

Dr hab. inż. Ryszard Vogt
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Mgr inż. Robert Głębocki
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Filtracja cyfrowa i jej zastosowanie w algorytmach nieciągłego sterowania lotem.

W referacie przedstawiono problemy występujące przy naprowadzaniu obiektów latających gdy pomiar wartości uchybu ma charakter nieciągły. Zakłócenia w czasie lotu powodują że i tak nieciągła informacja ma charakter niepewny. Wymusza to konieczność dokonania korekcji otrzymywanych wartości sygnałów uchybu. Kolejnym zagadnieniem jest możliwość prognozowania sygnałów uchybu.

Digital filtration in application for discontinuous flight control algorithm.

In refer we presented some problems with flying objects guiding when error measure has discontinuous character. Disturbance in the flight time make discontinuous information also uncertain. This problems forced use digital filtration in control algorithms.

1. OPIS BADANEGO OBIEKTU LATAJĄCEGO.

Podczas badań nad możliwością i sposobami naprowadzania przeciwpancernych pocisków moździerzowych natrafiono na dość skomplikowane zagadnienie wzajemnego położenia obiektu sterowanego i celu. Obiekt sterowany naprowadzany jest na cel z górnej półsfery. Układ wykonawczy sterowania stanowi zespół jednorazowych silniczków korekcyjnych rozmieszczonych promieniście wokół środka ciężkości obiektu i oddziaływujących i oddziaływanych bezpośrednio na tenże środek ciężkości. Obiekt wiruje w trakcie lotu.

Układ pomiaru kąta uchybu celu względem obiektu charakteryzują własności:

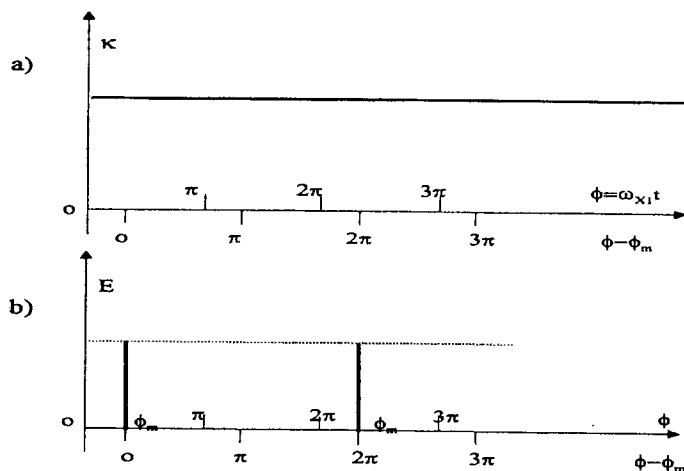
- detektor związany na stałe z obiektem sterowanym;
- nieciągły pomiar sygnału uchybu związany z obrotem obiektu (1, 2 lub 3 pomiary na obrót).

Taki układ cechuje prostota konstrukcji. Z drugiej jednak strony komplikuje się obróbka sygnału przychodzącego z detektora. Związany na stałe z obiektem detektor reaguje na wszystkie zakłócenia lotu wykazując zmianę sygnału uchybu. Kolejny problem do rozwiązania stanowi nieciągłość pomiaru sygnału uchybu. Częstotliwość pomiarów zależy od częstości obrotu obiektu sterowanego.

2. CHARAKTER SYGNAŁÓW STERUJĄCYCH.

Informacje przychodzące z układu pomiarowego charakteryzują następujące własności:

- nieciągłość
wywołana nieciągłością pracy głowicy pomiarowej
- niepewność
związana z zakłóceniami toru lotu przez układ sterujący



rysunek 1. Wypadkowy uchyb K oraz sygnał E przekazywany na jego podstawie do układu sterowania.

