

К вопросу выбора времени цифрового накопления выходного сигнала СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы

И.Ю. Холодов¹, М.А. Матюков¹, Е.В. Федосеева¹, И.Н. Ростокин¹, Г.Г. Щукин^{1,2}

¹ Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых»

602264, г. Муром, ул. Орловская, д.23

² Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13

В статье рассмотрен вопрос выбора времени цифрового накопления выходного сигнала СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы.

Определена задача выбора времени цифрового накопления выходного сигнала СВЧ радиометрической системы для различных метеорологических условий проведения измерений. Приведена информация по взаимосвязи среднеквадратичного отклонения выходного сигнала с временем его накопления. Представлен метод динамического изменения времени цифрового накопления выходного сигнала путем вычисления отношения среднеквадратичных отклонений сигналов при двух величинах времени накопления выходного сигнала. Приведены результаты применения алгоритма динамического изменения времени накопления СВЧ радиометрической системы.

Ключевые слова: СВЧ радиометрическая система, чувствительность, время накопления выходных сигналов, цифровое накопление выходных сигналов.

On the issue of choosing the time of digital accumulation of the output signal of the microwave radiometric system for remote sensing of the atmosphere

I.Yu. Kholodov¹, M.A. Matykov¹, E.V. Fedoseeva¹, I.N. Rostokin¹, G.G. Shchukin^{1,2}

¹ Murom Institute of Vladimir State University.

² Mozhaisky Military Space Academy.

The article discusses the issue of selecting the time for digital accumulation of the output signal from a microwave radiometry system for atmospheric remote sensing.

The problem of choosing the time of digital accumulation of the output signal of a microwave radiometric system for various meteorological conditions is defined. Information is provided about the relationship between the root mean square (RMS) deviation of the output signal and the accumulation time. A method is presented to dynamically change the accumulation time based on calculating the ratio of RMS deviations for two different accumulation times. The results of using this algorithm to adjust the accumulation time for a microwave radiometer are presented.

Keywords: Microwave radiometric system, sensitivity, time of accumulation of output signals, digital accumulation of output signals.

Введение

При краткосрочном прогнозировании состояния пограничного слоя атмосферы основными объектами изучения являются микрометеорологические процессы с периодом от долей секунд до нескольких минут и мезометеорологические процессы с периодом от минуты до нескольких часов [1]. За эти промежутки времени происходят колебания температуры, относительной влажности и давления воздуха, которые вносят основной вклад в модели прогноза. Также за это время происходит развитие кучевой облачности, что приводит к образованию и выпадению осадков.

Поэтому в системе сбора и обработки данных измерений СВЧ радиометрической системы необходимо выбрать такое время цифрового накопления (аналоговой постоянной времени интегрирования выходного низкочастотного фильтра), при котором выходной сигнал наиболее точно отслеживает изменения микрометеорологических процессов в пограничном слое атмосферы. В связи с этим условием проведения измерений, описанный ранее алгоритм цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы по максимуму коэффициента корреляции с метеопараметрами [7] будет обладать определенным недостатком: в нем время накопления не является динамичным, что при определенных условиях проведения измерений может негативно сказаться на способность системы реагировать на изменения метеорологических процессов, протекающих в течении времени меньшем времени накопления выходных сигналов. Поэтому в СВЧ радиометрической системе необходимо реализовать динамическое изменение времени цифрового накопления выходных сигналов, которое будет подстраиваться под текущие метеоусловия проведения измерения.

Среднеквадратичное отклонение выходного сигнала и его время накопления в СВЧ радиометрической системе

Известно, что минимальный сигнал, который может быть зарегистрирован с помощью радиометра, равен по амплитуде стандартному отклонению (среднеквадратичному значению) выходных флуктуаций ΔT , определяемому формулой пороговой чувствительности [2]. Для компенсационной схемы построения радиометра данная формула имеет вид:

$$\Delta T = \frac{T_N}{\sqrt{2\Delta f\tau}}, \quad (1)$$

где T_N – шумовая температура радиометрической системы;

Δf – полоса пропускания системы;

τ – постоянная времени интегрирования системы.

