

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 4 (2025)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/GMYR4462>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шокубаева З. Ж.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/ORTS5256>

**А. Е. Кулакаева¹, Б. Ж. Медетов², Е. А. Дайнеко³,
А. З. Айтмағамбетов⁴, *Б. А. Кожаметова⁵**

^{1,3,4,5}Международный университет информационных технологий,
Республика Казахстан, г. Алматы;

²Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана;

³Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5594-8435>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6581-2622>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7808-5273>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9566-3629>

*e-mail: kozahmetova.ba@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИЕМА РАДИОСИГНАЛОВ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ РАДИОМОНИТОРИНГА

В данной статье представлен подход к повышению эффективности приема и восстановления радиосигнала в спутниковых системах радиомониторинга на базе низкоорбитальных малых космических аппаратов с использованием фильтра Калмана. Актуальность исследования обусловлена необходимостью эффективного контроля использования радиочастотного спектра на обширных и труднодоступных территориях, где традиционные наземные системы радиоконтроля оказываются ограниченными по зоне покрытия и чувствительности. Предложена математическая модель, описывающая процесс формирования и приема гармонического радиосигнала в условиях наличия шумов и помех, а также особенности цифровой обработки измерений на борту малого космического аппарата. Реализован численный эксперимент, в ходе которого проведен анализ эффективности фильтра Калмана при различных уровнях отношения сигнал/шум (от 3 до –5 дБ) и разной длительности наблюдения.

Показано, что уже при умеренном уровне шума фильтр Калмана позволяет достигать коэффициента сходства между истинным

и восстановленным сигналом выше 0,94 (94 %) при относительно короткой длительности приема. При ухудшении условий отношения сигнал/шум до -5 дБ фильтр сохраняет работоспособность, хотя для достижения приемлемого качества требуется больший объем данных. Полученные результаты подтверждают высокую устойчивость предложенного метода к шумовым воздействиям и возможность его использования для обнаружения и идентификации источников радиоизлучения.

Ключевые слова: радиомониторинг, источник излучения, фильтр Калмана, радиосигнал, спектр, малый космический аппарат.

Введение

Эффективное управление радиочастотным спектром (РЧС) невозможно без постоянного радиомониторинга, который обеспечивает контроль использования радиочастотного спектра как на национальном, так и на международном уровнях. В Республике Казахстан такие задачи решаются Службой эксплуатации систем радиомониторинга при РГП «Государственная радиочастотная служба» Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности. Существующая система радиомониторинга включает наземные стационарные, передвижные и мобильные комплексы, однако ограничена по зоне покрытия и плотности контрольных пунктов, что снижает ее эффективность в условиях обширной территории страны.

В международной практике все большую актуальность приобретают спутниковые системы радиомониторинга на базе малых космических аппаратов (МКА), позволяющие существенно расширить охват, повысить оперативность обнаружения и идентификации источников радиоизлучения, а также интегрироваться в действующую инфраструктуру радиоконтроля [1; 2; 3; 4; 5]. Основной задачей при организации спутникового радиомониторинга становится выделение и оценка параметров полезного сигнала на фоне помех и случайных искажений, что требует применения современных адаптивных методов цифровой фильтрации [6].

Для решения задач выделения полезного сигнала и повышения точности обнаружения источников радиоизлучения в спутниковых системах радиомониторинга в ряде исследований успешно использовались фильтр Калмана и его модификации. Применение таких алгоритмов позволило повысить достоверность оценки параметров сигнала и обеспечить устойчивую работу системы в условиях значительных уровней шума [7; 8; 9; 10]. Применение фильтра Калмана обеспечивает устойчивую работу системы даже при наличии шумов, случайных возмущений и неполной

априорной информации о параметрах сигнала, что особенно важно для задач автоматического радиоконтроля с борта МКА [11; 12]. Тем не менее, в существующих работах недостаточно полно исследованы вопросы практической реализации и устойчивости фильтра Калмана на борту МКА при реальных сценариях спутникового радиомониторинга.

