

СИНТЕЗ НА КАНАЛНО-СЪГЛАСУВАНИ СИГНАЛИ ЗА РАДИОУПРАВЛЕНИЕ НА БЛА

Филип Илиев, Георги Сотиров

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: fgi@mail.bg; GSotirov@mail.space.bas.bg*

Ключови думи: БЛА (Безпилотен летателен апарат), радиоуправление, синтез на сигнали, канали за управление, отказоустойчива филтрация, надеждност, адаптивни алгоритми

Резюме: Надеждността на радиоканалите за управление е критичен фактор за сигурността и ефективността на безпилотните летателни апарати (БЛА). В условията на шумове, загуби на пакети и откази на канали, класическите методи за генериране на управляващи сигнали често водят до влошено качество на управление и риск от прекъсване на мисията. В статията е предложен подход за синтез на сигнали, съгласувани с характеристиките на радиоканалите, който интегрира модели на канали с вероятностни откази и адаптивни механизми за оптимизация. Методът използва динамично адаптиране на управляващите сигнали към текущото състояние на комуникационната среда, като по този начин се повишава устойчивостта и точността на управлението.

SYNTHESIS OF CHANNEL-MATCHED SIGNALS FOR UAV RADIO CONTROL

Filip Iliev, Georgi Sotirov

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: fgi@mail.bg; GSotirov@mail.space.bas.bg*

Keywords: UAV (Unmanned Aerial Vehicle), radio control, signal synthesis, control channels, fault-tolerant filtering, reliability, adaptive algorithms

Abstract: The reliability of radio control channels is a critical factor for the safety and efficiency of unmanned aerial vehicles (UAVs). Under conditions of noise, packet loss, and channel failures, classical methods for generating control signals often lead to degraded performance and potential mission interruption. This paper proposes an approach for channel-matched synthesis of control signals, which integrates probabilistic channel fault models with adaptive optimization mechanisms. The method uses dynamic adjustment of control signals according to the current state of the communication environment, thereby enhancing the robustness and accuracy of UAV control.

Въведение

Надеждността на радиоканалите за управление е ключов фактор за ефективността и безопасността при експлоатацията на безпилотни летателни апарати (БЛА). Радиоканалите, използвани за предаване на управляващи команди и телеметрични данни, са подложени на смущения – шумове, загуба на пакети, многолъчево разпространение и закъснения, които могат да доведат до влошаване на управлението или до отказ на комуникационната връзка [8, 9]. Класическите методи за генериране на управляващи сигнали, основани на фиксирани параметри, често не осигуряват достатъчна надеждност при такива условия [9].

Съвременните подходи за управление на БЛА изискват адаптивност към динамичната комуникационна среда [5, 10]. В този контекст възниква необходимост от методи за синтез на управляващи сигнали, съгласувани с характеристиките на радиоканалите, така че да се гарантира устойчива и непрекъсната комуникация [8, 10].

В съответствие с изследванията в областта на отказочувствителната филтрация [1, 7], настоящата работа предлага подход за *канално-съгласуван синтез на управляващи сигнали*,

който обединява моделиране на радиоканали с вероятностни откази и адаптивна оптимизация на управляващите въздействия, целящи повишаване на устойчивостта и точността на управлението на БЛА в реални условия.

1. Теоретични основи и постановка на задачата

Ефективният синтез на управляващи сигнали за безпилотни летателни апарати (БЛА) изисква адекватно моделиране на радиоканалите, чрез които се осъществява обменът на команди и данни. Радиоканалът представлява стохастична среда, в която сигналът се подлага на затихване, фазови и амплитудни изкривявания, шум и възможни временни прекъсвания [8, 9]. Тези фактори водят до изменчивост на параметрите на комуникационния тракт, което налага включването им в общия модел на системата за управление [5].

