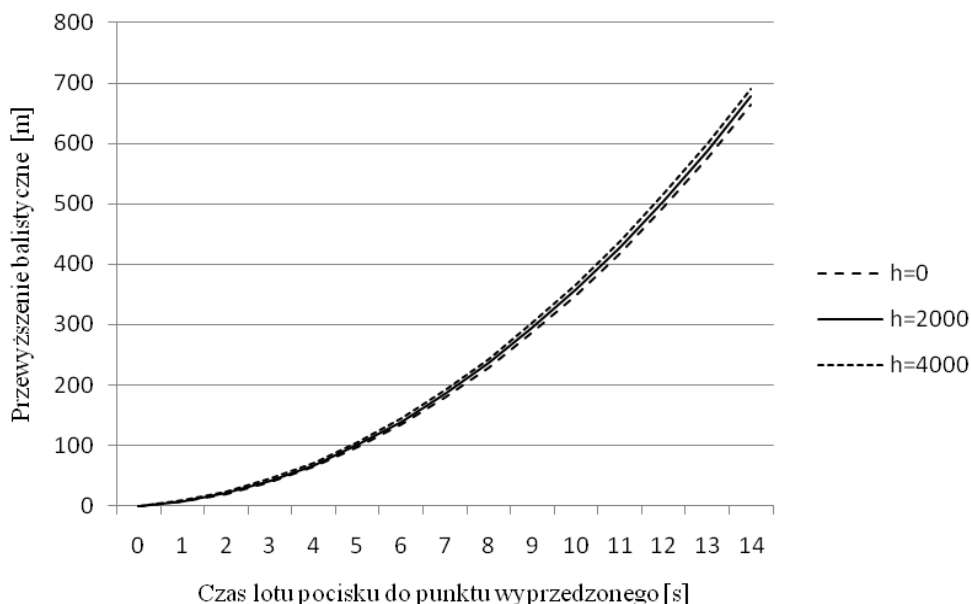
$$\Delta h_{b0} = (3,5 + 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot h) \cdot \tau + \pi \cdot \tau^2 \quad (20)$$

- ✓ poprawkę wysokości ze względu na składową wzdłużną wiatru Δh_{bw} – rys. 8 – według zależności:

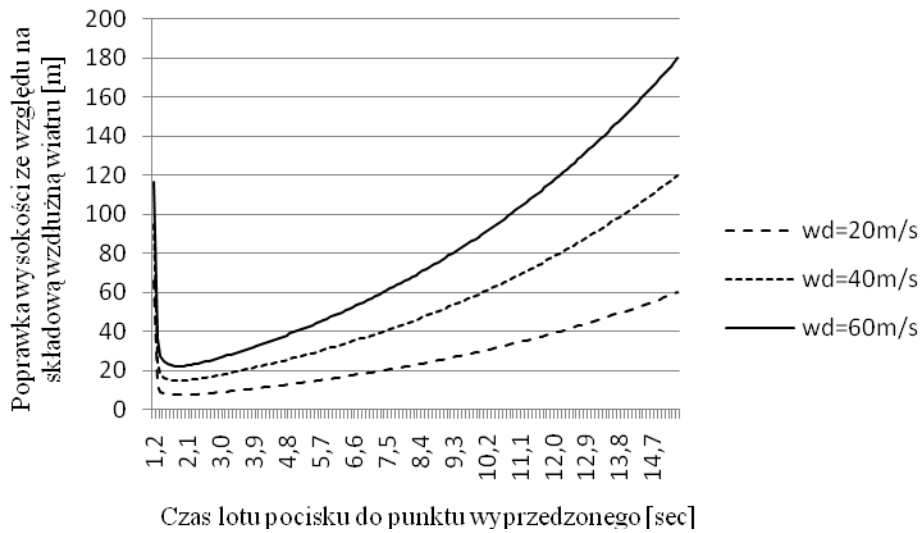
$$\Delta h_{bw}(W_d) = \Delta D_T(W_d) \cdot \sin \varphi \quad (21)$$