Материалы и методы

В данной работе для расчета энергетического бюджета радиолинии системы спутникового радиомониторинга использованы подходы, учитывающие влияние атмосферных и климатических факторов на мощность сигнала на входе бортового измерительного приемника. В качестве исходных данных были выбраны минимальные характеристики оборудования и параметры реальных действующих наземных радиоэлектронных средств, функционирующих в Республике Казахстан в диапазоне частот от 94 МГц до 14 ГГц. Проведенные расчеты охватывали различные типы источников: станции мобильной связи (GSM, UMTS, LTE), телевидение (DVB-T2), FM-радио, а также земные станции спутниковой связи в диапазонах X и Ku [13].

В качестве экспериментальной базы для анализа использованы данные о характеристиках телеметрических сигналов, полученные с борта спутника KazEOSat-2 в различные периоды наблюдений. Измерения проводились на оборудовании национальной компании «Қазақстан Ғарыш Сапары» и показали, что уровни сигналов на входе бортового приемника находились в диапазоне от -85 дБм до -120 дБм при высоте орбиты 630 км, что соответствует условиям реального спутникового радиомониторинга [14].

Для выделения полезного сигнала из шума выбран и реализован дискретный фильтр Калмана на языке Python. Алгоритм тестировался на модельных данных с параметрами, соответствующими реальным условиям приема радиосигнала.

Результаты и обсуждение

В задачах спутникового радиомониторинга для определения текущих координат источников наземного радиоизлучения (x) используется радиоприемное оборудование, установленное на борту низкоорбитального МКА. В каждый момент времени на входе бортового измерительного приемника регистрируется наблюдаемое значение (z), которое представляет собой результат искажения исходного сигнала (x) случайными шумами и помехами (n). Здесь n – случайная величина, возникающая как в процессе передачи по каналу связи, так и непосредственно при измерении. В связи с этим бортовой приемник фиксирует не истинные значения параметров сигнала, необходимых для точного определения координат источника, а искаженные значения. Задача приемного устройства на борту МКА заключается в максимально эффективном и достоверном восстановлении

полезного сигнала (x). Очевидно, что получение абсолютно точных параметров сигнала невозможно – поэтому вычисляются лишь приближенные оценки этих параметров, которые далее обозначаются как .

При приеме сигнала математическая модель системы может быть записана в следующем виде:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = F(x, t) \quad (1)$$

где, x – вектор состояний исследуемой системы; $F(x, t)$ – функция, определяющая эволюцию (динамику) системы во времени.

Следовательно, если наблюдаемый сигнал можно выразить через производную $\dot{x}$, то для эффективного выделения полезного сигнала из совокупности помех возможно применение фильтра Калмана.

При определении координат наземных источников радиоизлучения на базе одного низкоорбитального МКА, будем рассматривать задачу обнаружения гармонического сигнала, принимаемого как несущее колебание. Такой сигнал можно описать выражением:

$$x(t) = U \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (2)$$

где U – амплитуда, ω_0 – круговая частота, φ_0 – начальная фаза.

Однако такое представление сигнала не соответствует требованиям применения фильтра Калмана, поскольку данный фильтр реализуется для систем, описываемых дифференциальными уравнениями первого порядка. Поэтому перед переходом к фильтрации необходимо записать математическую модель в дифференциальной форме. Для этого требуется определить такое дифференциальное уравнение, решением которого является функция (2). Таким образом, перед использованием фильтра Калмана необходимо решить промежуточную задачу – привести исходную модель сигнала к системе дифференциальных уравнений. Если найденная система позволяет получить решение в виде функции (2), она может быть использована для дальнейшей реализации фильтра Калмана.

Далее запишем уравнение, описывающее динамику гармонического осциллятора:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (3)$$

Далее необходимо понизить порядок дифференциального уравнения. Для этого введем вспомогательные параметры:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} + \omega_0^2 x = 0 \end{cases} \quad (4)$$

где – скорость изменения сигнала.