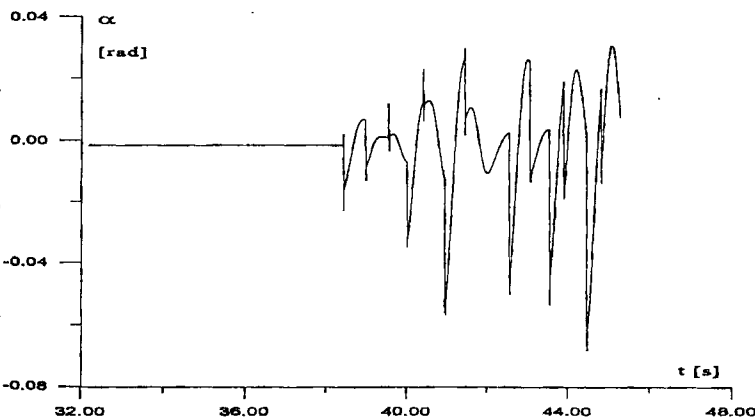
Rysunek 1. Przedstawia zależność pomiędzy uchybem K pod jakim cel znajduje się względem obiektu naprowadzanego a sygnałem uchybu E przekazywanym do Bloku Formowania Sygnałów Sterujących. Sygnał ten ma postać impulsów. Ich wielkość związana jest z wielkością uchybu K , a częstotliwość ich występowania z prędkością obrotową obiektu. Skutkiem tego informacja o uchybie ma charakter nieciągły. Ciągła kontrola wielkości uchybu K wymaga interpolacji wyników z układu pomiarowego.

Związanie głowicy pomiarowej na stałe z pociskiem powoduje to, iż na wynik pomiaru ma wpływ nie tylko wzajemna relacja położenia celu i obiektu. Nakładają się nań dodatkowo wszelkie ruchy jakie występują w czasie lotu (zaburzenia związane z pracą układu wykonawczego sterowania, zjawiskiem giroskopowym, oddziaływaniem z atmosferą). Rysunek 2. i rysunek 3. przedstawiają zmiany kątów natarcia i ślizgu w trakcie lotu sterowanego. Zaburzenia te mogą osiągać wartości nawet do 30% zakresu pomiarowego głowicy. Informacja przychodząca ma więc charakter niepewny. Niepewność ta obniża znacząco wartość decyzji podejmowanych przez układ sterujący a przez to i jakość sterowania. W tej sytuacji właściwa ocena relacji obiekt-cel wymaga znacznego zredukowania niepewności wartości uchybu K .

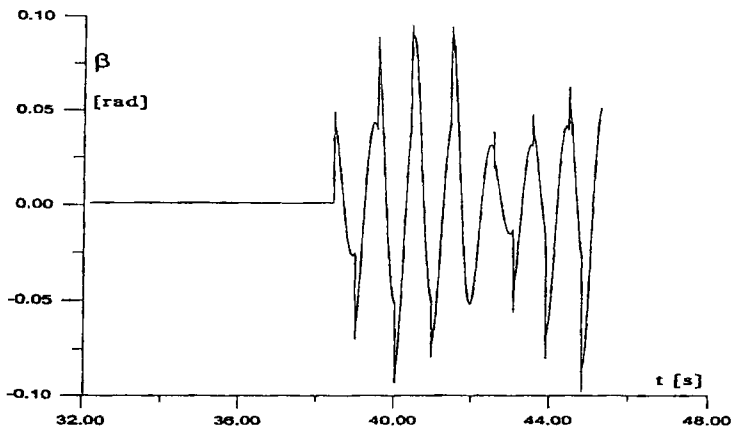
3. ZAGADNIENIE FILTRACJI I PROGNOZOWANIA.

Ponieważ zarówno w trakcie powstawania sygnału uchybu jak i jego obserwacji dochodzi do zakłóceń co do których można poczynić pewne założenia statystyczne, należy starać się dokonać korekcji otrzymywanych wartości sygnału uchybu. Korekcja może polegać na estymacji wartości sygnału w ustalonej chwili na podstawie pomiaru dokonanego w danej chwili i w chwilach poprzednich. Zadanie takie nazywamy filtracją sygnału uchybu otrzymanego w wyniku pomiarów. Jeżeli dokonamy estymacji sygnału na podstawie jedynie pomiarów z poprzednich chwil, to zadanie nazwiemy prognozowaniem.

Prognozowanie sygnału uchybu jest tu szczególnie ważne. Pozwala na podstawie aktualnych wyników pomiarów określać przyszłe zachowania sygnału uchybu (stan w jakim znajdzie się pocisk w kolejnej fazie lotu). Pozwala to poprawić efektywność sterowania.



rysunek 2. Kąt natarcia



rysunek 3. Kąt ślizgu

3.1. Metody filtracji i prognozowania.

Filtrację i prognozowanie sygnału uchybu przeprowadzono przy użyciu następujących metod: aproksymacji wielomianami różnego stopnia (okazała się nie dość skuteczna), poprzez zastosowanie cyfrowych filtrów dolno przepustowych (rozważono zarówno zastosowanie filtrów typu FIR jak i typu IIR), oraz przy zastosowaniu cyfrowych filtrów śledzących.

Przy zastosowaniu cyfrowej filtracji sygnału uchybu należy użyć filtru dolnoprzepustowego. Zależy nam bowiem na uwypukleniu trwałych tendencji zmian sygnału uchybu i wytlumieniu jego zmian intensywnych choć krótkotrwałych. Filtracja zwykłymi filtrami cyfrowymi nie daje jednak prognozy zachowań sygnału uchybu w najbliższym czasie. Można ją uzyskać dopiero w dodatkowej procedurze (np. przez dodatkową aproksymację sygnału po przejściu przez filtr).

Dobrym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie do obróbki sygnału uchybu cyfrowych filtrów śledzących. Pozwalają one zarówno na prognozę zmian sygnału uchybu i jego pochodnej w najbliższej przyszłości. Weryfikują ponadto swe prognozy w oparciu o błędy między wartością prognozowaną sygnału uchybu, a jego wartością z pomiaru i obserwacje z wcześniejszych obliczeń. Wadą ich jest duża złożoność obliczeniowa co często wymaga zastosowania dodatkowego procesora sygnałowego na pokładzie pocisku. Spowodowane jest to tym, że procesor sterujący pracując on-line nie zawsze jest w stanie poradzić sobie z obliczeniami.

3.2. Cyfrowe filtry dolnoprzepustowe.

Filtry o skończonej odpowiedzi impulsowej (FIR).

W filtrach tego typu każda próbka sygnału wyjściowego otrzymywana jest poprzez uśrednienie m próbek sygnału wejściowego.

Równanie filtru typu FIR ma postać:

$$y(k) = c_1x(k) + c_2x(k-1) + \dots + c_mx(k-m+1)$$

gdzie: y - odpowiedź filtru

x - wymuszenie

c_i - współczynniki wagowe

k - kolejne próbki

Zaletami filtrów typu FIR jest to, że są zawsze stabilne i są odporne na błędy realizacji cyfrowej (brak efektu kumulacji błędów).

Filtry o nieskończonej odpowiedzi impulsowej (IIR).

W filtrach tego typu każda próbka sygnału wyjściowego otrzymywana jest poprzez uśrednienie m próbek sygnału wejściowego i n poprzednich próbek sygnału wyjściowego.

Równanie filtru typu IIR ma postać:

$$y(k) = c_1x(k) + c_2x(k-1) + \dots + c_mx(k-m+1) + d_1y(k-1) + d_2y(k-2) + \dots + d_ny(k-n)$$

gdzie: y - odpowiedź filtru

x - wymuszenie

c_i, d_i - współczynniki wagowe

k - kolejne próbki

Zaletą filtrów typu IIR jest to, że mogą być reprezentowane za pomocą niewielkiej liczby parametrów (zazwyczaj znacznie mniejszej niż w filtrach typu FIR). Wadą jest to, że są bardziej niż FIR wrażliwe na błędy realizacji cyfrowej.