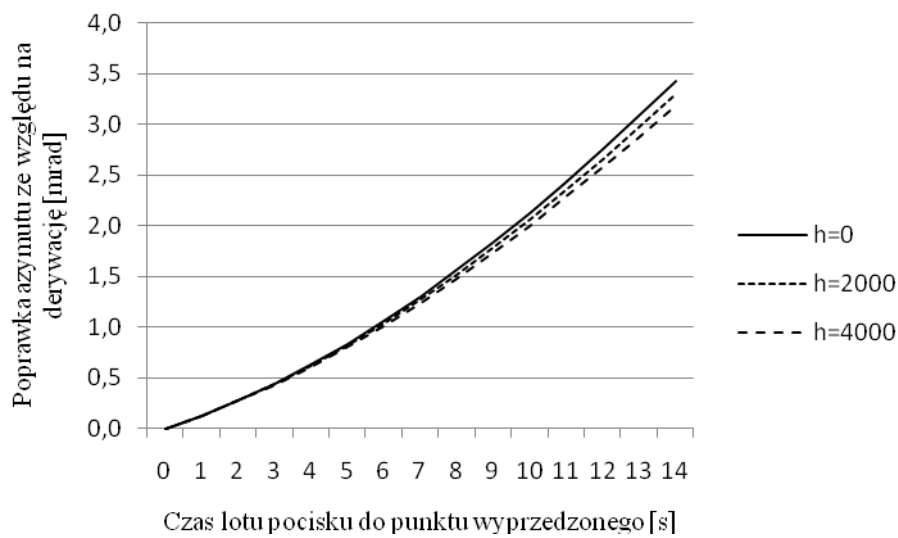
Rys. 6. Poprawka odległości pozornej ze względu na składową wzdłużną wiatru $\Delta D_T(W_d)$



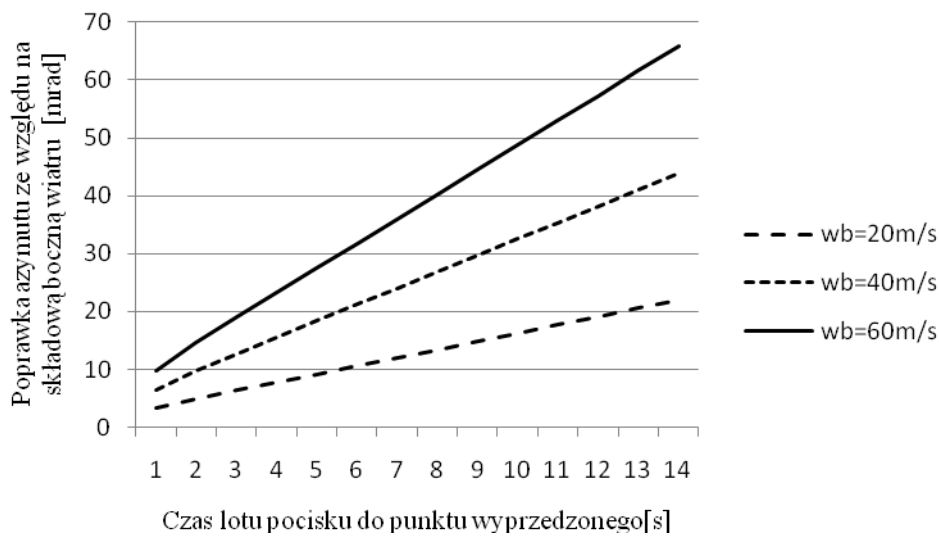
Rys. 7. Przewyższenie balistyczne Δh_{b0} dla różnych wysokości