Следовательно,

$$\frac{dx}{dt} = v(t)$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v(t) \\ \frac{dv}{dt} = -\omega_0^2 x(t) \end{cases} \quad (5)$$

Исходя из системы (5), можно записать соответствующее разностное уравнение:

$$\begin{cases} \frac{x_{k+1} - x_k}{dt} = v_k \\ \frac{v_{k+1} - v_k}{dt} = -\omega_0^2 x_k \end{cases} \quad (6)$$

Преобразуя уравнения (6), получаем окончательное выражение, с помощью которого можно определить каждое последующее значение сигнала. Поэтому для применения фильтра Калмана уравнения реальных значений сигналов принимают следующий вид:

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + v_k \cdot dt \\ v_{k+1} = v_k - \omega_0^2 x_k \cdot dt \end{cases} \quad (7)$$

В результате, искомый сигнал представляется согласно уравнению (7)

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + v_k \cdot dt + \varepsilon_k \\ z_k = x_k + \eta_k \end{cases} \quad (8)$$

где ε_k – ошибка модели, обусловленная неточностями используемой математической модели; η_k – техническая погрешность, связанная с наличием шумов и несовершенством сенсора ($\eta_k = \eta_k^{(1)} + \eta_k^{(2)}$ $\eta_k^{(1)}$ – шум $\eta_k^{(2)}$, – погрешность прибора).

Если $\eta_k^{(2)} \ll \eta_k^{(1)}$ выполняется, то η_k фактически действие шума.

Следовательно, выражение $x_{k+1} = x_k + v_k * dt + \varepsilon_k$ – выступает в роли математической модели динамики сигнала, а формула $z_k = x_k + \eta_k$ отражает измеряемое значение сигнала на каждом шаге.

Здесь $v_k * dt$ – слагаемое, контролирующее эволюцию системы, ε_k – ошибка модели, x_k – реальное значение сигнала, z_k – измеренное значение, получаемое на выходе бортового измерительного приемника, η_k – шум. При этом ε_k и η_k рассматриваются как случайные величины.

Математические ожидания этих случайных величин будем считать равными нулю:

$$E\varepsilon_k = E\eta_k = 0 \quad (9)$$

Таким образом, будем считать, что шум не содержит постоянной составляющей. В дальнейшем нам потребуется учитывать дисперсии случайных величин σ_{ε}^2 и σ_{η}^2 .

Переходя к алгоритму фильтра Калмана, необходимо определить оптимальное значение сигнала y_k , которое априори неизвестно. Если известны значения x_k и z_k , то y_k будет представлять собой оптимальную оценку, лежащую между (прогноз по модели) При этом $U_k = v_k * dt$.

$$x_{k+1} = x_k + U_k + \varepsilon_k \quad (10)$$

Следовательно, для определения оптимального значения между прогнозом модели x_k и результатом измерения z_k , вводится весовой коэффициент k_k . Оптимальное значение сигнала будет зависеть от выбранного коэффициента: при $\rightarrow 0$ оценка полностью опирается на модель, при $x_k \rightarrow 1$ – на измерение. Таким образом, оптимальная оценка сигнала записывается следующим образом:

$$y_{k+1} = k_k * z_{k+1} + (1 - k_k) * (y_k + U_k) \quad (11)$$

Далее необходимо минимизировать $\varepsilon_{k+1} = x_{k+1} - y_{k+1}$. Процедура минимизации выполняется следующим образом:

$$\frac{d \sum (x_{k+1} - y_{k+1})^2}{d k_k} = 0 \quad (12)$$

Решив данное уравнение, приходим к следующему:

$$\varepsilon_{k+1} = (1 - k) * (e_k + \varepsilon_k) - k * \eta_{k+1} \quad (13)$$

В конечном итоге для коэффициента фильтра Калмана получаем следующее выражение:

$$k_{k+1} = \frac{E e_k^2 + \sigma_\varepsilon^2}{E e_k^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\eta^2} \quad (14)$$

где σ_ε^2 – дисперсия ошибки модели, σ_η^2 – дисперсия ошибки наблюдения.

Практическая реализация описанного алгоритма фильтра Калмана позволяет количественно оценить эффективность восстановления истинного сигнала в условиях наличия шума. Для этого был проведен численный эксперимент, в ходе которого рассчитывалось, насколько точно восстановленный сигнал совпадает с истинным, в зависимости от длительности наблюдаемого фрагмента сигнала.

На рисунке 1 показана траектория движения низкоорбитального одного МКА над территорией РК. Антенна формирует обзор, задающий на поверхности Земли зону радиоконтроля. Размер и форма данной зоны определяются высотой орбиты, углом обзора антенны и другие параметры.