1.1. Математически модел на радиоканала

Да разгледаме система за радиоуправление на БЛА, в която командният сигнал $u(k)$ се предава през комуникационен канал и се приема в бордовия контролер под формата на сигнал $y(k)$. Поведението на радиоканала може да се опише чрез линейно стохастично уравнение от вида:

$$(1) \quad y(k) = \alpha(k)u(k - \tau_k) + v(k) ,$$

където: $\alpha(k)$ е коефициентът на предаване (амплитудна характеристика) на канала, който може да варира във времето поради затихване или смущения; τ_k е променливото времево закъснение, отразяващо динамичните промени в средата на разпространение; $v(k)$ е адитивен шум, моделируем като гаусов процес с нулево средно значение и дисперсия $R_v(k)$.

Подобен тип стохастични модели са широко използвани при описанието на комуникационни канали и системи за управление [1, 2, 8].

При наличие на откази или временна загуба на пакети, коефициентът $\alpha(k)$ може да приема стойност 0 (липса на сигнал), което се моделира чрез бинарна променлива $\delta(k) \in \{0,1\}$, определяща състоянието на канала:

$$(2) \quad y(k) = \delta(k)\alpha(k)u(k - \tau_k) + v(k) ,$$

като вероятността за изправно състояние на канала е $P[\delta(k)=1] = p_c$, а за отказ $P[\delta(k)=0] = 1 - p_c$. Такъв вероятностен подход за моделиране на откази е типичен в отказочувствителните архитектури [3, 4, 7].

В многоканален сценарий, характерен за БЛА с резервирани радиолинии или комбинирани комуникационни модули, моделът се обобщава до векторна форма:

$$(3) \quad \mathbf{y}(k) = \mathbf{D}(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{u}(k - \boldsymbol{\tau}_k) + \mathbf{v}(k) ,$$

където $\mathbf{D}(k) = \text{diag}[\delta_1(k), \delta_2(k), \dots, \delta_M(k)]$ е диагонална матрица на изправностите на каналите, а $\mathbf{H}(k)$ е матрица на коефициентите на предаване.

Подобни многомоделни и векторни представяния са подробно разгледани в [5, 10] и служат като основа за адаптивно управление при вероятностни откази.

1.2. Модел на системата за управление

Нека динамиката на БЛА се опише чрез стандартен дискретен модел на състоянието:

$$(4) \quad \begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \boldsymbol{\Phi}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k) \\ \mathbf{z}(k) &= \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{n}(k) \end{aligned} ,$$

където: $\mathbf{x}(k)$ е векторът на състоянието; $\mathbf{u}(k)$ е управляващият сигнал, генериран от наземната станция; $\mathbf{z}(k)$ – измерванията на борда; $\mathbf{w}(k)$ и $\mathbf{n}(k)$ – шумове на процеса и измерването, моделирани като независими гаусови процеси.

Такъв вид формулировка е характерна за класическата Калманова филтрация [1–3], която осигурява оптимално оценяване при стохастични смущения.

Тъй като реалният управляващ сигнал, достигнал до борда, е изкривен от радиоканала, ефективното управление трябва да се основава на сигнал $\mathbf{u}(k)$, който отчита текущото състояние на канала:

$$(5) \quad \mathbf{u}(k) = \mathbf{F}[\mathbf{u}(k), \mathbf{D}(k), \mathbf{H}(k), \mathbf{R}_v(k)] ,$$

където функцията $\mathbf{F}(\cdot)$ описва алгоритъма на *канално-съгласувания синтез*.

Интегрирането на такава функция в управлението е характерно за съвременните адаптивни методи [6, 8].

1.3. Формулировка на задачата за синтез

Задачата за синтез на канално-съгласувани сигнали се състои в определяне на оптимален управляващ вектор $\mathbf{u}^*(k)$, който минимизира функционал (критерий за оптимизация) от вида:

$$(6) \quad J = E \left\{ \sum_{k=0}^N \|\mathbf{x}(k) - \mathbf{x}_r(k)\|_Q^2 + \|\mathbf{u}(k)\|_R^2 \right\} ,$$

при наличие на случайни вариации в параметрите на канала $\mathbf{D}(k)$, $\mathbf{H}(k)$ и шумовете $\mathbf{v}(k)$. Този тип квадратични функционали произлизат от теорията на оптималното управление и Калмановата филтрация [1–3].