Среднеквадратичное отклонение шумовой компоненты сигнала на выходе после фильтра нижних частот $\sqrt{\sigma_F^2}$ при этом равно [4]:

$$\sqrt{\sigma_F^2} = \frac{T_N + T_S}{\sqrt{2\Delta f\tau}}, \quad (2)$$

где T_S – шумовая температура выходного сигнала.

Исходя из выражений (1) и (2), среднеквадратичное отклонение выходного сигнала радиометрической системы уменьшается при увеличении времени накопления τ , что приводит к увеличению чувствительности системы, но также может приводить к потере информации о быстроизменяющихся атмосферных процессах.

На рис. 1 представлен участок сигнала канала 3,2 см на горизонтальной поляризации за 11 августа 2024 года при двух величинах времени накопления сигнала, $\tau_1 = 15$ с и $\tau_2 = 300$ с, и график количества выпавших осадков за данных промежутков времени.

Из рис. 1 видно, что при увеличении времени накопления с $\tau_1 = 15$ с до $\tau_2 = 300$ с изменение выходного сигнала сопровождается сглаживающим эффектом высокочастотных составляющих сигнала, что может отразиться на способности системы реагировать на изменения состояния быстропротекающих метеорологических явлений, в связи с чем было предложено реализовать метод динамического изменения времени цифрового накопления выходного сигнала СВЧ радиометрической системы.

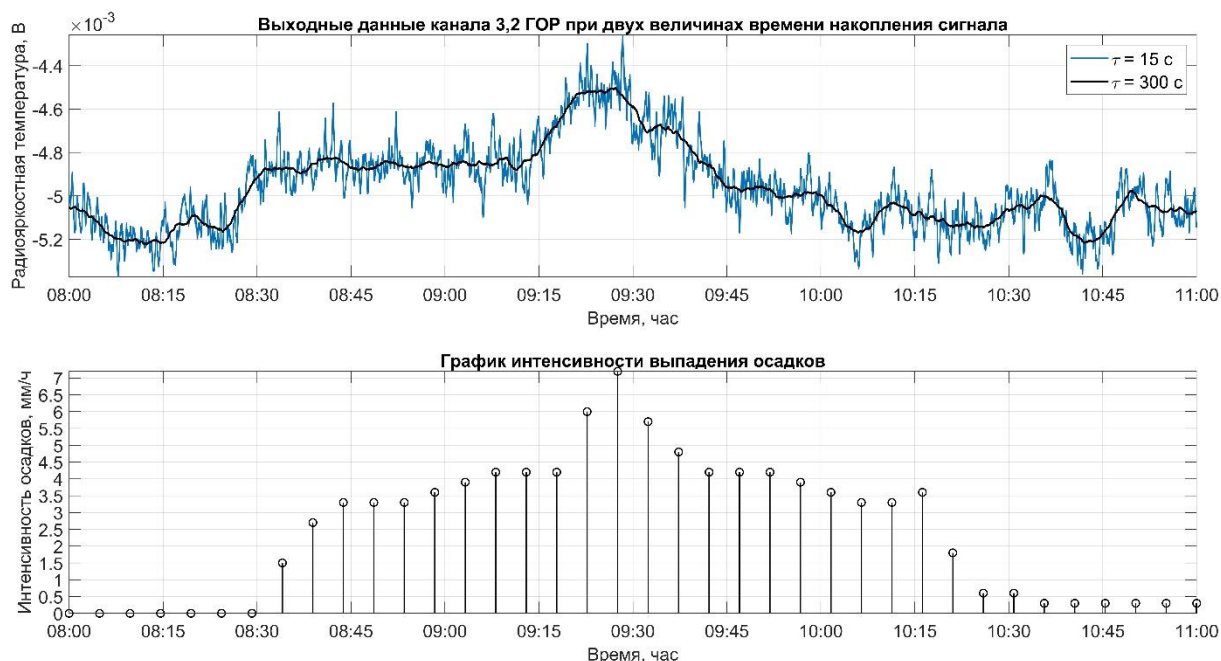


Рис. 1. Выходные данные канала 3,2 см на горизонтальной поляризации за 11 августа 2024 года при двух величинах времени накопления сигнала и график количества выпавших осадков

Метод динамического изменения времени накопления выходного сигнала СВЧ радиометрической системы

Известно, что увеличение времени накопления выходного сигнала радиометрической системы приводит к уменьшению его среднеквадратичного отклонения. Данная зависимость представлена на рис. 2.

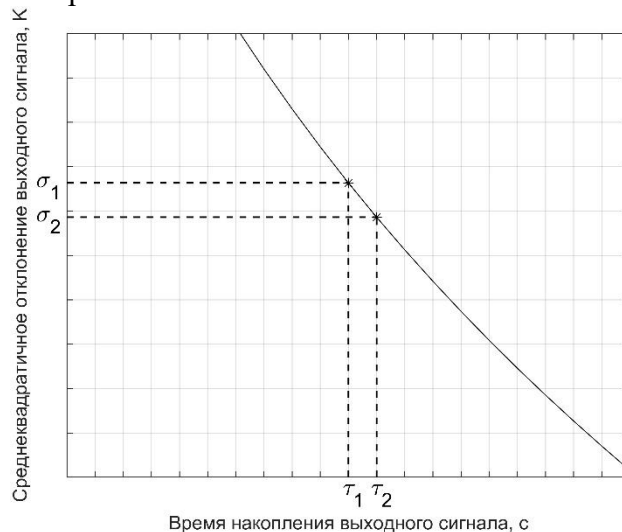


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичного отклонения выходного сигнала от величины времени накопления

Алгоритм динамического изменения времени цифрового накопления был определен следующим образом: для измеренного выходного сигнала системы вычисляется два среднеквадратичных отклонения σ_1 и σ_2 при времени накопления τ_1 и $\tau_2 = \tau_1 + 1$ с (рис. 2). Затем вычисляется отношение разницы этих отклонений $\Delta\sigma$ к величине σ_1 :

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_1} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1} \cdot 100\% \leq L. \quad (3)$$

Если полученный результат меньше некоторого порога срабатывания L , то время накопления выходного сигнала принимается равным τ_2 , и выполняется суммирование сигнала в течении заданного промежутка времени. Если полученный результат в выражении (3) больше порога срабатывания, то величины τ_1 и τ_2 сдвигаются на 1 с и вычисление повторяется.

Основная задача при реализации предполагаемого алгоритма состоит в установлении значения порога срабатывания L . С целью решения данной задачи был выполнен анализ отношения среднеквадратичных отклонений в выражении (3) при τ_2 равным времени накопления при максимальной корреляции выходного сигнала системы с метеопараметрами пограничного слоя атмосферы. По анализу данных, полученных с СВЧ радиометрической системы за август 2024 года, получили значение $L = 0,25-0,3\%$, которое наиболее часто наблюдалось в эксперименте.

На рис. 3 представлены графики накопленного сигнала канала 3,2 см на горизонтальной поляризации за 11 августа 2024 года при динамическом изменении времени накопления для $L = 0,3\%$ и при фиксированном времени накопления $\tau = 299$ с по максимуму коэффициента корреляции, а также график изменения времени накопления при данном методе расчета.

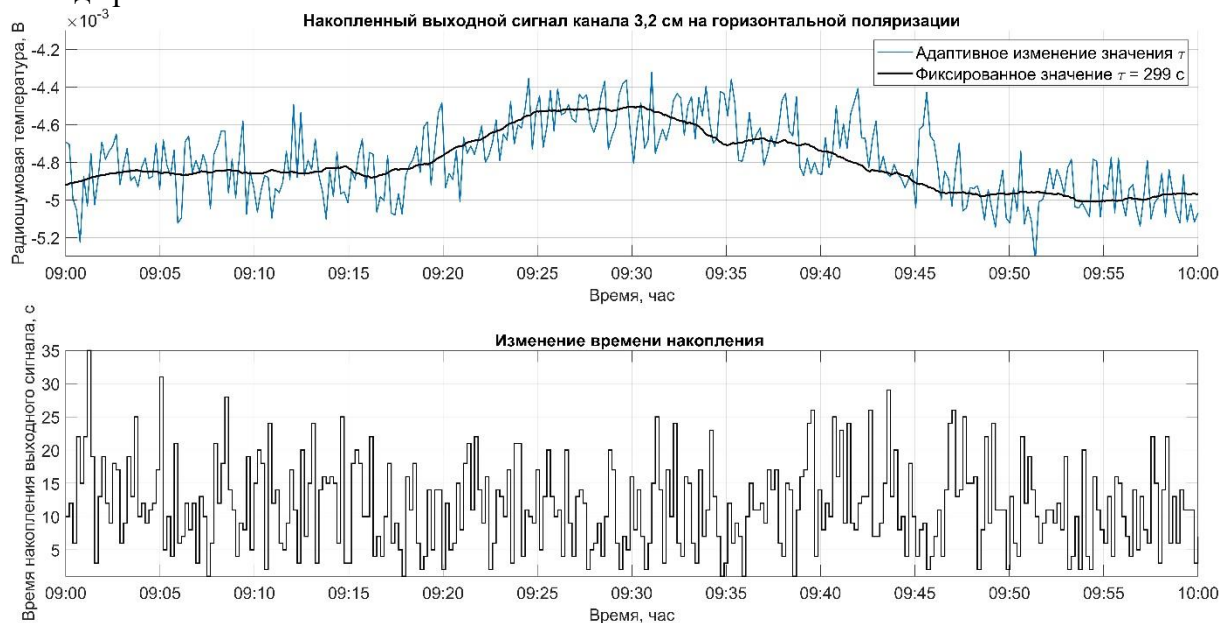


Рис. 3. Накопленный сигнал канала 3,2 см на горизонтальной поляризации за 11 августа 2024 года при фиксированном времени накопления $\tau = 299$ с и при адаптивном изменении времени накопления для $L = 0,3\%$, и график изменения времени накопления

Анализ рис. 3 показывает, что при применении алгоритма динамического изменения времени накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы время накопления сигнала составляет в среднем 12 с, что позволяет подстраивать режим работы системы под быстропротекающие изменения состояния пограничного слоя атмосферы, по сравнению с режимом работы с фиксированном временем накопления выходных сигналов.

Выводы

Анализ полученных результатов применения метода динамического изменения цифрового времени накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы показал эффективность его использования при исследовании быстроизменяющихся микрометеорологических атмосферных процессов по сравнению методом фиксированного

времени накопления выходных сигналов, поскольку данный метод позволяет своевременно подстраивать работу радиометрической системы под изменения микрометеорологических атмосферных процессов.

Дополнительного исследования требует вопрос установления порога срабатывания, величина которого влияет на способность системы реагировать на изменения состояния быстротечных метеорологических процессов. Уменьшение значения порога срабатывания может повысить флуктуационную чувствительность СВЧ радиометрической системы, поскольку будет увеличено среднее время накопления выходных сигналов, но при этом снизится способность системы реагировать на быстроизменяющиеся микрометеорологические атмосферные процессы. Также на величину порога срабатывания влияет режим сканирования пространства СВЧ радиометрической системой, поскольку в круговом режиме обзора при большой скорости вращения антенной системы уменьшение порога срабатывания приведет к наложению сигналов от разных источников излучения.

Литература

1. Белов П.И., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды. Л.: Гидрометеиздат., 1989, 376 с.
2. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры // М.: Наука. 1973. 415 с.
3. Радиотеплолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 283 с.
4. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы : в 2 т. / Евгений Шарков.— Т. 1.— М. : ИКИ РАН, 2014.— 544 с. : ил. ; +2 л. цв. вкл.
5. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы. – Москва, 2020.
6. Jou-Ping Hou, Shih-Chiao Tsai, Effects of atmospheric moisture on the radiation intensity of objects in millimeter-wave band, *Infrared Physics & Technology*, Volume 103, 2019, 103107, ISSN 1350-4495
7. Федосеева, Е.В. Холодов И.Ю., Матюков М.А., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г. Вопросы цифрового накопления выходных сигналов многодиапазонной СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы / Радиотехнические и телекоммуникационные системы, №2, 2024. С.5-14.
8. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г. Многочастотные исследования неоднородной атмосферы// Метеорология и гидрология, 2022, №12, с. 78-87
9. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г., Холодов И.Ю. Корреляционный анализ результатов дистанционного зондирования атмосферы трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой// Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром, 2022. С.290-298.