Рисунок 1 – Радиомониторинг на базе одного МКА

Для комплексной оценки эффективности применения фильтра Калмана при различных уровнях отношения сигнал/шум (ОСШ) были построены и проанализированы зависимости коэффициента сходства между истинным сигналом и сигналом, восстановленным на выходе фильтра, от

продолжительности принимаемого сигнала. Результаты представлены на рисунках 2–4.

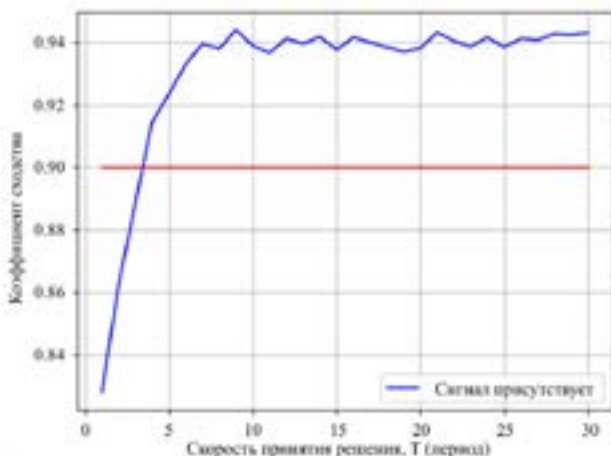


Рисунок 2 – График зависимости коэффициента сходства от продолжительности принимаемого сигнала при ОСШ 3 дБ

На рисунке 2 показан характер изменения коэффициента сходства при ОСШ 3 дБ. Уже после 6–7 периодов наблюдения коэффициент сходства превышает пороговое значение 0,9 (90 %) и далее стабилизируется на уровне около 0,94 (94 %). Это свидетельствует о высокой эффективности фильтра Калмана для обнаружения и восстановления полезного сигнала в условиях шума. Быстрое достижение высокого коэффициента сходства указывает на то, что дальнейшее увеличение длительности наблюдения не приводит к существенному улучшению качества восстановления.

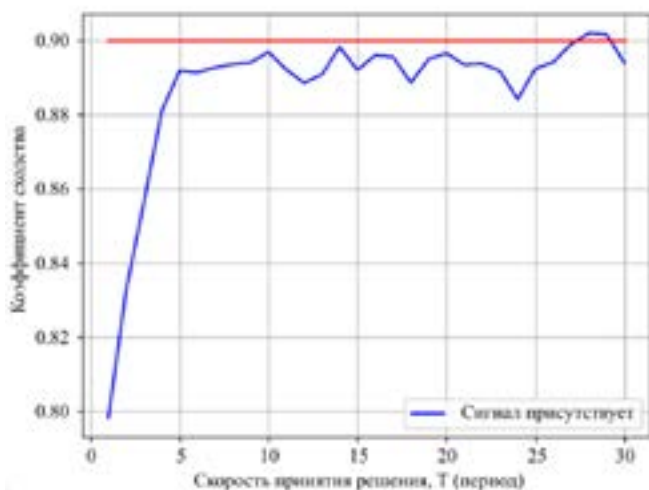


Рисунок 3 – График зависимости коэффициента сходства от продолжительности принимаемого сигнала при ОСШ -3 дБ

На рисунке 3 приведен аналогичный график для случая, когда ОСШ составляет -3 дБ. В данном случае пороговое значение коэффициента 0,9 (90 %) достигается при большем количестве периодов (около 9–10), а дальнейшее увеличение длительности приема приводит к незначительному росту показателя, который стабилизируется на уровне около 0,9 (90 %). Это демонстрирует, что фильтр Калмана по-прежнему обеспечивает приемлемое восстановление сигнала при ухудшении условий приема, однако для достижения высокой точности требуется больший объем наблюдений.

Рисунок 4 отражает ситуацию с еще более низким отношением сигнал/шум (-5 дБ). Анализ показал, что при таких условиях коэффициент сходства лишь приближается к пороговому значению 0,9 (90 %), но фактически остается немного ниже даже при максимальной длительности наблюдения (30 периодов). На данном интервале наблюдаются колебания значения коэффициента, что связано с высокой долей шумовой составляющей в принимаемом сигнале. Тем не менее, фильтр Калмана продолжает обеспечивать относительно высокую степень совпадения восстановленного сигнала с истинным даже в условиях экстремального шума.

