



Lokalizacja stanowiska ogniowego na podstawie wielkości charakteryzujących fragment toru pocisku wyznaczonych przez system wykrywania i śledzenia *

Marcin BAJKOWSKI, Janusz KANIEWSKI, Marek RADOMSKI

*Institut Mechaniki i Poligrafii, Wydział Inżynierii Produkcji,
Politechnika Warszawska, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa*

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę pozwalającą zlokalizować nieprzyjacielskie stanowisko ogniowe na podstawie fragmentu toru śledzonego pocisku. Wyprowadzono stosowne wzory służące do identyfikacji pocisku za pomocą współczynnika balistycznego. Zamieszczono także wyniki wstępnej analizy metody wyznaczania współczynnika balistycznego. Wskazano na konieczność pogłębionej analizy dokładności i wrażliwości metody na jakość przetwarzanych danych pomiarowych.

Słowa kluczowe: mechanika, balistyka zewnętrzna, rozpoznanie, lokalizacja

1. WSTĘP

Właściwe wykorzystanie ludzi i sprzętu w warunkach bojowych wymaga między innymi rozpoznania, w tym lokalizacji i oceny sił przeciwnika. W tym celu coraz częściej wykorzystywane są różnorodne systemy, jak np. polowe systemy przygotowania taktycznych danych artyleryjskich (Advanced Field Artillery Tactical Data System) [1, 2], systemy antysnajperskie [3, 4] itp. Systemy te pozwalają skrócić czas reakcji na działania nieprzyjacielskie i racjonalnie zaplanować użycie środków własnych.

* Artykuł został opracowany na podstawie referatu prezentowanego podczas IX Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Pułtusk, 25-28 września 2012 r.

Prace nad tego typu systemami były prowadzone także w kraju [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12], a przykładem wykorzystania ich wyników w praktyce jest Radarowy Zestaw Rozpoznania Artyleryjskiego LIWIEC.

W przypadku ogólnym lokalizacja nieprzyjacielskiego stanowiska ogniowego może być wykonana:

- a) bezpośrednio – na podstawie analizy rozchodzących się w przestrzeni fal akustycznych, sejsmicznych itp., które są generowane podczas strzału z broni palnej oraz towarzyszą wybuchowi pocisku artyleryjskiego;
- b) pośrednio – w oparciu o informacje o torze lotu pocisku, dostarczane z systemu śledzenia.

Drugi z wymienionych sposobów wymaga przyjęcia modelu matematycznego opisującego ruch pocisku w powietrzu oraz identyfikacji typu pocisku. W ogólnym przypadku model matematyczny stanowi układ równań różniczkowych zwyczajnych. Występujące w tych równaniach stałe współczynniki (parametry – jak np. współczynnik balistyczny) charakteryzują typ pocisku. Lokalizacja stanowiska ogniowego wymaga zatem rozwiązania kolejno następujących zadań cząstkowych:

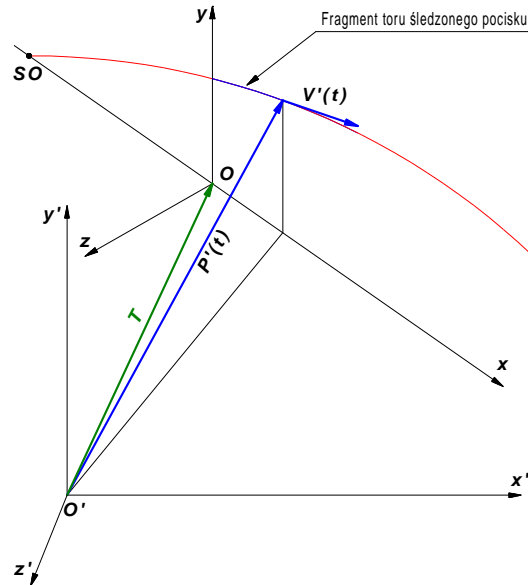
- a) identyfikacji parametrów modelu charakteryzujących typ pocisku;
- b) ustalenia warunków początkowych dla równań modelu, które odpowiadają dowolnemu punktowi fragmentu toru śledzonego pocisku;
- c) wykonania całkowania (z ujemnym krokiem) równań modelu dla przyjętych warunków początkowych;
- d) wyznaczenia współrzędnych stanowiska ogniowego na podstawie otrzymanego rozwiązania równań modelu i map topograficznych terenu.