Rys. 8. Poprawka wysokości ze względu na składową wzdłużną wiatru Δh_{bw}



Rys. 9. Poprawka azymutu ze względu na derywację δ_{β_d} dla różnych wysokości



Rys. 10. Poprawka azymutu ze względu na składową boczną wiatru δ_{β_w}

- ✓ poprawkę azymutu ze względu na derywację $\delta_{\beta d}$ – rys. 9 – z zależności:

$$\delta_{\beta d} = \frac{110}{D_T} \cdot \tau^2 \quad (22)$$

- ✓ poprawkę azymutu ze względu na składową boczną wiatru $\delta_{\beta w}$ – rys. 10 – z zależności:

$$\delta_{\beta w} = \frac{12,4 + \frac{130}{\cos \varphi}}{D_T} \cdot \tau^{1,47} \cdot W_b \quad (23)$$

3. Algorytm predykcji punktu wyprzedzonego

3.1. Procedura obliczeń

Nastawy działowe w sterowniku cyfrowym obliczane są przy założeniu prostoliniowego ruchu celu w dowolnej płaszczyźnie ze stałą prędkością. W ciągu trzech pierwszych sekund pracy sterownika realizowane jest tylko pobieranie danych wejściowych oraz wygładzanie współrzędnych prostokątnych celu i obliczanie składowych prędkości celu. Następnie włącza się pełny algorytm pracy sterownika.

Algorytm obliczeń jest następujący:

1. Pobierz dane wejściowe: x , y , h
2. Oblicz wygładzone współrzędne prostokątne celu x_c , y_c , h_c
3. Oblicz składowe prędkości celu v_x , v_y , v_h oraz prędkość celu v_c
4. Oblicz odchyłkę gęstości powietrza ΔG_p
5. Oblicz prędkość i azymut wiatru dla punktu wyprzedzonego i oblicz składowe wzdłużną W_d i boczną W_b wiatru z zależności:

$$W_d = W \cdot \cos(2\pi + (\beta_w - \beta_t))$$

$$W_b = W \cdot \sin(2\pi + (\beta_w - \beta_t))$$

gdzie: W - prędkość wiatru

β_w - azymut wiatru [rad],

β_t - azymut punktu wyprzedzonego [rad],

6. Podstaw $\tau = \tau + 0,001 \cdot \Delta d$

gdzie Δd – różnica obliczana w punkcie 19. W chwili startu algorytmu $\Delta d = 1$

7. Oblicz współrzędne punktu wyprzedzonego x_w , y_w , h_w z zależności:

$$x_w = x_c + P_x + v_x \cdot (\tau + t_{op})$$

$$y_w = y_c + P_y + v_y \cdot (\tau + t_{op})$$

$$h_w = h_c + P_h + v_h \cdot (\tau + t_{op})$$

gdzie t_{op} – czas opóźnienia wprowadzany przez filtry wygładzające

P_x , P_y , P_h – współczynniki wektora paralaksy

8. Oblicz przewyższenie balistyczne Δh_{b0} (20) oraz poprawkę wysokości na składową wzdłużną wiatru Δh_{bw} (21)

9. Oblicz wysokość punktu pozornego jako sumę:

$$h_T = h_w + \Delta h_{b0} + \Delta h_{bw}$$

10. Oblicz odległość poziomą punktu wyprzedzonego D_{pw} z zależności:

$$D_{pw} = \sqrt{x_w^2 + y_w^2}$$

11. Oblicz kąt podniesienia punktu pozornego φ_p [rad] z zależności: $\varphi_p = \arctg \frac{h_T}{D_{pw}}$

12. Oblicz azymut punktu wyprzedzonego β_w [rad] jako funkcję $\beta_w=f(x_w, y_w)$

13. Oblicz odległość punktu pozornego $D_T = \sqrt{D_{pw}^2 + h_T^2}$

14. Oblicz odległość pozorną D_{T0} jako funkcję balistyczną (16)

15. Oblicz poprawkę $\Delta D_T(\Delta v_0)$ na odległość pozorną ze względu na odchyłkę prędkości początkowej (17)

16. Oblicz poprawkę $\Delta D_T(\Delta G_p)$ na odległość pozorną ze względu na odchyłkę gęstości powietrza (18)

17. Oblicz poprawkę $\Delta D_T(W_d)$ na odległość pozorną ze względu na składową wzdłużną wiatru (19)

18. Oblicz sumaryczną poprawkę na odległość pozorną ΔD_T jako sumę poprawek obliczanych w punktach 19, 20 i 21 i dodaj ją do D_{T0}