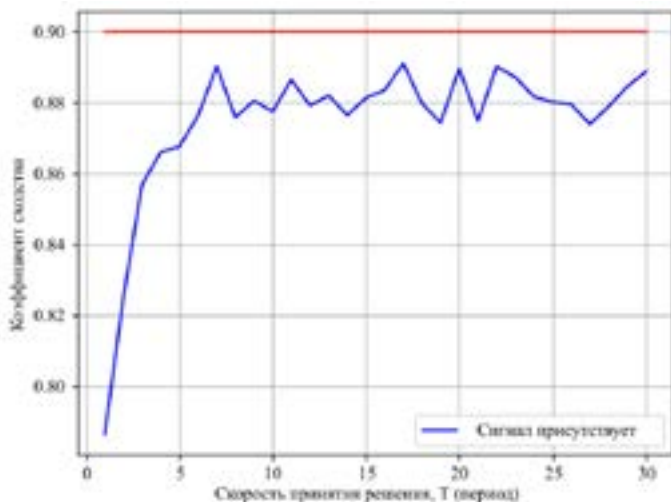


Рисунок 4 – График зависимости коэффициента сходства от продолжительности принимаемого сигнала при ОСШ -5 дБ

В совокупности, анализ рисунков 2–4 подтверждает, что предложенная реализация фильтра Калмана обладает высокой устойчивостью к шумовым воздействиям и позволяет повысить достоверность обнаружения сигнала в системе спутникового радиомониторинга, особенно при увеличении длительности принимаемого сигнала.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают эффективность использования фильтра Калмана для восстановления полезного сигнала в спутниковых системах радиомониторинга в условиях значительного уровня шумов. Как показал численный анализ (рисунки 1–3), уже при умеренном ОСШ 3 дБ фильтр позволяет достигать стабильно высокого коэффициента сходства между истинным и восстановленным сигналом – более 0,94 (94 %) после 6–7 периодов наблюдения. При ухудшении условий (ОСШ –3 дБ и –5 дБ) требуется большее количество периодов для достижения порогового значения (0,9 или 90 %), а максимальное значение коэффициента сходства снижается, однако восстановление сигнала по-прежнему остается возможным даже в экстремальных шумовых условиях.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что даже при ограниченной длительности наблюдения и отсутствии полной информации о параметрах сигнала система способна обеспечивать высокую достоверность обнаружения и восстановления параметров

радиосигнала. Это открывает перспективы для интеграции спутниковых систем радиомониторинга в национальную инфраструктуру радиоконтроля, позволяя расширить зону покрытия, повысить оперативность реагирования на несанкционированные излучения и автоматизировать процессы контроля использования РЧС.

Ограничения исследования связаны с тем, что моделирование проводилось для гармонических сигналов с фиксированной частотой и без учета ряда сложных факторов реальных каналов (например, эффекта Доплера, нелинейных искажений, вариаций параметров среды).

В дальнейших работах целесообразно рассмотреть расширение математической модели на случай произвольных сигналов, а также провести эксперименты с реальными данными, включая более сложные сценарии и использование других модификаций фильтра Калмана.

Информация о финансировании.

Работа выполнена при финансовой поддержке КН МНВО РК по программе грантового финансирования научных исследований на 2025–2027 гг., грант №AP26103099.

Выводы

В данной работе была реализована и проанализирована математическая модель восстановления радиосигнала на борту низкоорбитального малого космического аппарата с применением фильтра Калмана. Проведенные численные эксперименты показали, что фильтр Калмана обеспечивает высокую эффективность обнаружения и восстановления полезного сигнала в условиях различных уровней шумов, характерных для задач спутникового радиомониторинга.