Оптималният закон за управление следва да осигурява минимално средноквадратично отклонение на траекторията на БЛА от референтната, при запазване на устойчивост и компенсиране на ефектите от откази и деградации в каналите [4, 6].

В този контекст синтезът може да бъде разглеждан като двустепенен процес, включващ:

- *Диагностика и оценка на състоянието на каналите*, реализирана чрез отказочувствителна или многоканална филтрация;
- *Адаптивна корекция на управляващите сигнали* в зависимост от получените вероятностни оценки на надеждността на каналите.

Реализацията на този процес позволява не само компенсиране на загуби на пакети и шумове, но и осигурява предсказуемо и устойчиво управление, съгласувано с динамично изменящите се комуникационни условия.

2. Метод за синтез на канално-съгласувани сигнали

Предложеният на фиг. 1 метод комбинира диагностична оценка на радиоканалите с адаптивна оптимизация на управляващите команди и включва *три основни етапа*: оценка на каналите, формиране на комбиниран сигнал и локална оптимизация.

Етап 1 – оценка на състоянието на каналите

В този етап се извършва диагностика на комуникационната среда чрез оценка на текущите коефициенти на предаване $\mathbf{H}(k)$, вероятностна оценка на изправността на каналите $P[\delta_i(k) = 1]$ и изчисляване на дисперсията на шумовете $\hat{R}_{v,i}(k)$.

За целта се използва модифициран Калманов филтър с отказочувствителна корекция, който позволява едновременно оценяване на динамичните параметри на канала и вероятностите за отказ [1, 4, 6]. Получените оценки служат като вход за следващия етап.

Етап 2 – тегловна комбинация на управляващите сигнали

Поради възможното наличие на множество паралелни радиоканали, всеки с различна надеждност и шумови характеристики, управляващият сигнал се формира като претеглена комбинация:

$$(7) \quad \tilde{u}(k) = \sum_{i=1}^M w_i(k) u_i(k) ,$$

където теглата $w_i(k)$ се определят на базата на вероятностната оценка на изправността и качеството на канала:

$$(8) \quad w_i(k) = \frac{P[\delta_i(k)=1]}{\sum_{j=1}^M P[\delta_j(k)=1]} \cdot f(\hat{R}_{v,i}(k)) .$$

Този принцип на тегловно комбиниране е свързан с мултимоделните и адаптивни методи за обработка на сигнали [5, 10], при които различни канали или модели допринасят пропорционално на тяхната надеждност.

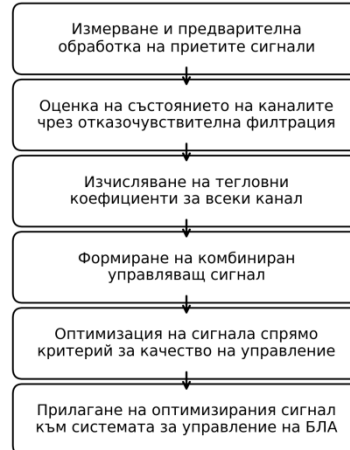
Функцията $f(\cdot)$, отчитаща влиянието на шума и затихването, е базирана на принципите за адаптивно разпределение на тегловите коефициенти в отказоустойчиви архитектури [9], като каналите с по-висока надеждност и по-ниска шумова компонента получават по-голяма тежест в синтеза на управляващия сигнал.

Етап 3 – оптимизация

Финалният синтезиран сигнал $\tilde{u}(k)$ се оптимизира спрямо критерий за минимизация на отклонението от референтната траектория и разхода на управляваща енергия:

$$(9) \quad u^*(k) = \arg \min_{u(k)} E \left\{ \|x(k) - x_r(k)\|_Q^2 + \|\tilde{u}(k)\|_R^2 \right\} .$$

Оптимизацията се извършва в реално време чрез адаптивен итеративен алгоритъм, който използва текущите оценки на каналите [6, 10]. Това позволява динамична корекция на управляващите въздействия при промени в комуникационната среда.



Фиг. 1. Алгоритмична последователност на метода за синтез на канално-съгласувани сигнали

3. Приложение към многоканални системи за радиоуправление на БЛА

Многоканалните системи за радиоуправление на БЛА повишават надеждността чрез използване на няколко паралелни радиолинии, работещи на различни честоти или протоколи, което компенсира локални откази и шумове [5, 7, 8]. Това осигурява по-голяма устойчивост срещу загуби на пакети и интерференция [9, 10].

3.1. Моделиране на многоканална архитектура

Нека системата разполага с M независими канала за предаване на управляващи сигнали, като всеки канал i се описва чрез коефициент на предаване $\alpha_i(k)$, вероятност за отказ $P[\delta_i(k)=0]$ и шумова дисперсия $R_{v,i}(k)$.

Моделът на многоканалното управление е:

$$(10) \quad \mathbf{y}(k) = \mathbf{D}(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{u}(k - \tau_k) + \mathbf{v}(k) ,$$

където векторът $\mathbf{u}(k)$ съдържа управляващите команди, изпратени паралелно по отделните канали. Моделът съответства на мултимоделните подходи за управление на системи с променлива надеждност [5, 9], както и с методите за оценка на състоянието на комуникационни канали при БЛА [8].

3.2. Механизъм за избор и комбиниране на канали

В рамките на многоканалната архитектура, предложеният метод реализира адаптивен механизъм за управление на комуникационните ресурси, който включва динамичен избор на активни канали според текущата им надеждност. Каналите с висока вероятност за отказ се изключват от процеса на синтез, като управляващите сигнали се разпределят чрез тегловна комбинация, отчитаща оценената шумова устойчивост и функционална достъпност на всеки канал [7, 9, 10].

По този начин се минимизира рискът от едновременно отказ и се осигурява устойчивост на управлението в условия на комуникационна несигурност [8].

Формираният комбиниран сигнал е:

$$(11) \quad \tilde{u}(k) = \sum_{i=1}^M w_i(k) u_i(k), \quad \sum_{i=1}^M w_i(k) = 1 ,$$

като теглата $w_i(k)$ се актуализират в реално време според оценките на състоянието на каналите [10].

3.3. Сценарии за приложение

Предложеният многоканален подход позволява реализация на различни стратегии за управление на комуникационните ресурси, съобразени с конкретните условия на експлоатация и надеждност на каналите [7–9].

Сред основните сценарии се открояват:

- *Резервирани канали (hot-standby)* – системата поддържа няколко канала, при което по основния се предават управляващите команди, а резервните остават в режим на готовност. При засичане на отказ или влошаване на основния канал, трафикът автоматично се прехвърля към най-надеждния резервен канал, без прекъсване на управлението [9].
- *Паралелно комбиниране (load sharing)* – управляващите команди се разпределят едновременно между няколко активни канала. Тегловните коефициенти се определят според моментната им надеждност и качество на връзката, което минимизира вероятността от загуба на данни и подобрява устойчивостта на управлението [10].
- *Адаптивен избор на канал* – системата извършва непрекъсната оценка на състоянието на комуникационните канали и динамично насочва управляващите сигнали към най-надеждния от тях [8, 9]. Това позволява бърза реакция при влошаване на параметрите на даден канал и осигурява оптимално използване на наличните ресурси.

Предимствата на разгледаните *сценарии за реализация на многоканален подход* се изразяват в повишена устойчивост спрямо шумови и интерференционни въздействия, намалена вероятност за загуба на критични управляващи команди, възможност за енергийна оптимизация чрез изключване на неефективни канали, както и подобрена безопасност на БЛА при работа в сложни среди – градска инфраструктура и други приложения в условия на несигурност [7, 10].

4. Симулационна оценка на ефективността на канално-съгласувания синтез

Ефективността на предложения подход е оценена чрез симулации в среда MATLAB/Simulink, използвайки дискретен модел на безпилотен летателен апарат с многоканална система за радиоуправление [9, 10]. Симулационният сценарий предвижда паралелно предаване на управляващите команди по три независими радиоканала ($M = 3$), всеки характеризиращ се със собствена вероятност за отказ и индивидуална шумова дисперсия

[8]. Това позволява реалистично моделиране на функционален отказ на радиоканалите и оценка на устойчивостта на управлението в условия на несигурна среда [6, 10].

Условия на симулацията

- *Динамичен модел на БЛА* – линеаризиран около установен режим на полет, описан чрез стандартен Калманов модел [1, 2, 4].
- *Радиоканали:*
 - Канал 1 – надежден, но със средна дисперсия на шума;
 - Канал 2 – високочестотен канал със силни смущения;
 - Канал 3 – резервен канал с периодични откази (вероятност за отказ 15%).
- *Шум* – адитивен гаусов процес със средно нула и изменяща се дисперсия.
- *Закъснение* – случайно закъснение τ_k в границите от 1 до 3 дискретни стъпки.

Симулационната среда в тази конфигурация позволява изследване на поведението на системата за управление при различни сценарии на комуникационна несигурност, отразяващи реални условия на радиоуправление [8, 9]. Проведени са сравнителни експерименти между два подхода за синтез на управляващи сигнали – класическия, който използва фиксирани команди без отчитане на състоянието на каналите, и предложения канално-съгласуван метод с тегловна комбинация и адаптивна оптимизация [6, 10].

Основните резултати от сравнителните симулации ясно очертават предимствата на канално-съгласувания синтез спрямо класическия подход. При използване на фиксирани команди, загубата на пакети в канал 3 води до съществени отклонения от референтната траектория, особено при наличие на шум и закъснения [4, 9]. За разлика от това, предложената методика демонстрира 30–40% намаление на средноквадратичната грешка, повишена устойчивост при отказ на един или повече канали, както и по-гладка динамика на управляващите сигнали без резки преходи при смяна на канала [6, 10]. Допълнително, адаптивният механизъм за тегловна комбинация ефективно изключва ненадеждните канали и преразпределя управляващите команди към останалите, като същевременно с това оптимизира енергийния разход [8–10].

Заклучение

Представеният метод за *синтез на канално-съгласувани сигнали* осигурява динамична адаптация на управлението към текущото състояние на комуникационната среда и ефективно комбиниране на канали с различна надеждност и шумови нива.

Резултатите от симулациите потвърждават съществено повишаване на точността и устойчивостта на управлението в условия на шум, закъснения и вероятностни откази. Предложената методика превъзхожда класическите подходи по отношение на стабилност и енергийна ефективност и може да се прилага както при едноканални, така и многоканални архитектури.

Бъдещите изследвания следва да бъдат насочени към експериментална верификация с реални безпилотни платформи и усъвършенстване на алгоритъма за работа в среди с висока интерференция и ограничени ресурси.

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. Simon, D., *Optimal State Estimation: Kalman, H^∞ , and Nonlinear Approaches.*, Wiley-Interscience, 2006
3. Maybeck, P. S., *Stochastic Models, Estimation, and Control.*, Academic Press, 1979
4. Chen, W., and R. J. Patton, *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems.*, Kluwer Academic Publishers, 1999
5. Li, X. R., and V. P. Jilkov, "Survey of maneuvering target tracking. Part V: Multiple-model methods", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 41, no. 4, pp. 1255–1321, 2005
6. 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>
7. Zhang, Y., and J. Jiang, "Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems", *Annual Reviews in Control*, vol. 32, no. 2, pp. 229–252, 2008
8. Wu, Y., and W. Luo, "Channel estimation and adaptive filtering techniques for UAV communication networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 1158–1185, 2022
9. Chen, C., X. Wang, and H. Li, "Fault-tolerant control design for UAVs under stochastic communication channels", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 31, no. 4, pp. 1482–1495, 2023
10. Hassan, M., and S. Khan, "Adaptive multi-channel signal synthesis for UAVs in fading environments", *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 38, no. 7, pp. 1420–1438, 2024.