19. Oblicz różnicę odległości $\Delta d = D_T - D_{T0}$

20. Jeżeli moduł różnicy z punktu 19 (Δd) jest większy od $0,001 \cdot D_T$ to wróć do punktu 6 jeżeli nie to idź dalej

21. Oblicz poprawkę na azymut ze względu na derywację $\delta_{\beta d}$ (22)

22. Oblicz poprawkę na azymut ze względu na składową boczną wiatru $\delta_{\beta w}$ (23)

23. Dodaj do azymutu punktu wyprzedzonego obliczone poprawki na azymut w punktach 21 i 22.

24. Jeżeli azymut β_t jest większy lub równy 2π to przelicz go do przedziału $\langle 0 \div 2\pi \rangle$.

25. Zobrazuj położenie celu i punktu wyprzedzonego.

26. Powróć do punktu 1.

Odchyłka gęstości powietrza oraz azymut i prędkość wiatru obliczane są na podstawie komunikatu meteorologicznego.

3.2. Pobieranie, przetwarzanie i filtracja danych wejściowych

Danymi wejściowymi są wielkości współrzędnych prostokątnych x , y i h otrzymywane z urządzenia telemetrycznego. Wartości te podawane są na wejścia sterownika, a następnie podawane są na wejścia filtru wygładzającego o transmitancji operatorowej

$$G(s) = \frac{1}{T_1^2 s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_1 \cdot s + 1} \quad (13)$$

gdzie:

T_1 – stała czasowa filtru

ξ - tłumienie

s – operator Laplace'a

zrealizowanego jako filtr cyfrowy uzyskany poprzez przekształcenie biliniowe, podstawiając

$$s = \frac{2}{T} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (14)$$

gdzie T - okres próbkowania.

Dane te po wygładzeniu pobierane są przez program realizujący predykcję punktu wyprzedzonego jako współrzędne wygładzone x_c, y_c, h_c .

Składowe prędkości celu v_x, v_y, v_h oblicza się na podstawie współrzędnych celu poprzez podanie ich na wejścia filtru różniczkującego, w którym następuje jednocześnie wygładzanie, o transmitancji

$$G_v(s) = \frac{s}{T_1^2 s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_1 \cdot s + 1} \quad (15)$$

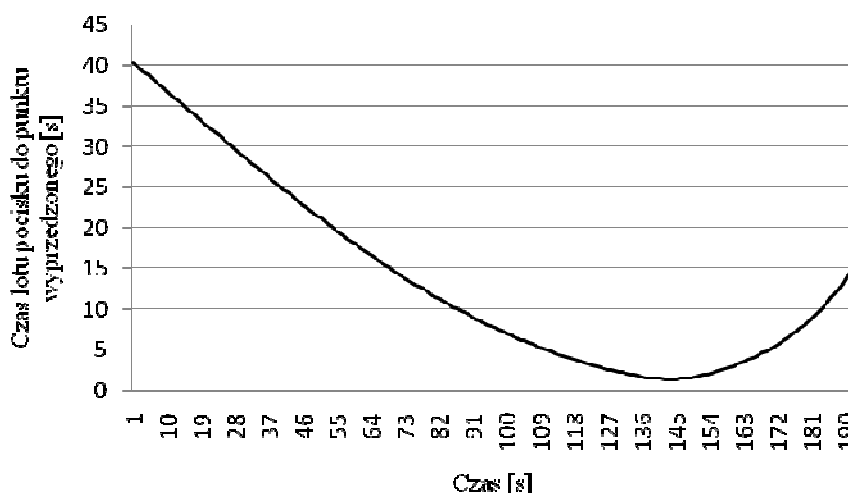
Filtr ten realizuje się podobnie jak filtr wygładzający wykorzystując przekształcenie biliniowe.