Показано, что при увеличении длительности принимаемого сигнала коэффициент сходства между истинным и восстановленным сигналом стабилизируется на высоком уровне (выше 0,9 или 90 %) даже при значительных значениях шума (ОСШ вплоть до –5 дБ). Это подтверждает практическую реализуемость и целесообразность применения данного подхода для повышения надежности и достоверности радиоконтроля в современных спутниковых системах.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего развития национальной инфраструктуры радиомониторинга и интеграции интеллектуальных алгоритмов обработки сигналов в действующие и перспективные платформы спутникового контроля. В перспективе планируется расширить математическую модель на более сложные типы сигналов, а также провести экспериментальную проверку эффективности предложенного метода на реальных данных спутниковых наблюдений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Sarda, K., Roth, N., Zee, R., CaJacob, D., Nathan, G. O.** Making the Invisible Visible: Precision RF-Emitter Geolocation from Space by the HawkEye 360 Pathfinder Mission // Proceedings of the 4S Symposium, Sorrento. – Italy. – 28 May–1 June 2018.

2 **Pelton, J. N.** Radio-Frequency Geo-location and Small Satellite Constellations // Handbook of Small Satellites. – Springer. – 2020. – P. 811–823.

3 HawkEye 360 is a Radio Frequency (RF) data analytics company [Электронный ресурс]. – <https://www.he360.com/> (Дата обращения: 12.08.2025).

4 **Dudás, L., Szűcs, L., Gschwindt, A.** The spectrum monitoring system by Smog-1 satellite // 2015 Conference on Microwave Techniques (COMITE), Pardubice, Czech Republic. – 2015. – P. 1–4. – <https://doi.org/10.1109/COMITE.2015.7120316>.

5 **Ellis, P., Dowla, F.** A Single Satellite Geolocation Solution of an RF Emitter Using a Constrained Unscented Kalman Filter // 2018 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP), Freiburg im Breisgau, Germany, 2018. – P. 643–647. – <https://doi.org/10.1109/SSP.2018.8450834>.

6 **Hao, C., Wan, X., Feng, D., Feng, Z., Xia, X.-G.** Satellite-Based Radio Spectrum Monitoring: Architecture, Applications, and Challenges // IEEE Network. – 2021. – Vol. 35, № 4. – P. 20–27. – <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2100015>.

7 **Ellis, P., Rheeden, D.V., Dowla, F.** Use of Doppler and Doppler Rate for RF Geolocation Using a Single LEO Satellite // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 12907–12920. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965931>.

8 **Nguyen, N.H., Doğançay, K.** Algebraic solution for stationary emitter geolocation by a LEO satellite using Doppler frequency measurements // Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Shanghai, China. – 20–25 March 2016. – P. 3341–3345. – <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2016.7472296>.

9 **Ellis, P. B., Dowla, F.** Single Satellite Emitter Geolocation in the Presence of Oscillator and Ephemeris Errors // Proceedings of the 2020 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 7–14 March 2020. – P. 1–7. – <https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172600>.

10 **Kozhaya, S. E., Kassas, Z. M.** Positioning with Starlink LEO Satellites: A Blind Doppler Spectral Approach // Proceedings of the 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring), Florence, Italy, 20–23 June 2023. – P. 1–5. – <https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10199264>.

11 Wang, D., Qin, H., Huang, Z. Doppler Positioning of LEO Satellites Based on Orbit Error Compensation and Weighting // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2023. – Vol. 72. – P. 1–11. – Art. No. 5502911. – <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3286001>.

12 Jun, W.W., Cheung, K.-M., Lightsey E.G. Improved Surface Positioning with Measurement Differences in Joint Doppler and Ranging // Proceedings of the 2023 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 4–11 March 2023. – P. 1–9. – <https://doi.org/10.1109/AERO55745.2023.10115954>.

13 Aitmagambetov, A., Butuzov, Y., Tikhvinskiy, V., Kulakayeva, A., Ongenbayeva, Z. Energy budget and methods for determining coordinates for a radiomonitoring system based on a small satellite // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2021. – Vol. 21. – № 2. – P. 945–956.

14 Medetov, B., Kulakayeva, A., Zhetpisbayeva, A., Albanbay, N., Kabduali, T. Identifying the regularities of the signal detection method using the Kalman filter // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 5. – P. 26–34. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289472>.

Поступило в редакцию 05.09.25.

Поступило с исправлениями 11.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

А. Е. Кулакаева¹, Б. Ж. Медетов², Е. А. Дайнеко³,

*А. З. Айтмагамбетов⁴, *Б. А. Кожяхметова⁵*

^{1,3,4,5}Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

²Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

³Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

05.09.25 ж. баспаға түсті.

