

МОДЕЛ НА ОТКАЗОЧУВСТВИТЕЛНА КАЛМАНОВА ФИЛТРАЦИЯ ЗА ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ОТКАЗИ В РАДИОКАНАЛИТЕ НА БЛА

Филип Илиев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: fgi@mail.bg

Ключови думи: БЛА (Безпилотен летателен апарат), Калманова филтрация, идентификация на откази, отказоустойчива филтрация, радиоканали, устойчива оценка

Резюме: Устойчивостта на радиоканалите за управление, която е критична за безопасната експлоатация, представлява основополагащ фактор за ефективното функциониране на безпилотни летателни апарати (БЛА). В статията е предложен концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация, който съчетава класическите методи за оптимално оценяване със специализирани механизми за идентификация и локализация на откази в радиоканалите. Моделът е ориентиран към повишаване на надеждността и устойчивостта при управлението на БЛА в реални условия, като в допълнение са разгледани възможностите за многоканална обработка и интеграция на диагностични блокове, които позволяват не само откриване, но и адаптивна реакция спрямо аномалии.

MODEL OF FAULT-TOLERANT KALMAN FILTERING FOR FAULT IDENTIFICATION IN UAV RADIO CHANNELS

Filip Iliev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: fgi@mail.bg

Keywords: UAV (Unmanned Aerial Vehicle), Kalman filter, fault detection, fault-tolerant filtering, radio channel failures, resilient estimation

Abstract: The resilience of control radio channels, being critical for operational safety, represents a fundamental determinant in the efficient functioning of unmanned aerial vehicles (UAVs). This paper proposes a conceptual model of fault-tolerant Kalman filtering that combines classical optimal estimation methods with specialized mechanisms for fault identification and localization in radio channels. The model is oriented toward enhancing the reliability and robustness of UAV control in real-world conditions, while additionally considering the possibilities for multi-channel processing and the integration of diagnostic blocks that enable not only fault detection but also adaptive response to anomalies.

Въведение

Устойчивостта на каналите за радиоуправление е ключов фактор за сигурността и ефективността при използване на БЛА. Радиоканалите често са подложени на смущения, загуби на пакети или внезапни откази, които могат да доведат до влошаване на управлението, загуба на информация или до прекъсване на мисията. Това налага разработването на методи за своевременно откриване и идентификация на откази.

Класическата Калманова филтрация е доказан инструмент за оценка на състоянието на динамични системи в условия на шумове [1]. Въпреки това, тя е чувствителна към аномалии и откази в измервателните канали, което води до значителни грешки. Съвременните подходи за отказоустойчива филтрация предлагат резервиране, мултисензорна интеграция или адаптивни алгоритми, но често са с висока изчислителна сложност и ограничена ефективност при резки промени [3, 6].

Настоящата статия предлага **концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация**, комбиниращ многоканална дискретна филтрация с диагностични механизми, чувствителни към аномалии.

Постановка на проблема

Моделът се основава на синтез на алгоритми за многоканална дискретна филтрация с явно отчитане на динамиката на отказите, комбиниран с диагностични филтри, чувствителни към скокообразни изменения на параметрите. В рамките на предложената концепция се разглеждат три класа модели на параметрични откази – постоянни, случайни и Марковски, което позволява адаптивна модификация на коефициентите на Калман [4] в зависимост от надеждността на всеки канал. Концептуалният модел обединява задачите за идентификация на откази и оценяване на състоянието, осигурявайки устойчивост при аномалии като загуба на пакети, смущения или внезапна деградация на измервателните канали. Разгледани са и изчислителните аспекти на подхода, включително методи за намаляване на сложността при запазване на точността на оценяване. Предложеният модел създава основа за бъдещо развитие на отказоустойчиви архитектури за комуникация и управление при БЛА.

Калмановата филтрация представлява рекурсивен алгоритъм за оптимално оценяване на вътрешното състояние на динамични системи в условията на шум и неопределеност [2]. Основната ѝ цел е да осигури най-добра апостериорна оценка на състоянието на системата, като съчетава информацията от математическия модел на динамиката и наличните измервания. В този контекст оценката на състоянието се изчислява по формулата:

$$(1) \quad \hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - H\hat{x}_{k|k-1}) ,$$

където:

- $\hat{x}_{k|k-1}$ е прогнозата на състоянието;
- K_k е матрицата на усилването;
- y_k е измерването;
- H е матрицата на наблюдението.

При наличие на нелинейности, стандартният филтър се заменя с разширен Калманов филтър [5], при който оценката се актуализира чрез линеаризация около работната точка:

$$(2) \quad \hat{x}_{k|k} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}) + K_k (y_k - h(\hat{x}_{k|k-1})) ,$$

където $f(\cdot)$ и $h(\cdot)$ описват съответно нелинейната динамика и нелинейното измерване.

За повишаване на устойчивостта при резки изменения може да се използва и експоненциално-претеглена Калманова филтрация [7], при която функцията на загубата е модифицирана:

$$(3) \quad J(\hat{x}_k) = \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} (y_i - H\hat{x}_{i|i-1})^2 ,$$

тук $\lambda \in (0,1]$ е коефициент на „забравяне“, който придава по-голяма тежест на по-новите измервания.

Тези модификации подготвят основата за въвеждане на отказочувствителни механизми, чрез които филтърът не само оценява състоянието, но и открива аномалии в работата на каналите. Такива механизми включват използването на индикатори за надеждност на измерванията, адаптивно пренастройване на Калмановото усилване и теглата при многоканално агрегиране, както и моделиране на отказите чрез вероятностни променливи. Комбинацията от тези подходи позволява на диагностичния блок да идентифицира и локализира откази, докато алгоритъмът динамично коригира своето поведение. По този начин системата запазва стабилността и точността на оценяването дори при наличие на шум, загуба на пакети или функционален отказ на радиоканалите.

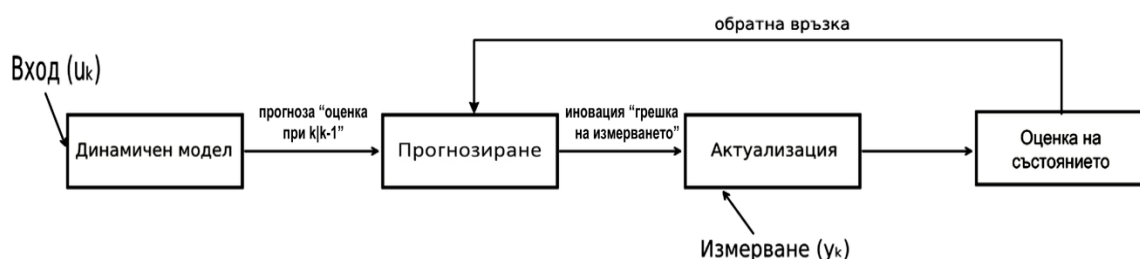
Концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация

Класическата Калманова филтрация осигурява надеждно оценяване при нормални условия, но остава уязвима при наличие на откази и аномалии. Включването на диагностични механизми и адаптивни стратегии открива възможност за изграждане на по-устойчива методологична рамка. На тази основа е предложен концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация, който интегрира оценяването и диагностиката в единен процес, пригоден за работа в условия на ненадеждни радиоканали при управление на БЛА.

Структурната организация на модела в най-общ вид запазва последователността на етапите: *прогнозиране – актуализация – оценка на състоянието*, като паралелно с тях работи **диагностичен блок**. Този блок следи за наличие на аномалии в радиоканалите и в случай на установен отказ предизвиква адаптивна промяна на коефициентите на филтъра. По този начин се осигурява непрекъснатост на оценяването и устойчивост на алгоритъма при наличие на шум, загуби или пълни откази в каналите за радиоуправление.

Основата на модела следва логиката на класическата Калманова филтрация, където се разграничават следните етапи:

- *Прогнозиране* – извършва се прогноза на състоянието на базата на динамичния модел на БЛА и наличните входни сигнали;
- *Актуализация* – прогнозата се коригира чрез наличните измервания, като се използва Калмановото усилване;
- *Оценка на състоянието* – получава се оптимална оценка на текущото състояние.

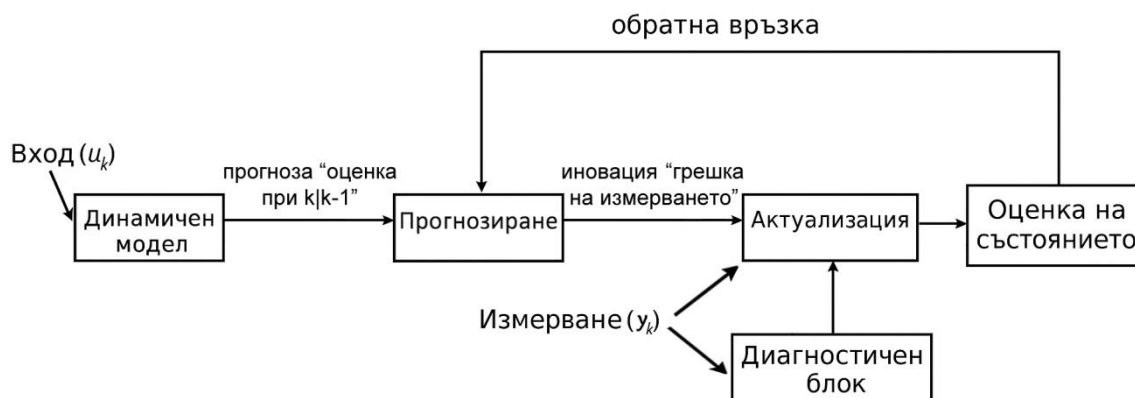


Фиг. 1. Класическа Калманова филтрация

Новото в концептуалния модел е, че към тези класически етапи е добавен **диагностичен блок**, който функционира паралелно и взаимодейства с останалите компоненти. По този начин се формира интегрирана рамка за едновременно оценяване и диагностика.

Диагностичният блок е ключов елемент, който отличава отказочувствителната Калманова филтрация от класическата. Неговата функция е да следи за:

- *аномалии в измерванията* – рязко отклонение на иновацията (разликата между реалното измерване и предсказаното измерване от модела);
- *увеличаване на шумовата ковариация* – признак за деградация на канала;
- *липса на данни (packet loss)* – моделируемо чрез бинарни индикатори $\gamma_i(k)$.



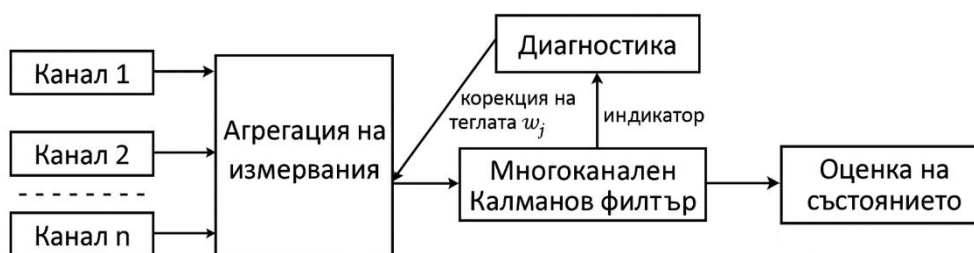
Фиг. 2. Отказочувствителна Калманова филтрация

При наличие на съмнение за отказ, диагностичният блок може да предизвика:

- адаптивно пренастройване на Калмановото усилване K_k (Kalman gain) – ключовият коефициент, който определя каква тежест се дава на измерванията спрямо прогнозата;
- промяна на ковариациите R и Q на процесния шум и на измервателния шум, които могат да се адаптират според диагностицираните откази;
- корекция на теглата w_j в многоканален сценарий – при агрегиране на измервания от няколко радиоканала, теглата на всеки канал се адаптират (намаляват/нулират) при наличие на отказ.

Така диагностичният блок не е пасивен наблюдател, а активен регулатор, който осигурява устойчивост на алгоритъма.

В реални условия радиоуправлението на БЛА често разполага с множество комуникационни канали или сензори. Концептуалният модел обединява техните измервания чрез **агрегационен блок**, където всеки канал има тегло w_j . При нормална работа теглата са приблизително равномерни, но при установен отказ теглото на съответния канал се редуцира или занулява. На фиг. 3 е представена структурата на многоканална филтрация с възможност за *изключване/понижаване на тежестта* на отказал канал.



Фиг. 3. Структура на многоканална филтрация с адаптивно управление на теглата

Тази адаптивна схема позволява да се намали влиянието на дефектен канал върху общата оценка и се увеличи ролята на надеждните канали, като се постигне устойчива оценка дори при частична загуба на комуникация.

Комбинацията от агрегация и диагностика превръща многоканалния вариант в особено подходящ за реални приложения, където отказите не са изключение, а очаквано събитие.

Посредством схемите за описание на концептуалния модел се визуализира преминаването от базов модел към усъвършенствана архитектура, която интегрира диагностика, адаптация и устойчиво оценяване.

Приложимост на модела

Предложеният концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация има потенциал за широко приложение в различни области, където надеждността на данните и устойчивостта на алгоритмите са критично важни. При безпилотните летателни апарати надеждността на радиоканалите е пряко свързана с безопасността и устойчивостта на управлението [8]. Предложеният модел позволява своевременно откриване и компенсиране на загуби на пакети, смущения или пълни откази на каналите. Това гарантира запазване на управляемостта и стабилността на полета дори в условия на влошена комуникационна среда.

Концептуалният модел е приложим и в системи, които използват множество сензори за измерване на едни и същи или свързани параметри [9]. Чрез механизма на теглата w_j е възможно динамично адаптиране към качеството на данните от всеки сензор. Това позволява надеждно оценяване дори при повреда на отделни датчици и повишава устойчивостта на цялата система. В комуникационни системи с излишък от канали или пътища за пренос, отказочувствителната Калманова филтрация може да служи като механизъм за интелигентна селекция и приоритизация. При наличие на канали с повишено ниво на шум или такива, които са компрометирани, алгоритъмът редуцира тяхното влияние, като запазва високото качество на агрегирания сигнал. Това е особено важно в приложения като телекомуникации, навигация и мрежи за наблюдение.

Освен в горепосочените области, моделът може да бъде комбиниран с адаптивни и нелинейни филтри, което да позволи работа и при по-сложни динамики. Така отказочувствителният подход се превръща в универсален инструмент за оценяване в условия на несигурност и частични откази.

Ограничения на модела

Въпреки предимствата си, предложеният концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация притежава някои съществени ограничения [10]:

- *Зависимост от статистическите модели на отказите* – ефективността на диагностичния механизъм и адаптивната актуализация е силно обвързана с точността на априорно зададените вероятностни модели на отказите. При несъответствие между теоретичните модели и реалните проявления на аномалиите съществува риск от влошаване на качеството на оценката;
- *Необходимост от оптимизация за работа в реално време* – въвеждането на диагностични блокове, адаптивни коефициенти и многоканална обработка повишава изчислителната сложност спрямо класическата Калманова филтрация. Това поставя предизвикателства при интеграция в бордови системи на БЛА, където ресурсите са ограничени и се изисква надеждна работа в реално време.

Тези ограничения определят направления за бъдещи изследвания, свързани с *усъвършенстване* на механизмите за автоматично обучение на статистическите модели на откази и *разработка* на оптимизирани алгоритми за бърза и ефективна реализация.

Заклучение

Предложеният концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация интегрира процесите на диагностика и оценяване в единна методологична рамка. Чрез въвеждане на вероятностни модели на откази (напр. променливи за загуба на измервания, увеличена ковариация на шумовете или системен дрейф) и прилагане на адаптивна актуализация на Калмановото усилване, ковариациите и теглата при многоканално агрегиране, моделът осигурява повишена устойчивост на оценките при наличие на аномалии в радиоканалите. По-нататъшните изследвания може да бъдат насочени към разработване на симулационна среда за оценка при различни сценарии на откази, комбиниране с адаптивни и нелинейни филтри, и експериментално валидиране в реални условия с безпилотни летателни апарати.

Разгледаната приложимост показва, че подходът е подходящ не само за радиоуправление на БЛА, но и за мултисензорни системи и многоканални комуникационни среди. Предимството на модела е неговата гъвкавост, която позволява интеграция с различни архитектури и разширяване към по-сложни динамични сценарии. По този начин се поставя основата за практическа реализация на отказочувствителна Калманова филтрация, способна да повиши надеждността и безопасността на критични системи за управление.

Литература:

1. Kalman, R. E., "A new approach to linear filtering and prediction problems", *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45, 1960
2. Maybeck, P. S., *Stochastic Models, Estimation, and Control*, Academic Press, 1979
3. Chen W., and R. J. Patton, *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1999
4. Li, X. R., and V. P. Jilkov, "Survey of maneuvering target tracking. Part I: Dynamic models", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 4, pp. 1333–1364, 2003
5. Simon, D., *Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches*, Wiley-Interscience, 2006.
6. Андонов, А., *Радиокомуникационни системи със специално предназначение*, С.: ВТУ "Т.Каблешков", 2009, 300 с.; ISBN 078-954-12-0167-1
7. Mustaev, A., et al., "A switching Kalman filter approach to online mitigation and correction of sensor corruption for inertial navigation", *arXiv preprint*, 2024
8. "Cooperative Positioning Method of a Multi-UAV Based on an Adaptive Fault-Tolerant Federated Filter", *Sensors*, 2023
9. Kheirandish, A., A. Mohammadi, et al., "Fault-Tolerant Sensor Fusion in Mobile Robots Using Multiple Model Kalman Filters," *Robotics and Autonomous Systems*, 2023
10. Kinatas, H., and C. Hajiyeve, "Adaptive Fault-Tolerant Multiplicative Attitude Filtering for Small Satellites", *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 39, no. 1, pp. 152–162, 2025, <https://doi.org/10.1002/acs.3927>