Składowe prędkości celu pobierane są przez program realizujący predykcję punktu wyprzedzonego.

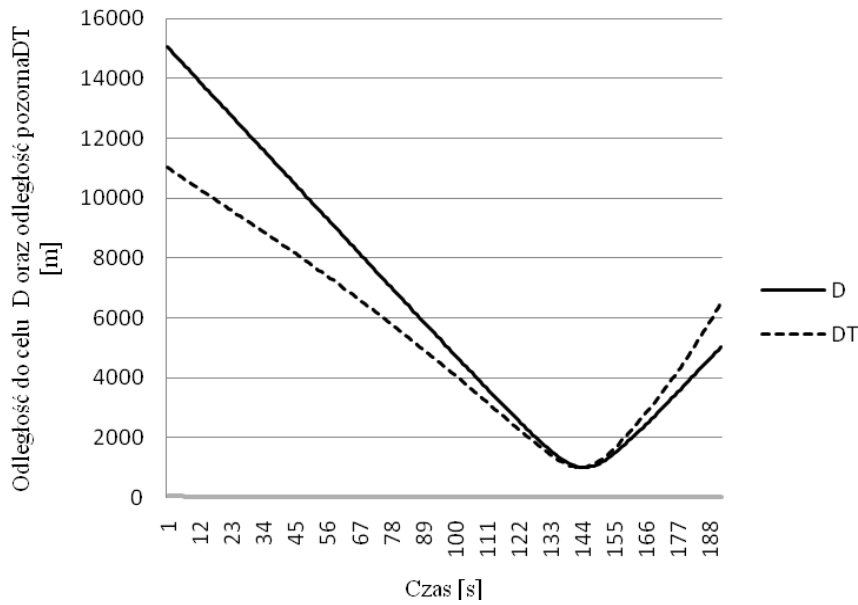
3.3. Wyniki testowania

Testowanie poprawności pracy systemu zostało przeprowadzone dla dwóch przypadków: celu nieruchomego oraz celu ruchomego. Program testujący został napisany w języku C. Dla celu nieruchomego nastawy były wprowadzane dla takich samych danych jakie są w tabelach strzelniczych i porównywane były wyniki symulacji (czas lotu pocisku, azymut i kąt celowania). Dla wszystkich przypadków błąd względny pomiędzy danymi teoretycznymi a wynikami symulacji nie przekraczał 0,5%. Dla celu ruchomego przeprowadzono testowanie dla celu poruszającego się poziomo z różnymi prędkościami. Jako przykład przedstawiono test dla celu poruszającego się z prędkością 100m/s na wysokości 500m wzdłuż osi y w odległości 1000m od osi x. Wyniki przedstawiają rysunki 11 – 14.

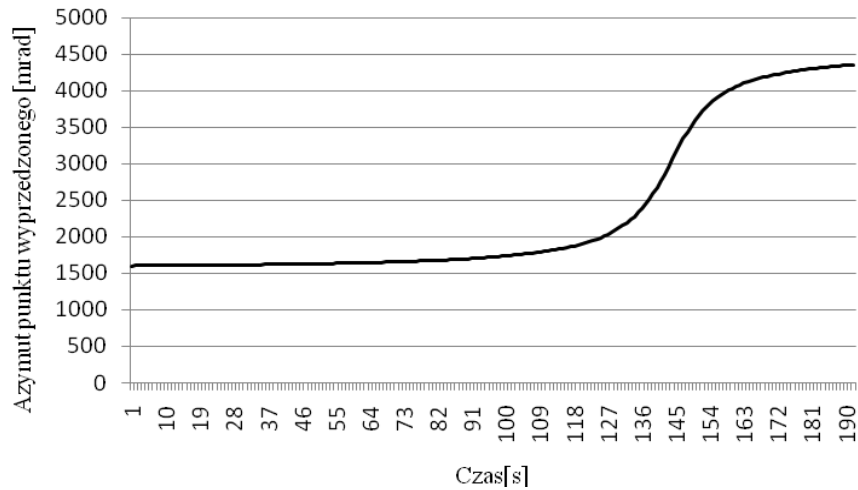
Końcowe testy były przeprowadzone na poligonie przeciwlotniczym podczas strzelania do celów rzeczywistych. Wszystkie testy na poligonie zakończyły się pomyślnie



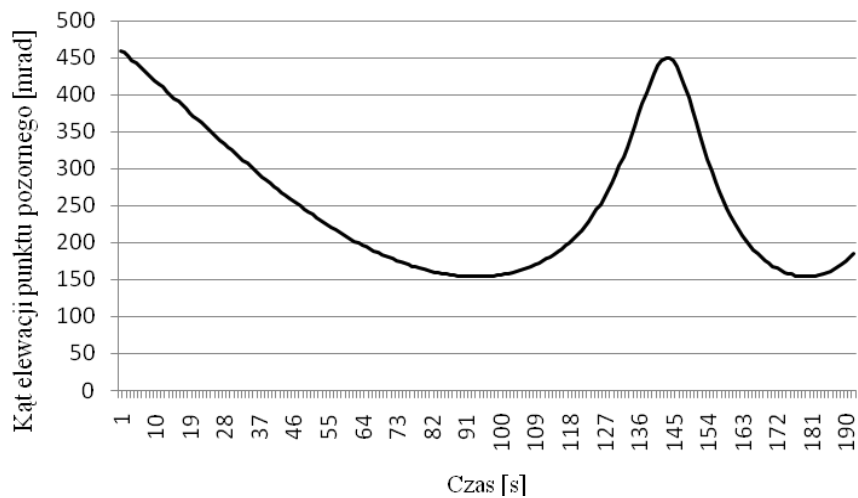
Rys. 11. Wyniki testów dla celu ruchomego – czas lotu pocisku do punktu wyprzedzonego w funkcji czasu obserwacji



Rys. 12. Wyniki testów dla celu ruchomego – odległość do celu i odległość pozorna w funkcji czasu obserwacji



Rys. 13. Wyniki testów dla celu ruchomego – azymut punktu wyprzedzonego w funkcji czasu obserwacji



Rys. 14. Wyniki testów dla celu ruchomego – kąt elewacji punktu pozornego w funkcji czasu obserwacji

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono procedurę postępowania przy projektowaniu specjalizowanego cyfrowego systemu predykcyjnego przeznaczonego dla artylerii przeciwlotniczej. Wyznaczono funkcje balistyczne dla armaty S-60 oraz przedstawiono algorytm pracy modułu balistycznego dla prostej hipotezy o ruchu celu. Algorytm został sprawdzony i przetestowany dla różnych przypadków lotu celu. Jego poprawność została zbadana i stwierdzono, że użycie tego algorytmu z wyznaczonymi funkcjami balistycznymi i funkcjami poprawek gwarantuje poprawne rozwiązanie zagadnienia trafienia z dopuszczalnymi błędami i w czasie wystarczającym do realizacji zadania.

Bibliografia

- [1] Borowczyk W., Kaczmarek W.: „Badanie wpływu poprawek na dokładność wyliczania nastaw działowych w oparciu o uproszczone tabele balistyczne”, Biuletyn WAT, Vol. LIV, nr 9, 2005, pp. 39-48
- [2] Borowczyk W.: „Analiza przydatności różnego rodzaju filtrów do wyznaczania wyprzedzeń współrzędnych celu oraz metody ich opracowania”, Biuletyn WAT, Vol. LIV, nr 9, 2005, pp. 23-37.
- [3] Borowczyk W.: „Analiza wpływu rzędu zastosowanych filtrów cyfrowych, przeznaczonych do wyznaczania wyprzedzeń, na dokładność rozwiązania zagadnienia trafienia”, Biuletyn WAT, Vol. LIV, nr 9, 2005, pp. 5-21.
- [4] Borowczyk W., Kaczmarek W.: „Analiza błędów obliczania nastaw działowych przy zastosowaniu algorytmu zmiennego w czasie”, Biuletyn WAT, Vol. LVII, nr 1, 2008, pp 7–18
- [5] Borowczyk W., Kaczmarek W.: „Analiza i ocena błędów wyliczania nastaw działowych w przelicznikach przeciwlotniczych zestawów artyleryjskich bliskiego zasięgu”, Biuletyn WAT, Vol. LVII, nr 1, 2008, pp. 19–30
- [6] Machowski, B. ; Motyl, K.: „Analiza możliwości opracowania przelicznika dla systemu artyleryjskiego na podstawie równań ruchu pocisku”, Biuletyn WAT, nr 4 [548], 1998, pp. 109-117
- [7] Borowczyk W., Kaczmarek W.: „Obliczanie bieżących współrzędnych celu powietrznego w oparciu o współrzędne mierzone przez odległe urządzenia śledzące”, Biuletyn WAT, Vol. LVI, nr 3, 2007, pp. 211–228
- [8] Madej W., Drabarek J.: „Realizacja odczytu współrzędnych w specjalizowanym cyfrowym systemie predykcyjnym z wykorzystaniem reprogramowalnych układów cyfrowych”, Elektronika, nr 11, 2008, pp. 189–190
- [9] Bartkiewicz S., Madej W. „Błędy strzelania jako miara jakości zintegrowanego systemu uzbrojenia”, KKM Warszawa 2001, pp. 577 – 580
- [10] Bartkiewicz S., Ociepa Z., Boroń S., Madej W.: „Cyfrowa realizacja łącza selsynowego”, V Krajowa Konferencja „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania”, Gdynia 1995
- [11] Boroń S., Madej W., Bartkiewicz S., Ociepa Z.: „Artyleryjski przelicznik cyfrowy”, V Krajowa Konferencja „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania”, Gdynia 1995

- [12] Madej W., Boroń S., Bartkiewicz S., Ociepa Z.: „Możliwości zwiększenia skuteczności artyleryjskiego zestawu przeciwlotniczego”, V Krajowa Konferencja „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania”, Gdynia 1995
- [13] Ociepa Z., Bartkiewicz S., Boroń S., Madej W.: „Cyfrowe sterowanie napędami armaty”, V Krajowa Konferencja „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania”, Gdynia 1995
- [14] Oppenheim A.V. & R.W. Schaffer.: ‘Digital Signal Processing’, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1975

Specialized digital prediction system with a simple hypothesis of the target movement

Abstract

Specialized digital prediction systems are necessary elements of the automated system of the fire control of anti-aircraft artillery. They constitute the basic subsystem which realizes tasks of the ballistic module. This module is responsible for working out appropriate settings for performance of the fire task. In the paper the algorithm of computations and necessary functions for the proper operating of the specialized prediction system realizing prediction of the meeting point. i.e. coordinates of the point in which, according to the computations, the meeting of the target and the missile should take place, for small caliber anti-aircraft artillery are presented. This algorithm can be implemented using industrial computers, microprocessor systems containing a signal processor or a programmable logic controller (PLC) which can be programmed in the C programming language.

Keywords: module of the ballistic computations, real time system, prediction system, resolver, shooting conditions