11.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

СПУТНИКТИК РАДИОМОНИТОРИНГ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ РАДИОСИГНАЛДАРДЫ ҚАБЫЛДАУ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

Бұл мақалада төмен орбиталы шағын ғарыш аппараттары негізіндегі спутниктік радиомониторинг жүйелерінде Калман сүзгісін пайдалану арқылы радиосигналды қабылдау мен қалпына келтіру тиімділігін арттыру тәсілі ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі дәстүрлі жерүсті радиобақылау жүйелері қамту аймағы мен

сезімталдығы бойынша шектеулі болып табылатын, ауқымды және қолжетімсіз аумақтарда радиожуілік спектрін тиімді бақылау қажеттілігімен түсіндіріледі. Шу мен кедергілер жағдайында гармониялық радиосигналдың қалыптасу және қабылдау үдерісін, сондай-ақ шағын ғарыш аппараты бортында өлшеулерді цифрлық өңдеу ерекшеліктерін сипаттайтын математикалық модель ұсынылған. Сандық эксперимент жүргізіліп, онда әртүрлі сигнал/шум қатынасы деңгейлерінде (3-тен –5 дБ-ге дейін) және бақылау ұзақтығы әртүрлі болған жағдайларда Калман сүзгісінің тиімділігі талданды.

Көрсетілгендей, орташа шу деңгейінде-ақ Калман сүзгісі салыстырмалы түрде қысқа қабылдау ұзақтығында шынайы және қалпына келтірілген сигнал арасындағы ұқсастық коэффициентін 0,94-тен (94 %) жоғары деңгейге жеткізуге мүмкіндік береді. Сигнал/шум қатынасы –5 дБ-ге дейін нашарлаған жағдайда да сүзгі жұмыс қабілеттілігін сақтайды, алайда қанағаттанарлық сапаға жету үшін деректердің үлкен көлемі қажет. Алынған нәтижелер ұсынылған әдістің шу әсеріне жоғары төзімділігін және оны радиоизлучение көздерін анықтау мен идентификациялау үшін қолдану мүмкіндігін растайды.

Кітті сөздер: радиомониторинг, сәуле шығару көзі, Калман сүзгісі, радиосигнал, спектр, шағын ғарыш аппарат.

A. Ye. Kulakayeva¹, B. Zh. Medetov², Ye.A. Daineko³,

A. Z. Aitmagambetov⁴, *B. A. Kozhakhmetova⁵

^{1,3,4,5}International University of Information Technology,

Republic of Kazakhstan, Almaty;

²L. N. Gumilyov Eurasian National University»

Republic of Kazakhstan, Astana.;

³Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 11.11.25.

Received in revised form 23.10.25.

Accepted for publication 05.12.25.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF RADIO SIGNAL RECEPTION IN SATELLITE RADIOMONITORING SYSTEMS

This paper presents an approach to improving the efficiency of reception and reconstruction of a radio signal in satellite radiomonitoring systems based on low Earth orbit (LEO) small spacecraft using the Kalman filter. The relevance of the study is driven by the need for effective monitoring of the radio frequency spectrum over vast and hard-to-reach

areas, where traditional ground-based radio control systems are limited in coverage and sensitivity. A mathematical model is proposed that describes the process of generation and reception of a harmonic radio signal under conditions of noise and interference, as well as the specifics of digital processing of measurements on board a small spacecraft. A numerical experiment was conducted to analyze the performance of the Kalman filter at various signal-to-noise ratio (SNR) levels (from 3 to –5 dB) and different observation durations.

It is shown that even at a moderate noise level, the Kalman filter makes it possible to achieve a similarity coefficient between the true and reconstructed signal of more than 0.94 (94 %) with a relatively short reception time. When the SNR conditions deteriorate to –5 dB, the filter maintains operability, although achieving acceptable quality requires a larger amount of data. The obtained results confirm the high robustness of the proposed method to noise effects and its applicability for detecting and identifying radio emission sources.

Keywords: radiomonitoring, emission source, Kalman filter, radio signal, spectrum, small spacecraft.

Теруге 17.12.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.12.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4494

Сдано в набор 17.12.2025 г. Подписано в печать 30.12.2025 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4494

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz