

Технология нечеткой логики для обработки сигналов наземного радиометрического комплекса дистанционного зондирования тропосферы

С. И. Иванов¹, К. А. Дрождов²
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

¹ivanov_si@spbstu.ru, ²kirill.drozhzhov@yandex.ru

Г. Н. Ильин
Институт прикладной астрономии
Российской академии наук
igen@iaaras.ru

Аннотация. В работе представлены результаты разработки алгоритма обработки данных дистанционного мониторинга параметров тропосферы с помощью наземного радиометра водяного пара. Для реализации алгоритма использованы технологии нечеткой логики и метод сингулярного спектрального анализа. Алгоритм позволяет осуществлять фильтрацию сигнала от шума в квазиреальном масштабе времени и прогнозирование данных в период воздействия интенсивных атмосферных осадков. Приведены результаты компьютерного моделирования, показывающие хорошие точностные характеристики разработанного алгоритма. Проведено сравнение данных измерений интегрального содержания водяного пара в тропосфере, полученных с помощью наземного радиометра, с данными измерений с помощью глобальных навигационных спутниковых систем.

Ключевые слова: нечеткая логика; радиометр водяного пара; сингулярный спектральный анализ; дистанционное зондирование; тропосферная задержка радиосигнала

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее эффективным техническим инструментом получения оперативных данных о ряде параметров атмосферы – интегральном содержании водяного пара Q ($\text{кг}/\text{м}^2$), конденсированной воды W ($\text{кг}/\text{м}^2$), и влажностной тропосферной задержки τ (мм) – является наземный автоматизированный радиометрический комплекс (НРК) на базе двухчастотного радиометра водяного пара [1-3]. К преимуществам НРК относятся высокая точность измерений параметров, большой объем получаемых измерительных данных и относительно малая стоимость. К недостаткам НРК следует отнести низкую точность оценок параметров в период интенсивных атмосферных осадков в виде дождя или мокрого снега. В результате, часть данных, приходящихся на время дождевых осадков, является недостоверными и должна быть исключена из рассмотрения.

В работе [4] предложен алгоритм обработки результатов измерения интегрального содержания водяного пара Q . Данный алгоритм включает фильтрацию

шума и прогнозирования значений временного ряда данных на интервале получения аномальных отсчетов. Входными данными цифрового процессора, реализующего алгоритм обработки данных НРК, является временной ряд отсчетов Q_i и датчика атмосферных осадков V_i . В настоящей работе рассмотрен алгоритм обработки результатов измерения параметра Q , дополнительно учитывающий данные расчета содержания конденсированной воды в облаках W на основе измерений яркостных температур излучения атмосферы. Дополнительная входная информация позволяет повысить эффективность разработанного алгоритма, снизить потери наблюдательного времени и сохранить приемлемую точность измерений параметров.

II. МНОГОКАНАЛЬНЫЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ТРОПОСФЕРЫ

Наземный автоматизированный радиометрический комплекс дистанционного зондирования атмосферы установлен и успешно работает в течение трех лет в обсерваториях российской национальной радиоинтерферометрической сети со сверхдлинными базами (РСДБ) «КВАЗАР-КВО» [5].

На рис. 1 представлена функциональная схема НРК. НРК состоит из двухканального радиометра водяного пара (РВП), измеряющего яркостные температуры излучения атмосферы на частотах $f_1=20,7$ ГГц (канал А) и $f_2=31,4$ ГГц (канал В см. рис. 1) микроволнового метеорологического температурного профилемера МТР-5 с центральной частотой $f_3=56,7$ ГГц и метеостанции МК-15 [6, 7].

СВЧ приемные устройства РВП и МТР-5 выполнены по модуляционной схеме Дикке. Описание аппаратно-программных средств рассматриваемого НРК, приведено в работах [2-4]. Входными данными центра дистанционного управления и мониторинга (Центр ДУиМ рис. 1) являются яркостные температуры T_{f1} и T_{f2} атмосферы каналов А и В РВП, яркостная температура $T_{f3}(\theta)$ сканирующего по углу места θ радиометра МТР-5 и метеопараметры МК-15.

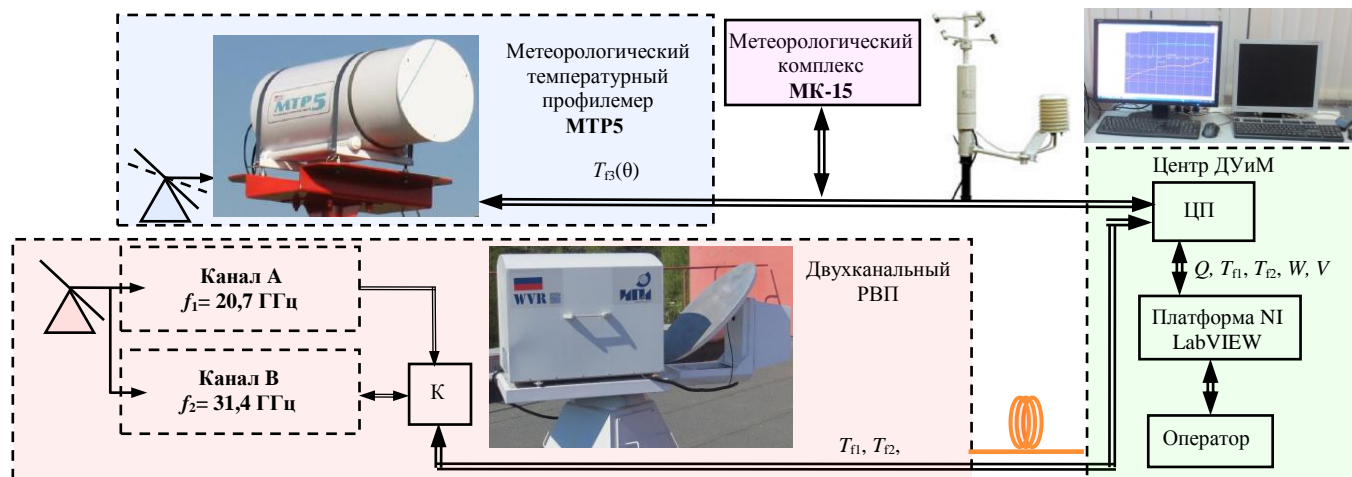


Рис. 1. Функциональная схема наземного радиометрического комплекса

На основании получаемых данных измерений центральным процессором (ЦП) в соответствии с разработанными математическими моделями [2] в квазиреальном масштабе времени проводится расчет значений интегрального содержания водяного пара Q , интегрального водосодержания W и тропосферной задержки радиосигнала τ .

Дальнейшая обработка полученных данных, включая прогнозирование значений временного ряда данных на интервале получения аномальных отсчетов во время интенсивных атмосферных осадков, осуществляется на платформе NI LabVIEW. Описание алгоритма обработки дополнительно учитывающего текущие значения интегрального водосодержания W и метеопараметров приведено в следующем разделе.

III. ОБРАБОТКА ДАННЫХ РВП НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И МЕТОДА СИНГУЛЯРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Блок схема алгоритма обработки временного ряда данных РВП, реализованного в графической среде программирования LabVIEW, представлена на рис. 2. Для программной реализации алгоритма обработки данных РВП используется пакет расширения LabVIEW PID and Fuzzy Logic Toolkit [9]. Платформа LabVIEW National Instruments (NI) существенно упрощает аппаратную реализацию алгоритма обработки и позволяет проводить обработку данных в квазиреальном масштабе времени. Математический аппарат нечеткой логики позволяет определить принадлежность значения текущих отсчетов данных НРК к аномальным значениям и перейти в режим прогнозирования.

Построение нечеткой системы логического вывода выполнено на базе алгоритма типа Мамдани [9,10], который позволяет объединять численную и лингвистическую информацию, и предоставляет возможность перехода от заключений эксперта к нечетким IF-THEN-правилам. Проведенный анализ показывает, что

яркостные температуры атмосферы T_n и T_d каналов А и В РВП не могут быть использованы в качестве входных переменных для модуля нечеткой логики. Статистическая обработка данных НРК полученных в течение длительного интервала времени и для разных географических положений радиометрических комплексов показала, что входными переменными для модуля нечеткой логики наиболее эффективно использовать отсчеты интегрального содержания водяного пара Q_i , конденсированной воды W_i и датчика атмосферных осадков V_i .

Программный блок нечеткой логики при аномальных значениях переменной Q_i , определяет работу алгоритма обработки в режиме векторного прогнозирования. Для векторного прогнозирования используется метод сингулярного спектрального анализа – «Гусеница» (ССА-«Гусеница» рис. 2) [11, 12]. Этот метод также позволяет осуществлять адаптивное подавление шумовой компоненты временного ряда данных и выделение его основной трендовой компоненты в режиме, когда значения переменной Q_i , не являются аномальными (см. рис. 2). Подробное описание метода ССА и его программной реализации в графической среде LabVIEW, содержится в работах [4, 11, 12]. Базовый алгоритм метода ССА содержит этапы сингулярного разложения с помощью виртуального прибора SVD из палитры Linear Algebra LabVIEW, восстановления полезного сигнала и векторного прогнозирования.

Разработанный алгоритм включает блок начальной обработки, когда объем N вектор-выборки отсчетов Q_i , менее 360 и, соответственно, размер скользящего усредняющего окна L менее 100 (рис. 2). Реализация алгоритма обработки требует создания регистров памяти (РП) и регистров сдвига (РС) типа FIFO, а также использование каузального цифрового медианного фильтра (Фильтр) на выходе программы (рис. 2).

На рис. 3 представлена архитектура контроллера нечеткой логики типа Мамдани для алгоритма обработки данных РВП. Для перехода от численной переменной к

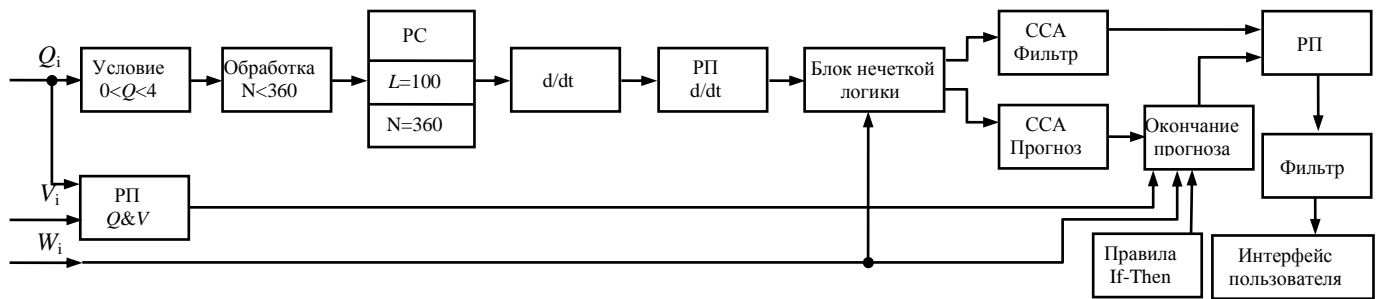


Рис. 2. Блок схема алгоритма обработки временного ряда данных РВП

лингвистической информации (процесс fuzzification) и наоборот (процесс defuzzification) нами использовались функции принадлежности (рис. 3). Особенностью функций принадлежности для процесса фузификации является их 3-D размерность, когда число входных переменных равно трем: уровень конденсированной воды W_i , датчика атмосферных осадков V_i , и значение производной по времени интегрального содержания водяного пара dQ/dt . Тип и параметры трехмерной матрицы функций принадлежности получены в результате статистической обработки данных НРК на интервалах времени действия атмосферных осадков на антенну РВП. На рис. 3 приведен типичный вид функции принадлежности гауссовского типа для процесса фузификации, аргументом которой является значение dQ/dt при фиксированных значениях W_i и V_i .

Другой особенностью используемой нами архитектуры контроллера нечеткой логики типа Мамдани является использование весовых коэффициентов в правиле центра суммы функций принадлежности при переходе от нечеткого выходного множества к выходной логической переменной [9, 10]. Весовые коэффициенты учитывают вероятностные свойства функций принадлежности в данной задаче.

Программный блок окончания работы алгоритма обработки в режиме прогноза (рис. 2) функционирует по детерминированным IF-THEN-правилам в соответствии со значениями входных переменных W_i , Q_i и V_i . Используемые IF-THEN-правила также являются следствием статистической обработки данных НРК в процессе обучения.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ НАТУРНЫХ ДАННЫХ РВП

Для анализа эффективности разработанного алгоритма обработки необходимо рассчитать среднеквадратическую ошибку оценки информационного сигнала радиометра Q_i , наблюдаемого на фоне нестационарной аддитивной помехи. Для проведения такого анализа нами разработан генератор, имитирующий временной ряд данных измерений интегрального содержания водяного пара Q на фоне нестационарного гауссова шума и импульсной помехи различной интенсивности [8]. Такая модель достаточно точно отражает информационный сигнал реального РВП в условиях воздействия атмосферных осадков.

С помощью генератора-имитатора данных РВП рассчитана зависимость СКО сигнала ошибки от СКО входного шума при фиксированных параметрах импульсной помехи. Анализ результатов расчета показал, что при изменении мощности шума в 16 раз среднеквадратическая ошибка ϵ возрастает в 4 раза, что характерно для оптимальных алгоритмов обработки. Среднеквадратическая ошибка ϵ оценки полезного сигнала Q с использованием разработанного алгоритма меньше, чем ошибка при других методах фильтрации, например, с использованием фильтра низких частот и Савцкого–Голея.

Для проверки работоспособности и эффективности разработанного алгоритма была проведена обработка данных радиометров водяного пара, входящих в состав российского радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» и выполняющих непрерывный мониторинг параметров тропосферы в период с января 2016 по декабрь 2017 года.

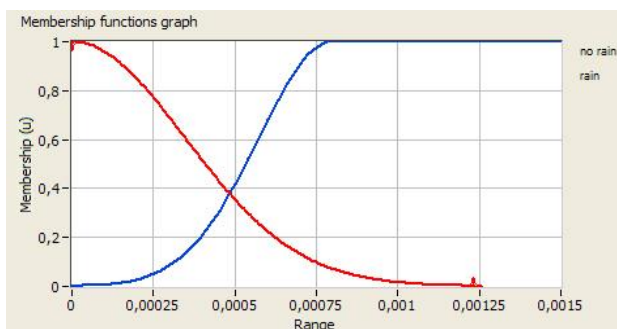
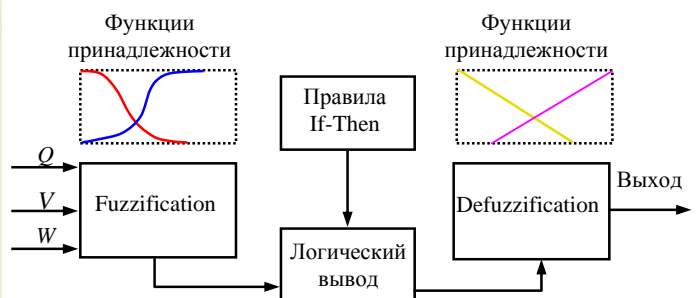


Рис. 3. Функции принадлежности алгоритма и контроллер нечеткой логики Мамдани



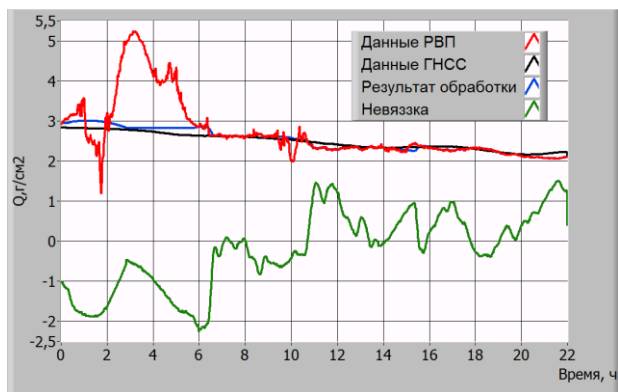


Рис. 4. Временной ряд данных РВП (красный график), данных ГНСС (черный график), результата обработки (синий график) и разность между результатом обработки и данными ГНСС, увеличенная в 10 раз (зеленый график)

На рис. 4 представлены результаты сравнения данных интегрального содержания водяного пара Q в зените, полученных в радиоастрономической обсерватории «Зеленчукская» в январе-апреле 2017 г. с данными ГНСС за тот же период. Как показано на рис. 4, длительность временной выборки составляет 22 ч, из них более 6 ч составляют интенсивные атмосферные осадки, когда обработка данных ведется в режиме предсказания. Невязка – разность значений параметра Q , измеренная независимыми методами – с помощью РВП и ГНСС – составляет для данного примера не более $\pm 0.2 \text{ г/см}^2$ на всем интервале времени наблюдения выборки. Отметим, что данная величина не эквивалентна ошибке измерений, и ее малое значение говорит о близости результатов измерений параметра Q с помощью наземного РВП и системой ГЛОНАСС. Кроме того, данные ГНСС поступают с задержкой 24 ч.

Использование дополнительных входных переменных интегрального водосодержания W и датчика атмосферных осадков V для контроллера нечеткой логики типа Мамдани позволили улучшить точностные характеристики алгоритма обработки по сравнению с предыдущей версией алгоритма, предложенного авторами в работе [4].

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование дополнительных входных переменных интегрального водосодержания W и датчика атмосферных осадков V для контроллера нечеткой логики типа Мамдани позволили разработать эффективный алгоритм обработки данных наземного РВП в составе радиометрического комплекса для мониторинга параметров тропосферы в квазиреальном времени. Разработанный алгоритм позволяет существенно сократить потери наблюдательного

времени без существенной потери точности измерений в период интенсивных атмосферных осадков. Результаты компьютерного моделирования и натурных испытаний подтверждают небольшую величину среднеквадратической ошибки измерений в широком диапазоне воздействия внешних нестационарных помех. Так разность значений данных измерений интегрального содержания водяного пара, полученных с помощью наземного РВП и системой ГЛОНАСС для 22 часовой выборки была менее $\pm 0.2 \text{ г/см}^2$, включая период интенсивных осадков, как показано на графике рис. 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Animesh Maitra and Rohit Chakraborty. Prediction of Rain Occurrence and Accumulation Using Multifrequency Radiometric Observations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2018. V. PP, Issue 99, pp. 1–9. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2783848
- [2] Ilyin G. N., Troitsky A. V. Determining the Tropospheric Delay of a Radio Signal by the Radiometric Method. Radiophysics and Quantum Electronics. September 2017, Volume 60, Issue 4, pp. 291–299. DOI:10.1007/s11141-017-9799-6
- [3] Arsaev I.E., Bykov V.Yu., Il'in G.N., Yurchuk E.F. Water Vapor Radiometer: Measuring Instrument of Atmospheric Brightness Temperature. Measurement Techniques. August 2017, Volume 60, Issue 5, pp. 497–504. DOI:10.1007/s11018-017-1224-1
- [4] Drozhzhov K.A., Ivanov S.I., Ilin G.N. Adaptive data processing of a ground-based radiometric complex for remote sensing of tropospheric parameters // 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS) – Proceedings/25-27 Oct. 2017, St.-Petersburg, Russia pp.297-300, DOI: 10.1109/CTS.2017.8109550
- [5] IAA RAS (2017) Available at: <http://iaaras.ru/en/> (accessed 05 April 2018).
- [6] НПО "АТТЕХ" (2017) Available at: <http://attex.net/RU/index.php#> (accessed 05 April 2018).
- [7] НПО «Тайфун» Available at: <http://www.rpatyphoon.ru/product/devices/meteo/mk-15/> (accessed 05 April 2018).
- [8] Drozhzhov Kirill A., Ivanov Sergey I. The research and implementation of processing algorithm for a non-stationary signal with input sampled-data missing and intense impulse noise // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) – Proceedings/29 Jan.-1 Feb. 2018, Moscow, Russia pp.1071-1074, DOI:10.1109/EIConRus.2018.8317275
- [9] Pedro Ponce-Cruz, Fernando D. Ramirez-Figueroa. Intelligent Control Systems with LabVIEW™. Springer-Verlag London Limited 2010. 216 p.
- [10] Jerry M. Mendel, Hani Hagras, Woei-Wan Tan, William W. Melek, Hao Ying. Introduction to type-2 fuzzy logic control : theory and applications. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. Copyright © 2014 by IEEE. 356 p.
- [11] Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A. Analysis of Time Series Structure. Chapman&Hall/CRC: Boca Raton London New York Washington, DC. 2003. 310 p.
- [12] Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular Spectrum Analysis for Time Series. Springer: Heidelberg New York Dordrecht London. 2013. 119 p.