

УДК 551.594+551.506

## **АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРИЗЕМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА КАЛМАНА**

**И. Х. Машуков<sup>1</sup>, В. А. Шаповалов<sup>1</sup>, А. А. Аджиева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Высокогорный геофизический институт, 360030, г. Нальчик, пр. Ленина, 2

<sup>2</sup> Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, 360030, Россия, г. Нальчик, ул.Тарчокова 1«а»

E-mail: idar84@rambler.ru

С помощью измерителя электрического поля атмосферы EFM550 фирмы Vaisala проведены многолетние исследования (2010-2017 гг.) хода напряженности электрического поля атмосферы в районе города Нальчика. В статье рассмотрено применение цифровой обработки для улучшения качества данных, полученных с помощью сети датчиков, работающих в составе аппаратно-программного комплекса в центре мониторинга геофизической обстановки над южным регионом Российской Федерации при ФГБУ «Высокогорный геофизический институт». Исследуются возможности применения калмановской фильтрации для уточнения данных приборных измерений напряженности электрического поля атмосферы. Приводится сравнительный анализ полученных данных хода напряженности электрического поля до и после фильтрации.

*Ключевые слова: электрическое поле атмосферы, данные измерений, регистратор напряженности поля, цифровая обработка, алгоритмы улучшения данных, фильтр Калмана, напряженность приземного поля.*

© Машуков И. Х. и др., 2018

## Введение

Величина и направление приземного электрического поля атмосферы широко варьируют в пространстве и времени и зависят от погодных условий, орографии местности, времени года, суток и других факторов [1, 2]. В земной атмосфере постоянно действует глобальный процесс разделения зарядов, в результате которого атмосфера содержит избыточный положительный объемный заряд, а на земной поверхности индуцирован нейтрализующий его поверхностный отрицательный заряд. Это разделение зарядов является причиной существования электрического поля в тропосфере. Источниками наиболее сильных полей в атмосфере являются грозовые облака, напряженность поля под которыми у земной поверхности достигает  $10^4$  В/м. Грозовое облако является также генератором электрических разрядов, вызывающих скачки напряженности поля у земной поверхности. Кучевые облака, в частности облака хорошей погоды, вызывают небольшие отрицательные изменения электрического поля [3]. Актуальной задачей геофизического мониторинга является отслеживание вариации напряженности электрического поля атмосферы. Эта задача является неотъемлемой частью более общей проблемы физики и метеорологии - атмосферного электричества [4, 5].

## Материалы и методы исследования

К настоящему времени исследования атмосферного электричества достигли высокого уровня автоматизации и производятся массово. Но сопоставление данных измерений датчиков различных моделей, встречает ряд серьёзных трудностей. Это связано не только с различным темпом измерений или характеристиками сенсоров, но и с шумами, возникающими в результате внешних и внутренних воздействий на измерительный прибор, которые составляют так называемую погрешность измерений [6, 7, 8]. Для мониторинга электрофизических явлений в свободной и нарушенной атмосфере методом измерения локальной напряженности электрического поля в центре мониторинга геофизической обстановки над южным регионом Российской Федерации при ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» создан аппаратно-программный комплекс [9, 10], включающий в себя: - измерители напряженности электрического поля атмосферы EFM550 фирмы Vaisala (Финляндия) [11, 12]; - программное обеспечение для решения задач измерения, передачи и визуализации значений напряженности электрического поля атмосферы. Комплекс функционирует с 2010 года. Сеть измерителей напряженности электрического поля атмосферы состоит из четырех датчиков EFM550. Датчики расположены: на крыше здания ФГБУ «ВГИ»; на территории НИП «Кызбурун» ФГБУ «ВГИ»; на территории метеостанции на пике «ЧЕГЕТ» ФГБУ «СК ВС»; на территории КДП «Псынабо» ФГБУ «СК ВС». Данные с четырех измерителей напряженности электрического поля атмосферы поступают на сервер, предназначенный для хранения данных значений напряженности электрического поля атмосферы. Каждый датчик сопряжен с персональным компьютером, на жесткий диск которого записываются значения напряженности электрического поля атмосферы. Частота измерений значений напряженности электрического поля атмосферы составляет 2 Гц, т.е. данные фиксируются и записываются в файл каждые полсекунды. Согласно технических данных дальность репрезентативного измерения EFM550 составляет 50 км, а точность  $\pm 5\%$  от отклонения показаний или в абсолютных значениях  $\pm 50$  В/м. Максимальные и минимальные значения напряженности, которые может измерить EFM550, находятся в диапазоне  $\pm 10$  кВ/м [11]. На рис. 1 показан суточный ход напряженности электрического поля атмосферы 29 июня 2014 года по данным четырех измерителей поля.

Для устранения шумов и другой лишней информации существуют специальные алгоритмы цифровой обработки данных называемые фильтрами. Необходимо отметить, что задача фильтрации — это не задача сглаживания. То есть фильтр применяется не для сглаживания данных с датчика, а чтобы получить наиболее близкое значение к реальной величине напряженности поля атмосферы. В качестве такого фильтра авторами был выбран фильтр Калмана. Фильтр назван по имени венгерско-американского инженера-электрика Рудольфа Калмана. Этот фильтр нашел широкое применение в геофизических, инженерно-технических и эконометрических приложениях: от радаров и систем машинного зрения до оценок параметров экономических моделей, он является важной частью теории управления системами [14, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. Фильтр Калмана – последовательный рекурсивный алгоритм, использующий принятую модель динамической системы для получения оценки, которая может быть существенно скорректирована в результате анализа каждой новой выборки измерений во временной последовательности. Состояние системы описывает вектор из действительных чисел. При каждом шаге по времени, линейный оператор применяется к вектору

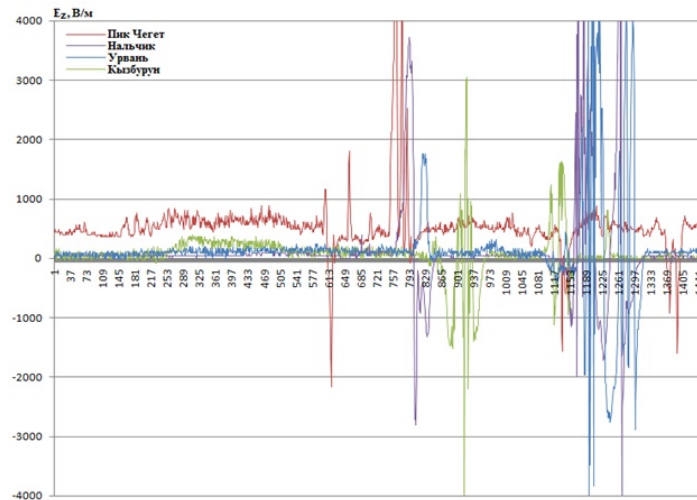


Фото 1. График суточного хода приземной напряженности электрического поля атмосферы для четырех пунктов установки датчиков

состояния системы, к нему добавляется некоторая погрешность и опционально некоторая информация об управляющих воздействиях на систему, если таковая известна. После чего другим линейным оператором с другой погрешностью добавляется видимая информация о состоянии системы (рис. 2). Обозначим через  $x_k$  вектор состояния модели исследуемого процесса изменения напряженности поля. В момент времени  $k$  производится измерение  $z_k$  реального состояния системы  $x_k$  в соответствии с моделью измерения.

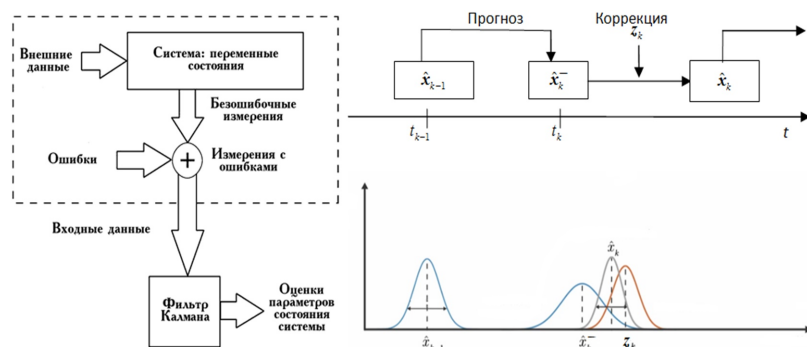


Фото 2. Схема обработки данных измерений и принцип работы фильтра Калмана

Модель системы для фильтра Калмана исходит из предположения, что реальное состояние в момент времени  $k$  получается из состояния в момент времени  $k - 1$ . Для применения фильтра Калмана необходимо, чтобы процесс изменения измеряемой величины можно было описать следующим образом [23, 24]:

$$\begin{cases} z_k = H_k x_k + v_k \\ x_k = A_k x_{k-1} + B_k u_{k-1} + w_k \end{cases} \quad (1)$$

Система уравнений (1) описывает измерения отслеживаемого процесса и экстраполяцию (прогноз) его текущего состояния на основе состояния в предыдущий момент времени. Здесь  $z_k \in R^m$  — вектор измерений;  $x_k \in R^n$  — вектор состояния; матрица  $H_k$  размерностью  $m \times n$  отображает состояние наблюдаемого процесса  $x_k$  в измерения  $z_k$ ;  $v_k \in R^m$  — случайная величина, характеризующая погрешности измерений;  $A_k$  — матрица размерностью  $n \times n$ , соответствующая модели преобразования системы со временем, т.е. описывающая переход наблюдаемого процесса из предыдущего состояния  $x_{k-1}$  в состояние  $x_k$ ;  $w_k \in R^n$  является случайной величиной, описывающей ошибку модели этого преобразования;  $u_k \in R^d$  — вектор, описывающий управляющие воздействия;  $B_k$  — матрица размерностью  $n \times d$ , учитывающая влияние вектора управляющих воздействий  $u_{k-1}$  из предыдущего

состояния в изменение состояния  $x_k$ . Ошибка измерения и ошибка модели — случайные величины. И их законы распределения не зависят от времени (от номера итерации  $k$ ). Причем  $p(z_k|x_k) \sim N(H_k x_k, R)$ ,  $p(v) \sim N(0, R)$ , где  $R$  - ковариационная матрица погрешностей измерений,  $ap(x_k|x_{k-1}) \sim N(A_k x_{k-1} + B_k u_{k-1}, Q)$ ,  $p(w) \sim N(0, Q)$ , где  $Q$  - ковариационная матрица погрешностей наблюдаемого процесса.

Для применения фильтра необходимо ввести следующие понятия:

—  $\hat{x}_k$  - апостериорная оценка состояния объекта в момент  $k$ , полученная по результатам наблюдений вплоть до момента  $k$  включительно.

—  $P_k$  - апостериорная ковариационная матрица ошибок, задающая оценку точности полученной оценки вектора состояния и включающая в себя оценку дисперсий погрешности вычисленного состояния и ковариации, показывающие выявленные взаимосвязи между параметрами состояния системы.

—  $\hat{x}_k^-$  - нескорректированная апостериорная оценка состояния объекта в момент времени  $k$ .

—  $P_k^-$  - нескорректированная апостериорная ковариационная матрица ошибок.

Знак «минус» в верхнем индексе обозначает, что это предсказанное промежуточное значение.

Чтобы иметь возможность применить фильтр, необходимо определить матрицы переменных определяющих динамику системы и измерений, а значит нужно указать матрицы  $A_k$ ,  $H_k$  и  $B_k$  для каждого шага по времени  $k$ . Матрицы  $A_k$  и  $H_k$  принимаются единичными матрицами не зависящими от момента времени  $k$ , так как в рамках решаемой задачи считается, что измерение есть линейная комбинация вектора состояния и некоторых случайных погрешностей (рис. 2). Поскольку, отсутствует дополнительная информация о процессе изменения напряженности поля, поэтому полагается, что управляющее воздействие  $B_k u_{k-1}$  равно нулю. Ковариационная матрица погрешности измерений  $R$  считается заданной. Для её задания используются данные о предполагаемой точности измерения, получаемых от датчика, эти данные указаны изготовителем. Определение параметров шума для задания ковариационной матрицы погрешностей наблюдаемого процесса -  $Q$  является более сложной задачей, так как требуется определить дисперсию процесса, что не всегда возможно, но можно подобрать этот параметр таким образом, чтобы он обеспечивал требуемый уровень фильтрации.

Каждая итерация фильтра Калмана состоит из двух этапов: предиктора (экстраполяции) и корректора [13, 23].

На этапе предиктора вычисляется оценка  $\hat{x}_k^-$  по оценке вектора состояния  $\hat{x}_{k-1}$  и ковариационная матрица ошибок  $P_k^-$  по следующим формулам:

$$\hat{x}_k^- = A \hat{x}_{k-1}, \quad (2)$$

$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q, \quad (3)$$

где матрица  $A$  и матрица  $Q$  полагаются установленными.

На этапе корректора вычисляется матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана  $-K_k$  по следующей формуле:

$$K_k = P_k^- H^T / (H P_k^- H^T + R) \quad (4)$$

где  $R$ ,  $H$  считаются известными.  $K_k$  используется для коррекции оценки состояния  $\hat{x}_k^-$  и ковариационной матрицы ошибок  $P_k^-$  следующим образом:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-), \quad (5)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-, \quad (6)$$

где  $I$  - матрица идентичности (единичная матрица).

Для того, чтобы рекурсивный алгоритм заработал, необходимо задать начальные априорные вектор состояния  $\hat{x}_0$  и ковариационную матрицу  $P_0$ . Поскольку они могут не совпадать с истинными значениями этих характеристик состояния динамической системы, то эти неверно заданные начальные условия дают искаженную оценку оцениваемого вектора состояния. Но фильтр предполагается асимптотически устойчивой системой, постепенно влияние начальных условий сойдет на нет и он станет работать устойчиво.

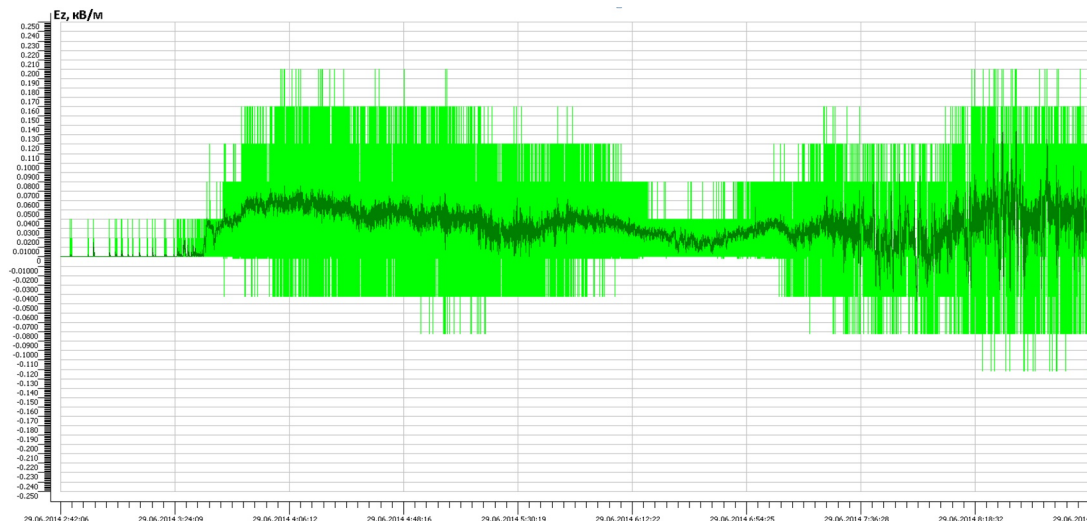


Фото 3. Результаты наблюдений вертикальной компоненты электрического поля атмосферы для 29 мая 2014 в пункте Кызбурун без обработки и с цифровой обработкой фильтром Калмана

## Результаты исследования

Теперь используем фильтр Калмана применительно к нашей задаче. Примеры данных полученных без фильтрации и с применением полученного алгоритма фильтра Калмана представлены на рис. 3.

Данные получаемые в результате цифровой обработки существенно лучше описывают процессы реальных флуктуаций электрического поля и позволяют делать выводы о характере его динамики.

## Заключение

В статье представлены некоторые результаты исследований вариаций электрического поля атмосферы. Построены графики флуктуаций электрического поля в условиях "ясной погоды" и с учетом грозных разрядов. Сделан вывод о эффективности цифровой обработки данных напряженности нарушенного и ненарушенного электрического поля атмосферы.

Фильтр Калмана применим и в постобработке, когда есть возможность учитывать все результаты измерений, менять начальные условия, тем самым подбирая оптимальные коэффициенты. Он достаточно прост в реализации и используется для обработки показаний различных датчиков во многих областях науки и техники. С применением цифровой обработки сигналов можно строить более точную оценку измеряемой величины, а благодаря пошаговой природе разработанного алгоритма, можно в реальном времени отслеживать состояние наблюдаемого процесса.

Дальнейшие шаги предполагают развитие программно-математического обеспечения усвоения данных наблюдений, ведение баз данных инструментальных наблюдений, прогноз фонового состояния геофизических параметров, выделение возмущений на фоне нормального состояния геофизических параметров, разработку математических моделей, описывающих состояние отдельных геофизических параметров и динамику системы для региона в целом.

## Список литературы

- [1] Анисимов С. В., "Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт", *Сборник трудов VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству*, ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова», 2012, 18–21. [Anisimov S. V., "Dinamika ehlektrichestva nevozmushchennoj atmosfery srednih shirot", *Sbornik trudov VII Vserossijskaya konferenciya po atmosfjernomu ehlektrichestvu*, FGBU «Glavnaya geofizicheskaya observatoriya im. A.I. Voejkova», 2012, 18–21].

- [2] Hale L. C., Croskey C. L., Mitchell J. D., “Measurements of middle atmosphere electric fields and associated electrical conductivities”, *Geophysical Research Letters*, **8:8** (1981), 927-930.
- [3] Красногорская Н. В., Ремизов В. П., “Вариации электрического поля атмосферы Земли”, *Физико-математические и биологические проблемы действия электромагнитных полей и ионизация воздуха*. Т. 1, Наука, М., 1975, 49–56. [Krasnogorskaya N. V., Remizov V. P., “Variacii ehlektricheskogo polya atmosfery Zemli”, *Fiziko-matematicheskie i biologicheskie problemy dejstviya ehlektromagnitnyh polej i ionizaciiya vozduha*. V. 1, Nauka, M., 1975, 49–56].
- [4] Мареев Е. А., Стасенко В. Н., “Российские исследования в области атмосферного электричества в 2003-2007 гг.”, *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, **45:5** (2009), 709–720. [Mareev E. A., Stasenko V. N., “Rossijskie issledovaniya v oblasti atmosfernogo ehlektrichestva v 2003-2007 gg.”, *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, **45:5** (2009), 709–720].
- [5] Мареев Е. А., “Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи”, *Успехи физических наук*, **180:5** (2010), 527–534. [Mareev E. A., “Dostizheniya i perspektivy issledovanij global’noj ehlektricheskoi cebi”, *Uspekhi fizicheskikh nauk*, **180:5** (2010), 527–534].
- [6] Редин А. А., Новикова О. В., Куповых Г. В., “Комплекс атмосферно-электрических наблюдений как элемент экологического мониторинга”, *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2009, № 10, 222-228. [Redin A. A., Novikova O. V., Kupovyh G. V., “Kompleks atmosferno-ehlektricheskikh nablyudenij kak ehlement ehkologicheskogo monitoringa”, *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*, 2009, № 10, 222-228].
- [7] Kelley M. C. et al., “Electrical measurements in the atmosphere and the ionosphere over an active thunderstorm: I. Campaign overview and initial ionospheric results”, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **90:A10** (1985), 9815-9823.
- [8] Wan H. et al., “Influence factor analysis of atmospheric electric field monitoring near ground under different weather conditions”, *Journal of Physics: Conference Series*, 1913, 012029.
- [9] Аджиев А. Х., Тапасханов В. О., Стасенко В. Н., “Система грозопеленгации на Северном Кавказе”, *Метеорология и гидрология*, 2013, № 1, 5–11. [Adzhiev A. H., Tapaskhanov V. O., Stasenko V. N., “Sistema grozopelengacii na Severnom Kavkaze”, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2013, № 1, 5–11].
- [10] Аджиев А. Х., Стасенко В. Н., Шаповалов А. В., Шаповалов В. А., “Напряженность электрического поля атмосферы и грозовые явления на Северном Кавказе”, *Метеорология и гидрология*, 2016, № 3, 46–54. [Adzhiev A. H., Stasenko V. N., SHapovalov A. V., SHapovalov V. A., “Napryazhennost’ ehlektricheskogo polya atmosfery i grozovye yavleniya na Severnom Kavkaze”, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2016, № 3, 46–54].
- [11] *Измеритель электрического поля EFM550. Руководство пользователя* <http://www.vaisala.com>, 2004 ((дата обращения 02.12.2017)).
- [12] Аджиева А. А., Машуков И. Х., Шаповалов В. А., “Исследование напряженности приземного электрического поля атмосферы в районе города Нальчика с учетом грозовой активности”, *Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата*, Сборник трудов II международной научной конференции с элементами научной школы, 2015, 62–66. [Adzhieva A. A., Mashukov I. H., SHapovalov V. A., “Issledovanie napryazhennosti prizemnogo ehlektricheskogo polya atmosfery v rajone goroda Nal’chika s uchetom grozovoi aktivnosti”, *Innovacionnye metody i sredstva issledovanij v oblasti fiziki atmosfery, gidrometeorologii, ehkologii i izmeneniya klimata*, Sbornik trudov II mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii s ehlementami nauchnoj shkoly, 2015, 62–66].
- [13] Аджиева А. А., Машуков И. Х., Шаповалов В. А., “Использование фильтра Калмана в обработке данных хода напряженности электрического поля атмосферы”, *Инженерный вестник Дона*, **45:2** (2017), 87–96. [Adzhieva A. A., Mashukov I. H., SHapovalov V. A., “Ispol’zovanie fil’tra Kalmana v obrabotke dannyh hoda napryazhennosti ehlektricheskogo polya atmosfery”, *Inzhenernyj vestnik Dona*, **45:2** (2017), 87–96].
- [14] Каршов Р. С., “Применение фильтра Калмана в системе стабилизации БПЛА вертолетного типа”, *Проблемы современной науки и образования*, **51:9** (2016), 23–25. [Karshov R. S., “Primenenie fil’tra Kalmana v sisteme stabilizacii BPLA vertoletnogo tipa”, *Problemy sovremennoj nauki i obrazovaniya*, **51:9** (2016), 23–25].

- [15] Шахтарин Б. И., *Фильтры Венера и Калмана*, Гелиос АРВ, М., 2008, 408 с. [Shahtarin B. I., *Fil'try Vinera i Kalmana*, Gelios ARV, M., 2008, 408 pp.]
- [16] Дегтярёв А. А., Тайль Ш., *Элементы теории адаптивного расширенного фильтра Калмана*, Препринт №26, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2003, 35 с. [Degtyaryov A. A., Tajl' SH., *Elementy teorii adaptivnogo rasshirennogo fil'tra Kalmana*, Preprint №26, IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2003, 35 pp.]
- [17] Kownacki C., "Optimization approach to adapt Kalman filters for the realtime application of accelerometer and gyroscope signals' filtering", *Digit. Signal Process*, **21**:1 (2011), 131–140.
- [18] Lesniak, A., Danek T., Wojdyla M., "Application of Kalman filter to noise reduction in multichannel data", *Schedae Informaticae*, **17**:18 (2009), 63–73.
- [19] Simon, D., Chia T. L., "Kalman filtering with state equality constraints", *IEEE Trans. Aero. Elec. Sys*, **38**:1 (2002), 128–136.
- [20] Namvaran M., Negarestani A., "Noise Reduction in Radon Monitoring Data Using Kalman Filter and Application of Results in Earthquake Precursory Process Research", *Acta Geophys.*, **63**:2 (2015), 329–351.
- [21] Maryak J. L., Spall J. C., Heydon B. D., "Use of the Kalman Filter for Inference in State-Space Models With Unknown Noise Distributions", *IEEE Trans. Automat. Contr*, **1**:49 (2004), 87–90.
- [22] Greg Welch, Gary Bishop, *An Introduction to the Kalman Filter*, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill. April 5, 2004. UNC-Chapel Hill, TR 95-041, 2004, 16 pp.
- [23] Kalman R. E., "A new approach to linear filtering and prediction problems", *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering*, 1960, № 82 (Series D), 35–45.
- [24] Степанов О. А., "Фильтр Калмана: история и современность", *Гироскопия и навигация*, **69**:2 (2010), 107–121. [Stepanov O. A., "Fil'tr Kalmana: istoriya i sovremennost'", *Giroskopiya i navigaciya*, **69**:2 (2010), 107–121].

## Список литературы (ГОСТ)

- [1] Анисимов С. В. Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт // Сборник трудов VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству: ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова», 2012. С. 18–21.
- [2] Hale L. C., Croskey C. L., Mitchell J. D. Measurements of middle atmosphere electric fields and associated electrical conductivities // *Geophysical Research Letters*. 1981. vol. 8. no. 8. pp. 927-930.
- [3] Красногорская Н. В., Ремизов В. П. Вариации электрического поля атмосферы Земли. Физико-математические и биологические проблемы действия электромагнитных полей и ионизация воздуха. Т. 1. М.: Наука, 1975. С. 49–56.
- [4] Мареев Е. А., Стасенко В. Н. Российские исследования в области атмосферного электричества в 2003-2007 гг. // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45. №5. С. 709–720.
- [5] Мареев Е. А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // *Успехи физических наук*. 2010. Т. 180. № 5. С. 527–534.
- [6] Редин А. А., Новикова О. В., Куповых Г. В. Комплекс атмосферно-электрических наблюдений как элемент экологического мониторинга // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2009. №10. С. 222-228.
- [7] Kelley M. C. et al. Electrical measurements in the atmosphere and the ionosphere over an active thunderstorm: 1. Campaign overview and initial ionospheric results // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 1985. vol. 90. A10. pp. 9815-9823.
- [8] Wan H. et al. Influence factor analysis of atmospheric electric field monitoring near ground under different weather conditions // *Journal of Physics: Conference Series*. 1913. 012029.

- [9] Аджиев А. Х., Тапасханов В. О., Стасенко В. Н. Система грозопеленгации на Северном Кавказе // *Метеорология и гидрология*. 2013. №1. С. 5–11.
- [10] Аджиев А. Х., Стасенко В. Н., Шаповалов А. В., Шаповалов В. А. Напряженность электрического поля атмосферы и грозовые явления на Северном Кавказе // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 3. С. 46–54.
- [11] Измеритель электрического поля EFM550. Руководство пользователя. 2004. <http://www.vaisala.com>(дата обращения 02.12.2017)
- [12] Аджиева А. А., Машуков И. Х., Шаповалов В. А. Исследование напряженности приземного электрического поля атмосферы в районе города Нальчика с учетом грозовой активности // *Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата: Сборник трудов II международной научной конференции с элементами научной школы*. 2015. С. 62–66.
- [13] Аджиева А. А., Машуков И. Х., Шаповалов В. А. Использование фильтра Калмана в обработке данных хода напряженности электрического поля атмосферы // *Инженерный вестник Дона*. 2017. Т. 45. №2. С. 87–96.
- [14] Каршов Р. С. Применение фильтра Калмана в системе стабилизации БПЛА вертолетного типа // *Проблемы современной науки и образования*. 2016. Т. 51. № 9. С. 23–25.
- [15] Шахтарин Б. И. Фильтры Винера и Калмана. М.: Гелиос АРВ, 2008. 408 с.
- [16] Дегтярёв А. А., Тайль Ш. Элементы теории адаптивного расширенного фильтра Калмана. Препринт №26. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2003. 35 с.
- [17] Kownacki C. Optimization approach to adapt Kalman filters for the realtime application of accelerometer and gyroscope signals' filtering // *Digit. Signal Process.* 2011. vol. 21. no. 1. pp. 131–140.
- [18] Lesniak, A., Danek T., Wojdyla M. Application of Kalman filter to noise reduction in multichannel data // *Schedae Informaticae*. 2009. vol. 17. no. 18. pp. 63–73.
- [19] Simon, D., Chia T. L. Kalman filtering with state equality constraints // *IEEE Trans. Aero. Elec. Sys.* 2002. vol. 38. no. 1. pp. 128–136.
- [20] Namvaran M., Negarestani A. Noise Reduction in Radon Monitoring Data Using Kalman Filter and Application of Results in Earthquake Precursory Process Research // *Acta Geophys.* 2015. vol. 63. no. 2. pp. 329–351.
- [21] Maryak J. L., Spall J. C., Heydon B. D. Use of the Kalman Filter for Inference in State-Space Models With Unknown Noise Distributions // *IEEE Trans. Automat. Contr.* 2004. vol. 1. no. 49. pp. 87–90.
- [22] Greg Welch, Gary Bishop. An Introduction to the Kalman Filter. Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill. April 5, 2004. UNC-Chapel Hill, TR 95-041. 2004. 16 p.
- [23] Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems // *Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering*. 1960. vol. 82 (Series D). pp. 35–45.
- [24] Степанов О. А. Фильтр Калмана: история и современность // *Гироскопия и навигация*. 2010. Т. 69. №. 2. С. 107–121.

**Для цитирования:** Машуков И.Х., Шаповалов В.А., Аджиева А.А. Алгоритмы обработки данных напряженности электрического поля с использованием фильтра Калмана // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. № 3(23). С. 131-139. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-23-3-131-139

**For citation:** Mashukov I. Kh., Shapovalov V. A., Adzhieva A. A. Algorithms of electric field strength data processing using Kalman filter, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2018, **23**: 3, 131-139. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-23-3-131-139



DOI: 10.18454/2079-6641-2018-23-3-131-139

MSC 60G35

## **ALGORITHMS OF DIGITAL PROCESSING OF AN EARTH NEAR-SURFACE ELECTRIC FIELD INTENSITY USING A KALMAN FILTER**

**I. Kh. Mashukov<sup>1</sup>, V. A. Shapovalov<sup>1</sup>, A. A. Adzhieva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> High-Mountain Geophysical Institute, 360030, Nalchik, Lenina av., 2, Russia

<sup>2</sup> Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after. V.M. Kokova, 360030, Russia, Nalchik, Tarchokova str. 1 "a".

E-mail: idar84@rambler.ru

With the help of the Vaisala EFM550 electric field meter, long-term studies (2010-2017) of the course of the electric field strength in the area of the city of Nalchik were carried out. The article considers the use of digital processing to improve the quality of data obtained with a network of sensors operating in the hardware and software complex in the monitoring center of the geophysical situation over the southern region of the Russian Federation at the FSBI "High-Mountain Geophysical Institute". The possibilities of applying Kalman filtering to refine the data of instrumental measurements of the electric field strength of the atmosphere are investigated. A comparative analysis of the obtained data on the course of the electric field strength before and after filtration is given.

*Key words: electric field of the atmosphere, measurement data, electrical field intensity sensor, digital signal processing, improved data algorithms, Kalman filter, intensity of the surface field.*

© Mashukov I. Kh., et al, 2018