

ESTUDO DE OBSERVADORES DE ESTADO PARA SISTEMA DE DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS (FDD) EM QUADRICÓPTEROS

Márcio Tan Li¹ (IC), Yohan Alí Díaz-Méndez (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave Observadores de estado. Sistema de detecção de falhas. Quadricóptero.

Introdução

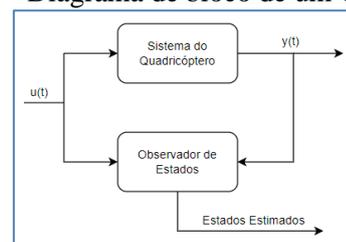
Alguns parâmetros e variáveis de um sistema no mundo real não podem ser medidos diretamente (HANGOS e RUPPERT, 2011) ou, quando medidos, possuem muito ruído e distúrbios externos (IVANOV, 2015). Alguns exemplos de sistemas com parâmetros ou variáveis que não são possíveis medir diretamente são: um sistema de propulsores de foguetes onde a temperatura interna é muito alta para ser medida diretamente, sendo apenas a temperatura exterior alcançável com sensores, e um sistema de posição relativa sem o auxílio de sistemas de posicionamento global (Global Positioning System - GPS), que utilizam acelerômetros, giroscópios e magnetômetros para estimar a posição em relação a Terra a partir de seus dados. Surge a necessidade de um observador de estado, uma ferramenta que estime o valor dos estados em um sistema de controle. Um observador de estado consegue estimar os estados de um sistema real a partir da medição de suas saídas e sinais de entrada, além disso consegue reduzir ruídos de medição causados por interferência e erro dos sensores, inclusive, estimar matematicamente os estados internos que não podem ser medidos diretamente ou simplesmente pela inexistência de um sensor físico. Em sistemas mais sofisticados como em drones quadricópteros, as propriedades supracitadas dos observadores são capazes de realizar a detecção de falhas em atuadores por meio do cálculo de um sinal residual, além de estimar suas magnitudes. O presente trabalho tem como objetivo estudar observadores de estados com potencial para trabalharem na detecção e estimação de falhas em um modelo numérico de quadricóptero. Esta iniciativa faz parte de um projeto que visa a implementação de Leis de Controle Tolerantes a Falhas (FTC) usando redundância de software ao invés da tradicional adição de hardware que consequentemente aumenta o peso e custo da aeronave.

Metodologia

Para a realização do presente trabalho necessitou-se da construção de um modelo de sistema não-linear para simular o comportamento e eficácia dos observadores estudados. Para tal, estudou-se as abordagens de modelagem aplicadas em artigos acadêmicos.

Finalmente, obteve-se o modelo matemático da aeronave do tipo quadricóptero. Realizou-se pesquisas em bibliografias sobre os observadores mais utilizados em sistemas de controle tolerantes a falhas e selecionou-se alguns para um estudo aprofundado. Analisou-se os algoritmos de cada observador/filtro para entendimento de seu comportamento e sua faixa de operação. Selecionou-se aqueles que são capazes de observar sistemas não-lineares, como o do quadricóptero, e simulou-se os filtros na presença de ruídos e com condições iniciais diferentes entre o Sistema e o observador. A partir da estimação dos estados realizada pelos observadores e filtros, estudou-se sobre a detecção e diagnóstico de falhas em sistemas reais a partir de observadores de estados. Aplicou-se falhas na simulação dos observadores a fim de testar a eficiência da detecção de falhas nestes sistemas. Os observadores de estado que foram pesquisados foram: Kalman Filter (KF), Extended Kalman Filter (EKF), Unscented Kalman Filter (UKF), Thau Observer (TO) e Adaptative Thau Observer (ATO). O funcionamento geral de um observador de estados pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de bloco de um Observador



Um observador geral de sistema não-linear possui como equação característica (CHEN e PATTON, 1999):

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + H(\hat{x}(t), u(t)) + K(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases}$$

Onde os termos com “^” são estimados pelo observador e os termos sem são os medidos do sistema real, x é o vetor de estados, y o vetor de saída, A e B as matrizes que regem a dinâmica linear do sistema, H a matriz de não-linearidades e K o ganho de observabilidade. No caso do KF desenvolvido por Rudolph Kalman (1960) e suas

variações, a estimação do estados é feita a partir do conhecimento da covariância dos distúrbios externos (Q) e ruídos (R) do tipo gaussiano de média nula, e é dividida em duas fases (previsão e correção). As equações que demonstram o cálculo do ganho de cada observador são vistas na Tabela 1. O EKF realiza a linearização do sistema não-linear através de matrizes Jacobianas (IVANOV, 2015), já de acordo com Wan e Van Der Merwe (2000) o UKF possui em seu algoritmo a *Unscented Transformation*, na qual propaga pontos selecionados através de uma função não-linear para aproximar do valor real, este executa esta transformação a cada tempo discreto. O Thau Observer é obtido através de um equação de Riccati (THAU, 1973) e é citado por Chen e Patton (1999).

Tabela 1 – Equação dos Observadores

Nome	Equações
KF	$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q$ $K_k = \frac{P_k^- C^T}{CP_k^- C^T + R}$
EKF	$P(t_k^-) = P(t_{k-1}^+)$ $+ \int_{t_{k-1}^+}^{t_k^-} (A(\tau)P(\tau) + P(\tau)A^T(\tau) + Q(\tau))d\tau$ $K(t_k) = \frac{P(t_k^-)C(t_k)^T}{C(t_k)P(t_k^-)C(t_k)^T + R(t_k)}$
UKF	$P_{\hat{y}_k \hat{y}_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [Y_{i,k k-1} - \hat{y}_k^-][Y_{i,k k-1} - \hat{y}_k^-]^T$ $P_{x_k y_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [X_{i,k k-1} - \hat{x}_k^-][Y_{i,k k-1} - \hat{y}_k^-]^T$ $K = P_{x_k y_k} P_{y_k y_k}^{-1}$
TO e ATO	$A^T \gamma + \gamma A - C^T C + \kappa C^T \gamma = 0$ $K = \gamma^{-1} C^T$

Os observadores descritos podem ser utilizados para a detecção de falhas a partir da diferença entre as respostas do sistema real e do observador. Uma vez que o observador irá se comportar como um sistema ideal. Caso o sistema real tenha alguma falha, sua saída será diferente da saída esperada pelo observador, esta diferença de valores irá detectar uma falha. Assim como utilizado por Nguyen e Hong (2019) e por Freddi e Monteriu (2009), o *Thau Observer* original foi utilizado na detecção de falhas de um quadricóptero, testou-se sua resposta para verificar se sua estimação estava correta e se este detectava uma falha. Para realizar a estimação da falha detectada, o *Adaptative Thau Observer* adiciona ao seu algoritmo original uma parcela que irá estimar a falha para que o observador siga o sistema defeituoso. A equação do ATO é (CEN, NOURA e YOUNES, 2015):

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x}(t) + Bu(t) + H(\hat{x}(t), u(t)) + F\hat{f}(t) + K(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases}$$

onde F é a matriz de entrada da falha que representa sua posição. A falha estimada pode ser calculada como (CEN, NOURA e YOUNES, 2015):

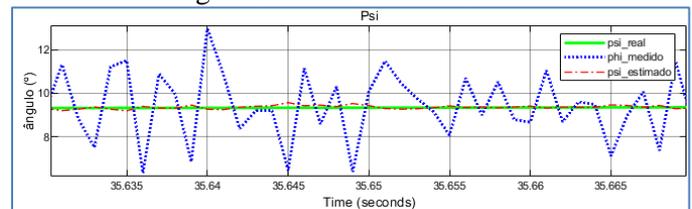
$$\hat{f}(t) = \Gamma G(y(t) - \hat{y}(t)) - \sigma \Gamma \hat{f}(t)$$

onde $\Gamma = \Gamma^T > 0$ é uma matriz de pesos, σ é uma constante positiva que satisfaz $\sigma > \lambda_{\max}(\Gamma^{-1}) > 0$, na qual $\lambda_{\max}(\cdot)$ é o maior autovalor da matriz correspondente.

Resultados e discussão

Para a realização das simulações foi utilizado o software Matlab/Simulink®, os parâmetros do sistema foram definidos em um script do Matlab e exportados para o Simulink. Como o KF comum não foi possível realizar a simulação no modelo do quadricóptero, pois este observador apenas estima os estados de sistemas lineares. Na Figura 2 é possível observar o resultado da simulação do EKF na estimação de um dos ângulos de um quadricóptero, é adicionado um ruído branco na saída medida.

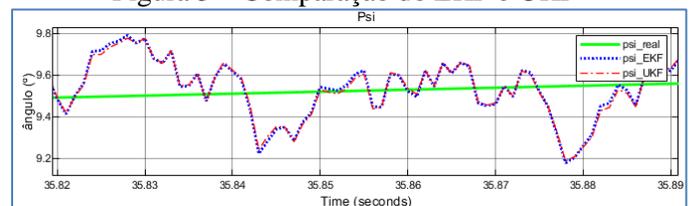
Figura 2 – Resultado do EKF



O sinal em azul é o sinal medido diretamente do sistema real do drone, o sinal em verde é o sinal real puro sem distúrbios e o vermelho o sinal estimado pelo EKF. Nota-se que estimação realizada é ótima, reduz o ruído de medição e fornece valores mais confiáveis.

O próximo observador que foi simulado foi o UKF, as condições do sistema real foram as mesmas do EKF e seus resultados foram comparados. Nota-se que seus resultados são parecidos, o UKF conseguem uma redução de ruído levemente melhor que comparado ao EKF, isso se deve ao fato do processamento do UKF ser levemente melhor que o do EKF devido a não necessidade de linearização do sistema a cada instante de tempo ou cálculo de matriz Jacobiana (Figura 3).

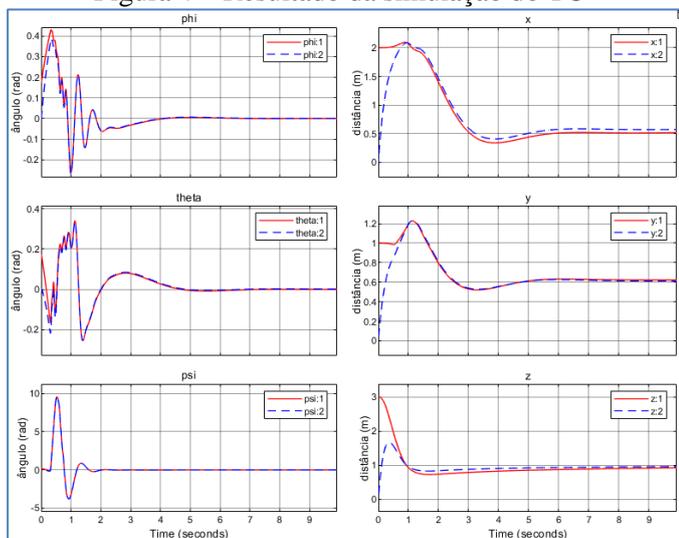
Figura 3 – Comparação do EKF e UKF



O problema que envolveu o Filtro de Kalman é que ele trabalha em tempo discreto e necessitava de linearização

do sistema, como feito pelo EKF e UKF. Para contornar tais problemas, no teste de detecção e diagnóstico de falhas utilizou-se o *Thau Observer* que trabalha em tempo contínuo e com sistemas não-lineares. Assim, foi simulado o comportamento do TO utilizando um controlador PID para modificar a posição do drone para a desejada (Figura 4 e 5). Os ângulos de Euler e as posições iniciais do drone real foram ajustadas diferentes do observador para observar a convergência dos sinais, mostrando-se efetivo.

Figura 4 – Resultado da simulação do TO



Conclusões

Com o presente trabalho foi possível observar a importância e funcionalidade dos observadores de estados em sistemas de controle. Conclui-se que em sistemas reais surge a necessidade de se utilizarem observadores uma vez que as saídas reais são medidas com sensores que estão sujeitos a ruídos, além dos distúrbios externos que podem atrapalhar na dinâmica desejada. Os filtros e observadores colaboram reduzindo os ruídos parasitas e fornecendo valores mais confiáveis dos que os reais. Os observadores participam ativamente em sistemas de detecção e diagnóstico de falhas (FDD), representando o comportamento ideal “esperado” do sistema sem falha e detecta variações a partir da diferença entre os sinais reais e estimados. Estimar o valor da magnitude da falha é de grande importância para que o sistema de controle possa ser reconfigurado de acordo com a sua gravidade, o que pode reduzir prejuízos e manter a integridade física do Sistema (drone) e das pessoas ao redor. Além disso, espera-se que controladores robustos e adaptativos usados em FTC sejam mais eficientes quando alimentados com estados sem ruídos e mais reais por meio da estimativa mais precisa da dinâmica do quadricóptero com falhas.

Agradecimento

Agradecimento à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) que por meio do projeto APQ-01656-21 e Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) possibilitaram o tema e a bolsa de pesquisa que deu suporte ao presente trabalho.

Referências

IVANOV, Radoslav. State Estimation Filters. **Department of Computer and Information Science, Philadelphia**. 2015.

WAN, Eric A.; VAN DER MERWE, Rudolph. The unscented Kalman filter for nonlinear estimation. **Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No. 00EX373)**. Ieee, 2000. p. 153-158.

KALMAN, Rudolph Emil. A new approach to linear filtering and prediction problems. 1960.

THAU, F. E. Observing the state of non-linear dynamic systems. **International journal of control**, v. 17, n. 3, p. 471-479, 1973.

DÍAZ-MÉNDEZ, Yohan et al. Conditional integrator sliding mode control of an unmanned quadrotor helicopter. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering**, v. 236, n. 3, p. 458-472, 2022.

Jie Chen and Ron J Patton. Fault diagnosis of non-linear dynamic systems. **Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems**, pages 251–295. Springer, 1999.

CEN, Zhaohui; NOURA, Hassan; YOUNES, Younes Al. Systematic fault tolerant control based on adaptive Thau observer estimation for quadrotor UAVs. **International Journal of Applied Mathematics and Computer Science**, v. 25, n. 1, 2015.

NGUYEN, Ngoc Phi; HONG, Sung Kyung. Fault diagnosis and fault-tolerant control scheme for quadcopter UAVs with a total loss of actuator. **Energies**, v. 12, n. 6, p. 1139, 2019.

FREDDI, A.; LONGHI, S.; MONTERIU, A. A model-based fault diagnosis system for a mini-quadrotor. **7th workshop on Advanced Control and Diagnosis**. 2009. p. 19-20.

HANGOS, Katalin M.; RUPPERT, L. State estimation methods using indirect measurements. **Quantum Probability and Related Topics**. 2011. p. 163-180.