3.3. Cyfrowe filtry śledzące.

Cyfrowe filtry śledzące są to algorytmy, które wyznaczają drogę celu na detektorze. W naszym przypadku jest to pozorna droga celu w płaszczyźnie prostopadłej do osi głównej pocisku. Zadanie to realizowane jest na podstawie otrzymywanych parametrów położenia obiektu w ustalonej chwili. Głównym zadaniem cyfrowych filtrów śledzących jest zmniejszenie błędu określenia aktualnej wartości uchybu celu oraz przewidywanie wartości uchybu celu w następnej chwili obserwacyjnej na podstawie obserwacji z danej chwili.

Równanie definiujące następujące filtry:

dla zadania filtracji

$$\hat{v}(k) = A\hat{v}(k-1) + K(k) \left[y(k) - C\hat{v}(k/k-1) \right]$$

dla zadania prognozowania

$$\hat{v}(k+1/k) = A[I - K(k)C]\hat{v}(k/k-1) + AK(k)y(k)$$

gdzie: $\hat{v}(k)$ - estymowana wartość wektora stanu w chwili k

$\hat{v}(k+1/k)$ - przewidywana wartość zmiennej stanu w chwili $k+1$ na podstawie informacji z chwili k

K - macierz wzmocnienia filtru

4. BADANIA.

4.1. Cyfrowe filtry dolno przepustowe.

Badania nad filtracją prowadzono dla różnych typów filtrów dolnoprzepustowych o różnej skali tłumienia dla składowych sygnału uchybu o wysokiej częstotliwości. Sprawdzono jak zachowuje się układ sterujący przy zastosowaniu filtrów intensywnie tłumiących sygnały wyższej częstotliwości oraz przy tłumieniu łagodnym.

Filtr nr1 opisany jest równaniem.

$$y(k) = 0.5x(k) + 0.5x(k-1)$$

Jest to filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej (FIR). Filtr nieznacznie wpływa na składowe sygnału uchybu niskiej częstotliwości. Natomiast tłum jego składowe o wyższej częstotliwości. Tłumienie narasta wraz ze wzrostem częstotliwości składowej. Dla składowych sygnału uchybu o dużej częstotliwości tłumienie jest bardzo duże.

Filtr nr2 opisany jest równaniem

$$y(k) = 0.6x(k) + 0.4x(k-1)$$

Jest to filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej (FIR). Filtr nieznacznie wpływa na składowe sygnału uchybu niskiej częstotliwości. Natomiast tłum jego składowe o wyższej częstotliwości. Tłumienie narasta wraz ze wzrostem częstotliwości składowej. Dla składowych sygnału uchybu o dużej częstotliwości tłumienie jest bardzo duże. Mniejsze jednak niż dla filtru nr1.

Filtr nr 3 opisany jest równaniem

$$y(k) = 0.068x(k) - 0.106x(k-2) + 0.318x(k-4) + 0.5x(k-5) + 0.318x(k-6) - 0.106x(k-8) + 0.068x(k-10)$$

Jest to filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej (FIR). Filtr zachowuje składowe sygnału uchybu niskiej częstotliwości. Natomiast praktycznie zupełnie tłum jego składowe o wyższej częstotliwości. Poważną wadą filtru jest korzystanie z aż dziesięciu kolejnych impulsów sygnału uchybu.

Filtr nr 4 opisany jest równaniem

$$y(k) = 0.9x(k) + 0.1y(k-1)$$

Jest to filtr o nieskończonej odpowiedzi impulsowej (IIR). Filtr nieznacznie wpływa na składowe sygnału uchybu niskiej częstotliwości. Natomiast tłumi jego składowe o wyższej częstotliwości. Tłumienie łagodnie narasta wraz ze wzrostem częstotliwości składowych sygnału uchybu. Dla składowych o wyższej częstotliwości tłumienie jest bardzo duże.

Cyfrowe filtry śledzące.

Wektor parametrów związanych z celem w chwili k

$$v(k) = [\varepsilon(k), d\varepsilon(k)/dt]$$

gdzie: $\varepsilon(k)$ - uchyb zmierzony w chwili k

$d\varepsilon(k)/dt$ - prędkość zmiany kąta uchybu w chwili k

model ruchu obiektu

$$v(k+1) = Av(k) + Bu(k)$$

model obserwacji

$$y(k) = Cv(k) + w(k)$$

$$u(k) = [u_1(k), u_2(k)]^T$$

$y(k)$ - wektor pomiarów wielkości $\varepsilon(k)$

$w(k)$ - wektor zakłóceń pomiarów

równania filtru cyfrowego

$$\hat{v}(k+1/k) = A\hat{v}(k)$$

$$\hat{v}(k+1) = A\hat{v}(k) + K(k) \left[y(k+1) - C\hat{v}(k+1/k) \right]$$

$\hat{v}(k+1/k)$ - wektor stanu z chwili $k+1$ przewidywany w chwili k

$\hat{v}(k+1)$ - estymowany wektor stanu w chwili $k+1$ na podstawie pomiarów z danej chwili i wcześniejszych

$K(k)$ - macierz wzmocnienia filtru

$$\hat{v}(1) = \begin{bmatrix} y(1) \\ \frac{1}{T} [y(1) - y(0)] \end{bmatrix}$$

Filtr α - β ze stałymi współczynnikami

$$K(k) = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ \frac{\beta}{T} & 0 \end{bmatrix}$$

Filtr określony jest następującym przekształceniem dla filtracji

$$\hat{\varepsilon}(k) = \hat{\varepsilon}(k-1) + \alpha \left[\varepsilon(k) - \hat{\varepsilon}(k/k-1) \right]$$

$$\hat{\varepsilon}(k) = \hat{\varepsilon}(k-1) + \frac{\beta}{T} \left[\varepsilon(k) - \hat{\varepsilon}(k/k-1) \right]$$

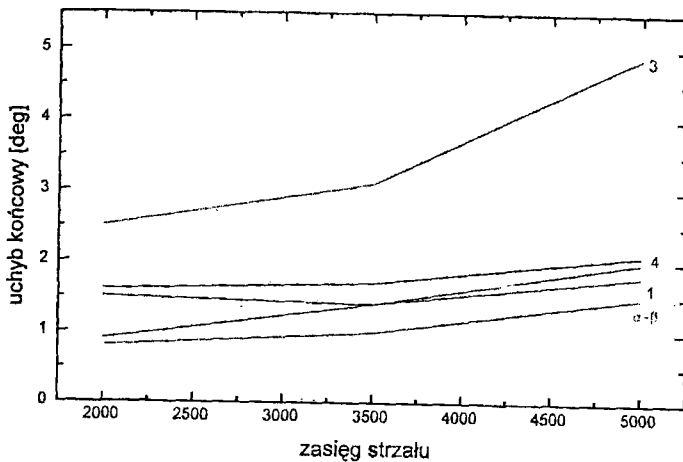
dla prognozowania

$$\hat{\varepsilon}(k+1/k) = \hat{\varepsilon}(k) + \hat{\varepsilon}(k)T$$

$$\hat{\varepsilon}(k+1/k) = \hat{\varepsilon}(k)$$

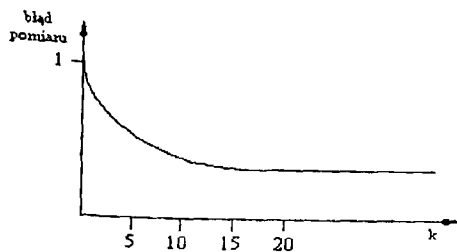
parametry α i β są wybierane z przedziału $[0,1]$

5. WNIOSKI.



rysunek 4 Wartości uchybu końcowego uzyskanego przy zastosowaniu różnych filtrów cyfrowych:

Wyniki prób symulacyjnych lotu sterowanego z zastosowaniem filtracji cyfrowej do przetwarzania sygnałów uchybu przedstawia rysunek 8. Wykres czarny przedstawia wartości uchybów końcowych uzyskane dla sterowania bez użycia filtracji cyfrowej. Jak widzimy najlepsze wyniki uzyskano używając filtr typu $\alpha-\beta$ (wykres zielony). Jakość sterowania poprawia się w granicach 20% jednak poprawa jest najmniejsza dla dużych zasięgów, gdy uchyby są największe. Filtry dolnoprzepustowe 1, 2 i 4 dały zbliżone wyniki dla lotów na średnie i duże zasięgi (wykresy żółty, niebieski i czerwony). Przy użyciu tych filtrów poprawa jakości sterowania mierzona wielkością uchybu końcowego wynosi do 10%. W przypadku użycia filtru 4 (wykres różowy) nastąpiło znaczne pogorszenie jakości sterowania. Filtr taki o stromej charakterystyce, tłumiący silnie sygnały powyżej ustalonego progu, korzysta z aż 10 kolejnych pomiarów. Jest to ilość zbyt duża w przypadku naszego systemu sterującego.



rysunek 5. zmiana wartości błędu (mierzonej w skali od 0 do 1) w zależności od liczby pomiarów k dla filtru $\alpha-\beta$.

1. Zastosowanie filtrów cyfrowych w badanym systemie dało ograniczoną poprawę dokładności naprowadzania. Dzieje się tak ze względu na zbyt małą częstość pomiaru położenia celu, co przy krótkim czasie naprowadzania daje zbyt małą ilość punktów pomiarowych między poszczególnymi impulsami sterującymi.
2. Najkorzystniejsze (spośród badanych przypadków) okazało się zastosowanie filtru śledzącego typu α - β , przy którym uzyskano najmniejsze uchyby trafienia w całym badanym zakresie zasięgu pocisku. Poprawa dokładności trafienia w stosunku do sterowania bez filtracji wynosi 20% (patrz rysunek 4).
3. Zastosowanie filtru o całkowitym tłumieniu wyższych częstości (filtr 3), korzystającego z aż dziesięciu punktów pomiarowych w badanym systemie o względnie małej częstości pomiarów, pogarsza dokładność procesu naprowadzania.
4. Filtry dolnoprzepustowe dwupunktowe (zarówno FIR jak i IIR) w badanym systemie poprawiają dokładność procesu naprowadzania o około 10%.
5. Tak niewielki wzrost jakości sterowania związany jest z nieciągłością procesu sterowania. Pomiędzy kolejnymi impulsami sterującymi głowica śledząca dokonuje od 2 do 4 pomiarów, jest to ilość zbyt mała by algorytm sterujący mógł efektywnie skorzystać z filtru (patrz rysunek 5). Po odpaleniu zaś kolejnego silnika korekcyjnego sytuacja zmienia się skokowo i informacje jakie pobrał filtr przed impulsem sterującym przestają być w pełni wartościowe.

LITERATURA

1. Vogt R., Głębocki R., Kostrow R.: Filtracja cyfrowa sygnałów sterujących lotem obiektu w warunkach niepewnej i nieciągłej informacji" VII Ogólnopolska Konferencja „Mechanika w Lotnictwie”, Warszawa 1996.
2. R. Vogt, R. Głębocki; „Logic and dynamic of spinning flying object impulse control”; International conference AVIATION-96; Wilno 1996.
3. R. Vogt, R. Głębocki; „Single channel, discontinuous control of object spatial flight”, Fifth International Symposium on Methods and Models in Automation and Robotics”, Międzyzdroje 1998.
4. R. Vogt, R. Głębocki, J. Madler; „Jednokanałowe nieciągłe sterowanie lotem przestrzennym obiektu” II Konferencja Awioniki Bieszczady 98, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 1998.