W dalszej części pracy zostanie przedstawiona szczegółowo metoda identyfikacji parametrów modelu charakteryzujących typ pocisku. Pozostałe zadania cząstkowe lokalizacji stanowiska ogniowego będą omówione jedynie w zarysie.

W zaproponowanej metodzie wykorzystano klasyczny model ruchu pocisku, traktowanego jako punkt materialny [13]. Identyfikacja obiektu sprowadza się wówczas do wyznaczenia współczynnika balistycznego, który można obliczyć na trzy sposoby. W pracy zamieszczono wyniki wstępnej oceny dokładności i powtarzalności wyników obliczeń, w zależności od umiejscowienia fragmentu toru, jego długości i dokładności danych pomiarowych z systemu śledzenia, dla sposobu polegającego na wykorzystaniu przekształconego równania ruchu pocisku.

2. METODA WYZNACZANIA POŁOŻENIA STANOWISKA OGNIOWEGO

System śledzący identyfikuje w czasie dwie funkcje wektorowe opisujące ruch pocisku w przyjętym układzie odniesienia $O'x'y'z'$, to jest jego położenie $P'(t)$ i prędkość $V'(t)$, co ilustruje rys. 1.



Rys. 1. Schemat ilustrujący identyfikację ruchu pocisku realizowaną przez system śledzenia

$O'x'y'z'$ – inercjalny układ odniesienia zdefiniowany w systemie śledzącym; $Oxyz$ – inercjalny układ odniesienia związany z płaszczyzną strzału; SO – lokalizowane stanowisko ogniowe; T – wektor charakteryzujący przesunięcie układu $Oxyz$ względem układu $O'x'y'z'$; $P'(t)$, $V'(t)$ – funkcje wektorowe opisujące odpowiednio położenie i prędkość pocisku w funkcji czasu, wyznaczone przez system śledzenia

Fig. 1. Diagram illustrating identification of projectile motion, accomplished by tracking system

$O'x'y'z'$ – inertial coordinate system defined within the tracking system; $Oxyz$ – inertial coordinate system associated with the trajectory plane; SO – gun position; T – translation vector of $Oxyz$ with respect to $O'x'y'z'$; $P'(t)$, $V'(t)$ – vector functions describing respectively position and velocity of the projectile, being determined by the tracking system

W tym miejscu należy nadmienić, że w rzeczywistości są to dwa wektorowe procesy stochastyczne z uwagi na błędy systemów pomiarowych i rozrzut balistyczny. Funkcje $P'(t)$ i $V'(t)$ dane są w postaci dyskretnej i charakteryzują się stałym krokiem próbkowania, który zależy od charakterystyk technicznych systemów pomiarowych i przetwarzających oraz przyjętego algorytmu analizy danych doświadczalnych w czasie rzeczywistym.

Z dobrym przybliżeniem dla zastosowań praktycznych do opisu ruchu pocisków artyleryjskich o donośności do około 50 km i pocisków stosowanych w broni strzeleckiej można stosować dwuwymiarowy model klasyczny [13], w którym pocisk jest traktowany jako punkt materialny, na który działają jedynie: stała siła ciężkości i siła oporu powietrza skierowana wzdłuż stycznej do toru. Ponadto pomija się w nim krzywiznę Ziemi i wpływ jej ruchu obrotowego oraz zmiany przyspieszenia ziemskiego z wysokością. Przy założeniu niewystępowania wiatru, równania tego modelu w inercjalnym układzie współrzędnych $Oxyz$ (patrz rys. 1) można zapisać w następującej postaci [13]:

$$\frac{dy}{dx} = p \quad (1)$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{\sqrt{p^2 + 1}}{v} \quad (2)$$

$$\frac{dp}{dx} = -(p^2 + 1) \frac{g}{v^2} \quad (3)$$

$$\frac{dv}{dx} = -c \kappa H(y) v \sqrt{p^2 + 1} \cdot C_D(M) - \frac{g}{v} p \quad (4)$$

$$c = \frac{d^2 i \cdot 1000}{m} \quad (5)$$

$$\kappa = \frac{\pi \rho_0}{8000} \quad (6)$$

gdzie:

x, y – współrzędne opisujące położenie pocisku, odpowiednio odcięta i rzędna;

p – tangens kąta nachylenia stycznej do toru τ ;

v – moduł wektora prędkości pocisku;

g – przyspieszenie ziemskie;

c – współczynnik balistyczny;

κ – stały współczynnik dany wzorem (6);

$H(y)$ – funkcja charakteryzująca zmianę gęstości powietrza wraz z wysokością wg przyjętej atmosfery standardowej, np. ICAO;

$C_D(M)$ – współczynnik oporu powietrza w funkcji liczby Macha M , dla przyjętej standardowej funkcji oporu powietrza, np. 1943 r.;

d – kaliber pocisku;

i – współczynnik kształtu pocisku;

m – masa pocisku;

ρ_0 – gęstość powietrza na poziomie ziemi.

Jak łatwo zauważyć, w modelu tym typ pocisku jest charakteryzowany jednym parametrem, to jest współczynnikiem balistycznym c .

Znając współczynnik balistyczny i warunki początkowe, odpowiadające dowolnemu punktowi toru pocisku, można zatem scałkować równania od (1) do (4), a co za tym idzie wyznaczyć położenie stanowiska ogniowego. Otrzymane wyniki należy jeszcze skorygować ze względu na wpływ wiatru i występowanie ewentualnego zбочenia pocisku na skutek jego ruchu obrotowego. W tym celu można wykorzystać rachunki poprawkowe.

Dalsze rozważania będą prowadzone w układzie współrzędnych $Oxyz$ (patrz rys. 1). Zakłada się przy tym, że płaszczyzna Oxy pokrywa się z płaszczyzną strzału oraz że współrzędne y' oraz y są sobie równe. Położenie tej płaszczyzny w układzie współrzędnych $O'x'y'z'$ wyznacza prosta:

$$z' = A_0 + A_1 x' \quad (7)$$

której współczynniki A_0 i A_1 można zidentyfikować np. metodą regresji liniowej dla współrzędnych x' oraz z' funkcji wektorowej $\mathbf{P}'(t)$. Poszukiwane współczynniki prostej dopasowanej do danych doświadczalnych, dla n punktów pomiarowych (x'_i, z'_i) , oblicza się wówczas z następujących wzorów [14]:

$$A_1 = \frac{K_3 - K_0 K_1 / n}{K_2 - K_0^2 / n} \quad (8)$$

$$A_0 = (K_1 - A_1 \cdot K_0) / n \quad (9)$$

gdzie:

$$K_0 = \sum_{i=1}^n x'_i, \quad K_1 = \sum_{i=1}^n z'_i, \quad K_2 = \sum_{i=1}^n x'^2_i, \quad K_3 = \sum_{i=1}^n x'_i z'_i \quad (10)$$

Znając współczynniki A_0 i A_1 prostej (7), można dokonać stosownej zamiany zmiennych za pomocą przekształcenia afinicznego postaci:

$$\begin{aligned} x &= \cos \alpha \cdot x' + \sin \alpha \cdot z' + T_x, \\ y &= y' \\ z &= -\sin \alpha \cdot x' + \cos \alpha \cdot z' + T_z, \end{aligned} \quad (11)$$

gdzie:

$$\alpha = \arctg A_1,$$

T_x, T_z – współrzędne wektora translacji układu współrzędnych $Oxyz$ (rys. 1).

Początek O układu współrzędnych $Oxyz$ może być obrany dowolnie na prostej (7). Można np. przyjąć $T_x = 0$ i $T_z = A_0$.

Alternatywnie, O może odpowiadać pierwszemu punktowi fragmentu toru śledzonego pocisku, tzn. być rzutem (prostokątnym lub środkowym, o środku w punkcie O') zmierzonego położenia punktu (x'_1, z'_1) na prostą (7). W przypadku rzutu prostokątnego otrzymuje się:

$$\begin{aligned} T_{x'} &= -(\cos \alpha \cdot x'_1 + \sin \alpha \cdot z'_1) \\ T_{y'} &= A_0 + A_1 T_{x'} \end{aligned} \quad (12)$$

Zgodnie z przyjętym modelem ruchu pocisku, punkty pomiarowe powinny być współpłaszczyznowe. Jednak ze względu na nieuniknioną obecność błędów pomiaru, sytuacja wygląda inaczej, w związku z czym punkty (x'_i, y'_i, z'_i) , $i = 1, \dots, n$, należy teraz rzutować na wyznaczoną płaszczyznę Oxy . Rzutowanie prostokątne prowadzi do punktów, których współrzędne w układzie $Oxyz$ wyrażają się wzorami:

$$\begin{aligned} x_i &= \cos \alpha \cdot (x'_i - x'_1) + \sin \alpha \cdot (z'_i - z'_1) \\ y_i &= y'_i \\ z_i &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Uwaga. Jeśli okazuje się, że wyznaczana płaszczyzna strzału jest prostopadła (lub niemal prostopadła) do osi $O'x'$ przyjętego *a priori* układu odniesienia $O'x'y'z'$, wówczas równania płaszczyzny należy szukać w postaci:

$$x' = A_0 + A_1 z' \quad (7a)$$

zamiast w postaci (7), z oczywistymi niezbędnymi modyfikacjami wzorów (8)-(13). Wybór pomiędzy tymi dwiema postaciami można uzależnić od spełnienia, bądź niespełnienia, nierówności:

$$|z'_n - z'_1| < |x'_n - x'_1| \quad (14)$$

Dysponując transformowanymi funkcjami $P(t)$ i $V(t)$ w układzie współrzędnych $Oxyz$, można przystąpić do wyznaczenia współczynnika balistycznego c . Zadanie to może być rozwiązane na kilka sposobów.

Z równań (3) i (1) wynika, że:

$$v = \sqrt{-g \frac{1 + (dy/dx)^2}{d^2y/dx^2}} \quad (15)$$

Różniczkując równanie (15) względem x , otrzymuje się:

$$\frac{dv}{dx} = -\frac{g}{v} \frac{dy}{dx} + \frac{[1 + (dy/dx)^2] d^3y/dx^3}{(d^2y/dx^2)^2} \frac{g}{2v} \quad (16)$$

Po uwzględnieniu (16) w równaniu (4) i przekształceniu otrzymuje się następujący wzór:

$$c = \frac{1}{2} \frac{d^3y/dx^3}{d^2y/dx^2} \frac{[1 + (dy/dx)^2]^{-1/2}}{\kappa H(y) C_D(M)} \quad (17)$$

Jeżeli zatem dane będą: fragment toru $y = y(x)$ oraz jego pierwsza, druga i trzecia pochodna, to wykorzystując wzory (15) i (17), będzie można wyznaczyć poszukiwaną wartość współczynnika balistycznego c , dla dowolnego punktu fragmentu toru (teoretycznie wartość ta powinna być taka sama w każdym rozważanym punkcie, jednak w praktyce konieczne jest uśrednienie wyników uzyskanych dla poszczególnych punktów).

Dla torów płaskich, to jest gdy kąt rzutu τ_0 nie przekracza około 10° , wykorzystuje się do rozwiązania równań (1)-(4) metodę Siacci'ego (patrz np. [13]). Wzór określający odciętą toru jest wówczas następujący:

$$x = \frac{1}{c} [D(U) - D(v_0)] \quad (18)$$

gdzie:

$D(U), D(v_0)$ – funkcje pierwotne Siacci'ego;

v_0 – prędkość początkowa pocisku;

U – prędkość pozorna dana wzorem:

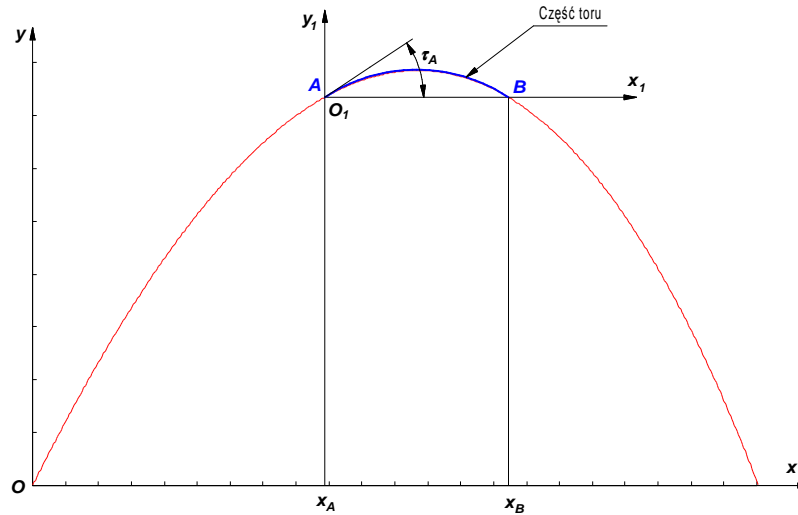
$$U = v \frac{\cos \tau}{\cos \tau_0} \quad (19)$$

Wzór (18) jest często wykorzystywany w praktyce do wyznaczania współczynnika balistycznego na podstawie pomiaru prędkości pocisku w dwóch dowolnych punktach toru. Rozwiązanie układu dwóch równań algebraicznych postaci (18) jest wówczas następujące:

$$c = \frac{D(U_2) - D(U_1)}{x_2 - x_1} \quad (20)$$

w którym indeksy 1 i 2 odpowiadają wartościom odciętej toru i prędkości pozornej w analizowanych punktach nr 1 i 2.

W tym miejscu należy zauważyć, iż część stromego toru w pobliżu wierzchołka może być traktowana jako tor płaski, jak to ilustruje rysunek 2.



Rys. 2. Część toru stromego, która może być traktowana jako tor płaski, dla którego ruch pocisku rozpoczyna się w punkcie A i kończy w punkcie B , przy czym spełniony jest warunek $\tau_A = \tau_0 < 10^\circ$

Fig. 2. The middle segment of a steep trajectory which can be considered flat trajectory with projectile motion starting at the point A and ending at the point B , provided $\tau_A = \tau_0 < 10^\circ$

Wzór (20) może być zatem wykorzystany również do wyznaczenia współczynnika balistycznego c dla torów stromych, gdy fragment toru śledzonego pocisku leży w pobliżu wierzchołka, to jest pomiędzy punktami A oraz B na rysunku 2.

Trzecim proponowanym sposobem wyznaczania współczynnika balistycznego jest wykorzystanie bilansu energii dla dwóch dowolnych punktów toru, który ma następującą postać całkową:

$$m \frac{v_1^2}{2} + mgy_1 = \int_{s_1}^{s_2} R(s) ds + m \frac{v_2^2}{2} + mgy_2 \quad (21)$$

Całka krzywoliniowa w bilansie (21) reprezentuje dyssypowaną energię na skutek oddziaływania siły oporu powietrza R wzdłuż toru. Dla krótkiego odcinka toru można przyjąć, że siła oporu powietrza jest stała i równa średniej wartości dla punktów granicznych 1 i 2:

$$R_{\bar{s}r} = mc \kappa H(y_{\bar{s}r}) v_{\bar{s}r} \cdot C_D(M_{\bar{s}r}), \quad (22)$$

w którym wielkości z indeksem „ $\bar{s}r$ ” oznaczają średnie arytmetyczne wartości dla punktów 1 i 2.

Po podstawieniu wzoru (22) do (21) i przekształceniu otrzymuje się:

$$c = \frac{(v_1^2 - v_2^2)/2 + g(y_1 - y_2)}{H((y_1 + y_2)/2)(v_1 + v_2)/2 \cdot C_D(M_{sr})L} \quad (23)$$

Występująca w równaniu (23) długość drogi przebytej przez pocisk wzdłuż toru może być w pierwszym przybliżeniu obliczona z wykorzystaniem twierdzenia Pitagorasa jako następująca suma:

$$L = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (24)$$

gdzie:

x_i, y_i – odpowiednio odcięte i rzędne kolejnych punktów pomiarowych fragmentu toru śledzonego pocisku;

n – liczba punktów pomiarowych.

Warunki początkowe dla równań (1)-(4), dla dowolnego punktu fragmentu toru śledzonego pocisku, w praktyce dostarczane są z systemu śledzenia i wymagają jedynie transformacji do układu odniesienia $Oxyz$, z wykorzystaniem przekształcenia postaci (11). Są to bowiem współrzędne funkcji wektorowych $\mathbf{P}(t)$ i $\mathbf{V}(t)$, które odpowiadają wybranemu punktowi pomiarowemu, dla czasu $t_0 = 0$.

Całkowanie (z ujemnym krokiem) równań od (1) do (4) można wykonać za pomocą metody numerycznej, np. Rungego–Kutty. Wyznaczone tą drogą położenie stanowiska ogniowego należy jeszcze skorygować za pomocą rachunków poprawkowych, ze względu na wpływ wiatru i występowanie ewentualnego zbroczenia pocisku na skutek jego ruchu obrotowego. W tym celu może być wykorzystana metoda zaproponowana przez Didiona, która jest dokładnie opisana np. w pracy [13]. Stosowne wzory poprawkowe dla odciętej x i zbroczenia z , które uwzględniają wpływ wiatru, mają następującą postać:

$$\delta x = W_x \left(t_c - \frac{\partial x}{\partial v_0} \cos \tau_0 + \frac{\partial x}{\partial \tau_0} \frac{\sin \tau_0}{v_0} \right) \quad (25)$$

$$z = W_z \left(t_c - \frac{x}{v_0 \cos \tau_0} \right) \quad (26)$$

gdzie:

W_x, W_z – odpowiednio podłużna i poprzeczna składowa prędkości wiatru;

t_c – czas lotu pocisku od stanowiska ogniowego do wybranego punktu toru.

Występujące w równaniu (25) współczynniki poprawkowe $\partial x/\partial v_0$ i $\partial x/\partial \tau_0$ można zaczerpnąć np. z tabel strzelniczych dla podobnego typu pocisku lub całkowicie pominąć i wzory (25) i (26) traktować jako pierwsze przybliżenie.

3. WSTĘPNA ANALIZA METODY WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA BALISTYCZNEGO

Celem analizy było dokonanie wstępnej oceny dokładności i powtarzalności wyników obliczeń, w zależności od umiejscowienia fragmentu toru, jego długości i dokładności danych pomiarowych z systemu śledzenia. Stosowne obliczenia wykonano za pomocą pakietu MATLAB. Analizowano metodę wyznaczania współczynnika balistycznego c na podstawie równania ruchu pocisku wg wzoru (17). Założono przy tym, że fragment toru będzie przybliżany za pomocą wielomianu trzeciego stopnia:

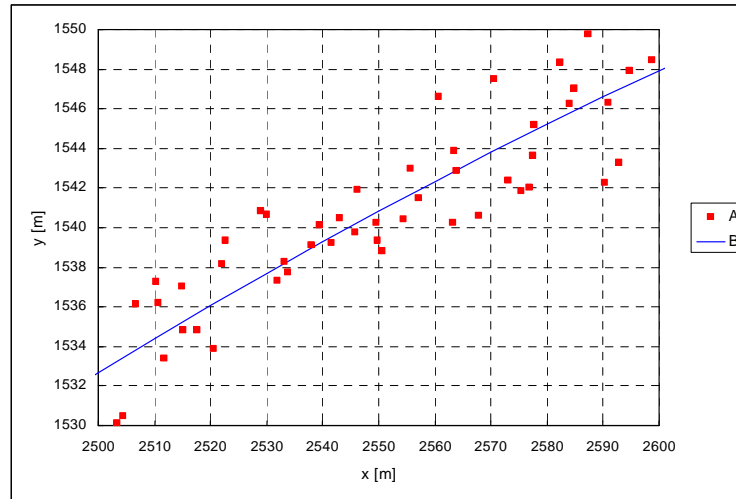
$$y = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (27)$$

Po uwzględnieniu (27) we wzorach (15) i (17) otrzymuje się:

$$v = \sqrt{-g \frac{1 + (3a_3x^2 + 2a_2x + a_1)^2}{6a_3x + 2a_2}} \quad (28)$$

$$c = \frac{3a_3}{6a_3x + 2a_2} \frac{\left[1 + (3a_3x^2 + 2a_2x + a_1)^2\right]^{-1/2}}{\kappa H(y) C_D(M)} \quad (29)$$

Dane pomiarowe pochodzące z systemu śledzenia generowano w następujący sposób. Przyjęto, że śledzonym obiektem jest pocisk moździerzowy OF-843A kal. 120 mm. Dla tego pocisku rozwiązywano numerycznie problem główny balistyki zewnętrznej, przy założeniu warunków tabelarycznych (prawo oporu powietrza 1943 r. i artyleryjska atmosfera standardowa), dobierając współczynnik balistyczny tak, aby otrzymać zgodność głównych czynników toru z danymi zawartymi w tabelach strzelniczych. Do otrzymanego w ten sposób dyskretnego rozwiązania $y_i(x_i)$ dodawano przypadkowy błąd pomiaru. Błąd pomiaru symulowany był za pomocą generatora liczb pseudolosowych, będącego częścią pakietu MATLAB. Do symulacji błędów pomiaru odległości użyto rozkładu jednostajnego, skalowanego długością przedziału, natomiast błędy pomiaru kątów symulowano, wykorzystując rozkład normalny, skalowany wartością odchylenia standardowego. Przyjęty sposób symulowania błędu pomiaru wynikał z informacji uzyskanych od producentów tego typu urządzeń. Na rysunku 3 przedstawiono przykład fragmentu toru z nałożonymi błędami.



Rys. 3. Przykład wygenerowanego fragmentu toru z nałożonymi błędami

A – punkty przebiegu z nałożonymi błędami przypadkowymi;
B – przebieg z rozwiązania numerycznego

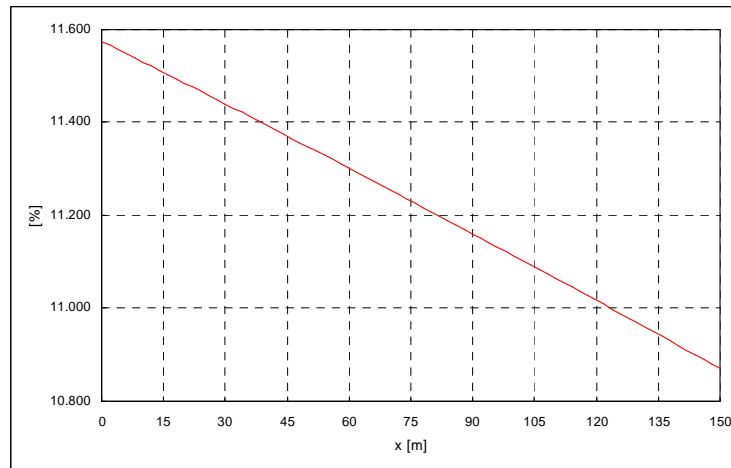
Fig. 3. Example of generated trajectory segment with errors superimposed

A – path points with superimposed random errors;
B – path obtained from numerical solution

Następnie wybierano punkt na części opadającej lub wznoszącej toru i przyjmowano do dalszych obliczeń n kolejnych punktów (x_i, y_i) . Dyskretny fragment toru $y_i(x_i)$, dla $i = 1, 2, \dots, n$, aproksymowano następnie wielomianem (27) i obliczano wartości współczynnika balistycznego, wykorzystując wzory (28) i (29), dla wszystkich punktów od 1 do n .

Otrzymane wyniki wykazały bardzo dużą wrażliwość analizowanej metody na dokładność wyznaczenia wielkości charakteryzujących fragment toru śledzonego pocisku. Jedynie wybór fragmentu toru w pobliżu wierzchołka zapewniał błąd względny wyznaczenia współczynnika balistycznego mniejszy od około 15%, co ilustruje rys. 4. Jak się wydaje, głównym tego powodem jest złe uwarunkowanie zadania aproksymacji wielomianowej, która była zastosowana w analizie.

Dlatego też uznano, że dalsze pogłębione badania problemu są uzasadnione i powinny być skoncentrowane na opracowaniu dokładniejszej metody różniczkowania numerycznego dyskretniej funkcji doświadczalnej. Wydaje się, że zastosowanie rekurencyjnych filtrów cyfrowych lub wygładzenie przebiegu doświadczalnego metodą dziesiątkowania (patrz np. [15, 16]) przyczyni się do zmniejszenia wrażliwości otrzymywanych wyników na dokładność danych pomiarowych.



Rys. 4. Względny błąd wyznaczenia współczynnika balistycznego dla kolejnych punktów analizowanego fragmentu toru pocisku OF-843A kal. 120 mm, na części wznoszącej w pobliżu wierzchołka

Fig. 4. Relative error in determining ballistic coefficient for consecutive points on a trajectory segment under analysis, ascending part near the vertex, for the 120 mm OF-843A mortar projectile

4. PODSUMOWANIE

Zaproponowana metoda lokalizacji nieprzyjacielskiego stanowiska ogniowego na podstawie wielkości charakteryzujących tor pocisku wymaga pogłębionej analizy jej dokładności i wrażliwości na jakość przetwarzanych danych pomiarowych. Wyprowadzone wzory, pozwalające identyfikować typ pocisku za pomocą współczynnika balistycznego, umożliwiają prowadzenie obliczeń wieloma sposobami. Dzięki temu istnieje możliwość porównania otrzymanych wyników, co może sprzyjać ich wiarygodności w zastosowaniach praktycznych. Wyniki pracy mogą być przydatne w projektowaniu systemów przygotowania taktycznych danych artyleryjskich i antysnajperskich.

LITERATURA

- [1] Boutelle S.W., Filak R., AFATDS: *The Fire Support Window to the 21st Century*, Joint Force Quarterly, National Defense University, Washington, pp. 16-21, Spring, 1996,

- [2] Tenney S., Mays B., Hillis D., Tran-Luu D., Houser J., Reiff Ch., Acoustic Mortar Localization System – Results from OIF, US Army Research Laboratory, Adelphi, MD 20783, *Proceedings for the Army Science Conference (24th)* Held on 29 November – 2 December 2004 in Orlando, Florida.
- [3] ANN., *Anti-Sniper Systems Finding Their Range*, Defense Industry Daily, on: 3.11.2005, <http://www.defenseindustrydaily.com/antisniper-systems-finding-their-range-01437/>
- [4] Simon G., Maróti M., Lédeczi Á., Balogh G., Kusy B., Nádas A., Pap G., Sallai J., Frampton K., Sensor network-based countersniper system, *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, November 03-05, MD, USA, pp. 1-12, Baltimore, 2004.
- [5] Dec R., Gacek J., Ogólna koncepcja przelicznika balistycznego radiolokacyjnego zestawu rozpoznania artylerii, *Materiały IX Ogólnopolskiej Konferencji „Mechanika w Lotnictwie”*, s. 121-132, Warszawa, 2000.
- [6] Dec R., Gacek J., Analiza wpływu niektórych czynników na dokładność działania przelicznika balistycznego radiolokacyjnego zestawu rozpoznania artylerii, *Materiały III Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej „Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia”*, wersja na CD, Waplewo, 2000.
- [7] Dec R., Gacek J., Wpływ przyjętej hipotezy rozkładu błędów pomiarów radiolokacyjnych na pracę przelicznika balistycznego, *Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej Politechniki Śląskiej*, Zeszyt nr 15, s. 95-100, Gliwice, 2001.
- [8] Baranowski L., Dec R., Gacek J., Ogólny algorytm funkcjonowania przelicznika balistycznego radiolokacyjnego zestawu rozpoznania artylerii, *Biuletyn WAT*, vol. LI, nr 8(600), s. 147-158, Warszawa, 2002.
- [9] Dec R., Gacek J., Leciejewski Z., Identyfikacja pocisku przeciwnika przy zastosowaniu przelicznika balistycznego RZRA, *Biuletyn WAT*, vol. LI, nr 8(600), s. 137-146, Warszawa, 2002.
- [10] Dec R., *Analiza i synteza przelicznika balistycznego z wykorzystaniem identyfikacji parametrycznej*, rozprawa doktorska, Wydawnictwo WAT, Warszawa, 2002.
- [11] Danicki E., Calibration of EM and Acoustic Antisniper Systems, *Biuletyn WAT*, vol. LVIII, nr 4, 2009.
- [12] Baranowski L., *Modelowanie, identyfikacja i badania numeryczne dynamiki lotu obiektów balistycznych na potrzeby systemów kierowania ogniem artylerii naziemnej*, Wydawnictwo WAT, Warszawa, 2011.
- [13] Szapiro J., *Balistyka zewnętrzna*, WMON, Warszawa, 1956.

- [14] Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M., *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach, cz. II, Statystyka matematyczna*, PWN, Warszawa, 1994.
- [15] Brandt S., *Analiza danych doświadczalnych, Metody statystyczne i obliczeniowe*, PWN, Warszawa, 1998.
- [16] Zarchan P., Musoff H., *Fundamentals of Kalman Filtering: A Practical Approach, Progress in Astronautics and Aeronautics*, vol. 190, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston, 2000.

Determining Gun Position on the Basis of Entities Characterising an Arc of Projectile Trajectory

Marcin BAJKOWSKI, Janusz KANIEWSKI, Marek RADOMSKI

Abstract. A method for determining an enemy gun position is presented, based on examination of an arc of trajectory of a projectile being tracked. Appropriate formulae for identification of a projectile by means of its ballistic coefficient are derived. Results of preliminary analysis of a method for calculating ballistic coefficient are also given. Necessity of a deepened analysis of accuracy and sensitivity of the method to the quality of measured data being processed is pointed out.

Keywords: mechanics, external ballistics, reconnaissance, localization