

Дистанционное зондирование сред

DOI 10.24412/2221-2574-2024-2-5-14

УДК 621.396.67

ВОПРОСЫ ЦИФРОВОГО НАКОПЛЕНИЯ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ МНОГОДИАПАЗОННОЙ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Холодов Иван Юрьевич

магистрант кафедры радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»

E-mail: johncold511@gmail.com

Матюков Максим Андреевич

магистрант кафедры радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»

E-mail: maks.matyukov@mail.ru

Федосеева Елена Валерьевна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»

E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru

Ростокин Илья Николаевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры управления и контроля в технических системах Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»

E-mail: rostockin.ilya@yandex.ru

Щукин Георгий Георгиевич

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технологий и средств геофизического обеспечения ФГБОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» МО РФ (ВКА им. А.Ф. Можайского)²; научный руководитель лаборатории «Радиофизические исследования природных сред» Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»

E-mail: ggshchukin@mail.ru

¹Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

²Адрес: 197198, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы цифрового накопления выходных сигналов многодиапазонной СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы. Приведена информация по взаимосвязи чувствительности СВЧ радиометрической системы зондирования атмосферы со временем накопления её выходных сигналов. Определены задачи выбора величины времени накопления выходных сигналов. Показаны особенности подготовки к процедуре цифрового накопления последовательности значений метеопараметров пограничного слоя атмосферы и формирования массивов результатов СВЧ радиометрических измерений в четырёх частотных диапазонах разной продолжительности периода измерений. Приведены результаты применения цифрового накопления данных СВЧ радиометрической системы в периоды с 01.08.2023 по 21.08.2023 и с 09.12.2023 по 29.12.2023. Показаны результаты корреляционного анализа результатов измерений и метеопараметров пограничного слоя атмосферы при разных периодах накопления выходных сигналов и определены условия их оптимизации.

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

Введение

Микроволновое радиометрическое зондирование атмосферы позволяет дистанционно оценивать её метеопараметры: температуру, влажность, интегральное влаго- и водосодержание, интенсивность осадков [1–5]. При СВЧ радиометрическом зондировании выполняется измерение мощности ради шумового сигнала, создаваемого исследуемой областью пространства, величина которого имеет существенно малые значения (при зондировании атмосферы 10^{-14} – 10^{-16} Вт). Поэтому одной из основных задач построения СВЧ радиометрических систем является выделение измеренного шумового сигнала на фоне собственных шумов системы, что характеризуется чувствительностью СВЧ радиометрической системы. Величина чувствительности зависит от полосы частот входного высокочастотного фильтра и от времени накопления выходного низкочастотного фильтра системы. Для аналоговых систем время накопления является фиксированной величиной и чувствительность системы неизменна независимо от условий её функционирования.

Переход к цифровым методам измерения с формированием выходных сигналов в цифровом виде расширяет возможности повышения чувствительности СВЧ радиометрических систем путём изменения объёма выборки исходных отсчётов выходного сигнала при выполнении их суммирования для получения накопленного выходного сигнала. Но при использовании данного метода необходимо решить вопрос о величине времени накопления. При этом задача может быть сформулирована, как нахождение времени накопления, при котором выходной сигнал системы наиболее точно отражает тенденцию изменения метеопараметров пограничного слоя атмосферы.

В данной работе рассматривается вопрос оценки оптимальности времени накопления выходных сигналов многодиапазонной СВЧ радиометрической системы по величине коэффициента корреляции выходных сигналов системы и метеопараметров пограничного слоя атмосферы — температуры и относительной

влажности воздуха.

Взаимосвязь чувствительности и времени накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы

Под порогом чувствительности приборов для измерения интенсивности флукуационного электромагнитного излучения понимается шумовой сигнал на входе приёмной системы, равный по своей амплитуде на выходе системы среднеквадратическому отклонению флукуационного сигнала, обусловленного собственными шумами усилительного тракта [6]. В СВЧ радиометрических системах обычно предусмотрена компенсация шумов [7–9], создаваемых самой системой, поэтому на её выходе имеет место только флукуационный гауссовский случайный процесс, обусловленный преобразованным входным шумовым сигналом измеряемого собственного излучения исследуемой области пространства.

Пороговая чувствительность радиометрической системы определяется выражением [10–11]

$$\Delta T = \frac{T_N}{\sqrt{2\Delta f\tau}},$$

где T_N — шумовая температура радиометрической системы; Δf — полоса пропускания радиометрической системы; τ — постоянная времени системы.

Согласно представленному выражению для чувствительности СВЧ радиометрической системы при увеличении постоянной времени, равной времени накопления выходного низкочастотного фильтра радиометрической системы, пороговое значение входного сигнала, определяющего чувствительность системы, уменьшается. Таким образом возможно реализовать увеличение чувствительности СВЧ радиометрической системы при увеличении времени накопления.

Широкие возможности по реализации такого подхода к повышению чувствительности СВЧ радиометрических систем предоставляет способ цифрового накопления сигналов, реализуемый

программным способом после аналого-цифрового преобразования выходного сигнала приёмно-усилительного блока системы.

Исходные данные для реализации цифрового накопления выходного сигнала СВЧ радиометрической системы зондирования атмосферы

Метод цифрового накопления выходных сигналов для решения задачи повышения чувствительности был реализован в многодиапазонной СВЧ радиометрической системе зондирования атмосферы, обеспечивающей приём радиощумового излучения в четырёх частотных диапазонах на двух поляризациях — вертикальной и горизонтальной с одинаковой полосой рабочих частот 1 ГГц для всех частотных каналов [12–14].

В результате проведённых измерений в 2023 году были сформированы массивы данных, представляющие собой значения выходных сигналов СВЧ радиометрической системы на длинах волн 7,5 см, 3,2 см, 1,35 см и 0,8 см на горизонтальной и вертикальной поляризациях, а также дополнительный канал приёма в области боковых лепестков ДН антенны системы. Выборка сигналов проводилась через интервал

0,1 с, равный времени накопления низкочастотного фильтра на выходе многоканального квадратичного детектора.

Для применения цифрового накопления использовались данные СВЧ радиометрической системы за два периода времени: с 01.08.2023 по 21.08.2023 и с 09.12.2023 по 29.12.2023. Также были получены данные метеопараметров — температуры и относительной влажности воздуха, которые формировались с датчиков метеостанции, расположенной в месте базирования СВЧ радиометрической системы. На рис. 1–2 графически представлены данные температуры и относительной влажности воздуха за указанные выше периоды времени.

Данные рис. 1–2 показывают, что представленные зависимости метеопараметров для указанных временных интервалов отличаются их вариативностью в течение суток.

Результаты реализации цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы

Перед применением цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы и данные метеопараметров пограничного слоя атмосферы за указанные периоды

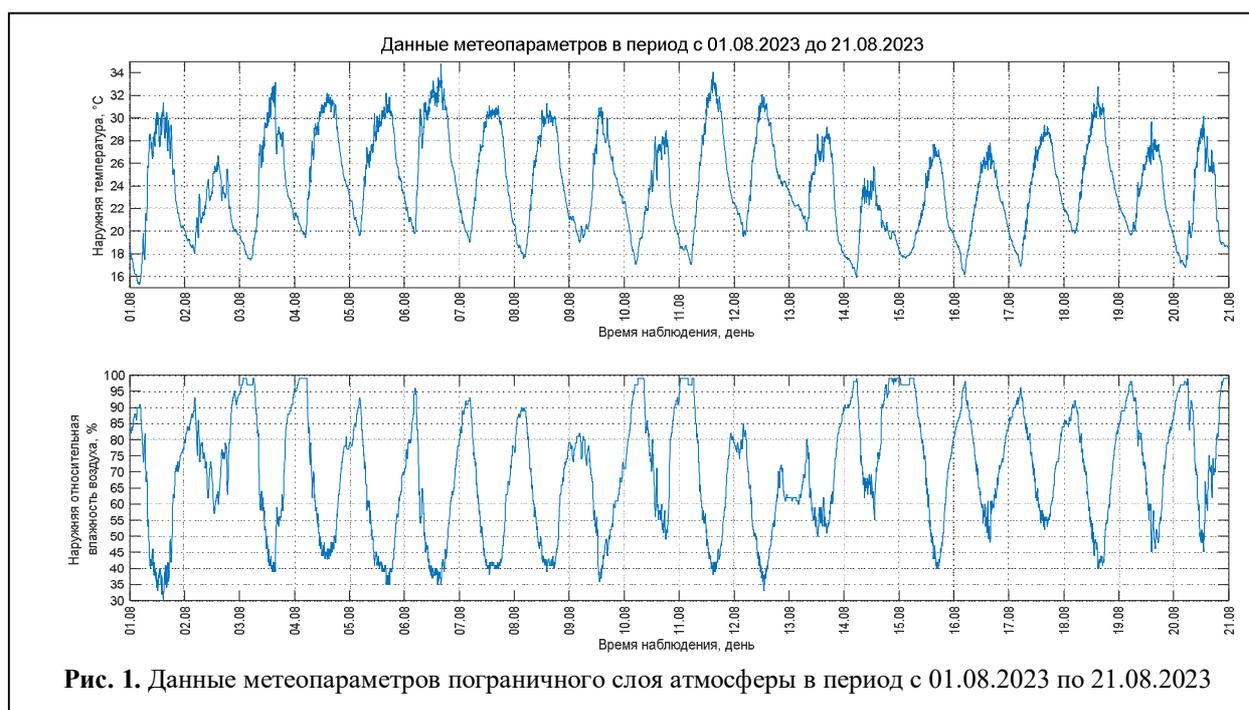


Рис. 1. Данные метеопараметров пограничного слоя атмосферы в период с 01.08.2023 по 21.08.2023



Рис. 2. Данные метеопараметров пограничного слоя атмосферы в период с 09.12.2023 по 29.12.2023

времени были разделены на 5 интервалов по 4 дня в каждом. Также было введено ограничение на время накопления в 300 с (5 минут), что обусловлено режимом функционирования метеостанции, которая импортирует данные с датчиков каждые 5 минут.

Цель цифрового накопления выходных сигналов состояла в нахождении времени накопления, при котором коэффициент корреляции между выходными сигналами системы и метеопараметрами пограничного слоя атмосферы максимален.

Оцифрованные данные выходных сигналов системы были последовательно разделены на диапазоны, равные по времени 1 с, т.е. по 10 значений в каждом диапазоне, и выполнено суммирование этих значений. Размер полученного массива сводился к размеру массива данных метеопараметров с целью возможности расчёта коэффициента корреляции. После расчёта коэффициента корреляции время накопления увеличивалось на 1 с, и вновь определялся коэффициент корреляции. Данная последовательность действий повторялась до достижения предельного времени накопления (300 с).

В результате было получено 300 значений коэффициентов корреляции при разных вели-

чинах времени накопления, из которых выбирался максимальный коэффициент корреляции, и соответствующее ему значение времени принималось за оптимальное согласно цели исследования.

На рис. 3 представлены выходные сигналы СВЧ радиометрической системы в период с 01.08.2023 по 21.08.2023 на длине волны 7,5 см на вертикальной поляризации без цифрового накопления и с цифровым накоплением с оптимальным временем накопления.

Для оценки эффективности достижения цели оптимизации цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы были рассчитаны следующие параметры: коэффициент корреляции между метеопараметрами и выходными данными СВЧ радиометрической системы без цифрового накопления, коэффициент корреляции между метеопараметрами и выходными данными СВЧ радиометрической системы с цифровым накоплением, относительное увеличение коэффициента корреляции при цифровом накоплении и значение времени оптимального накопления. Результаты оценки эффективности цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы показаны в таблицах 1–4.

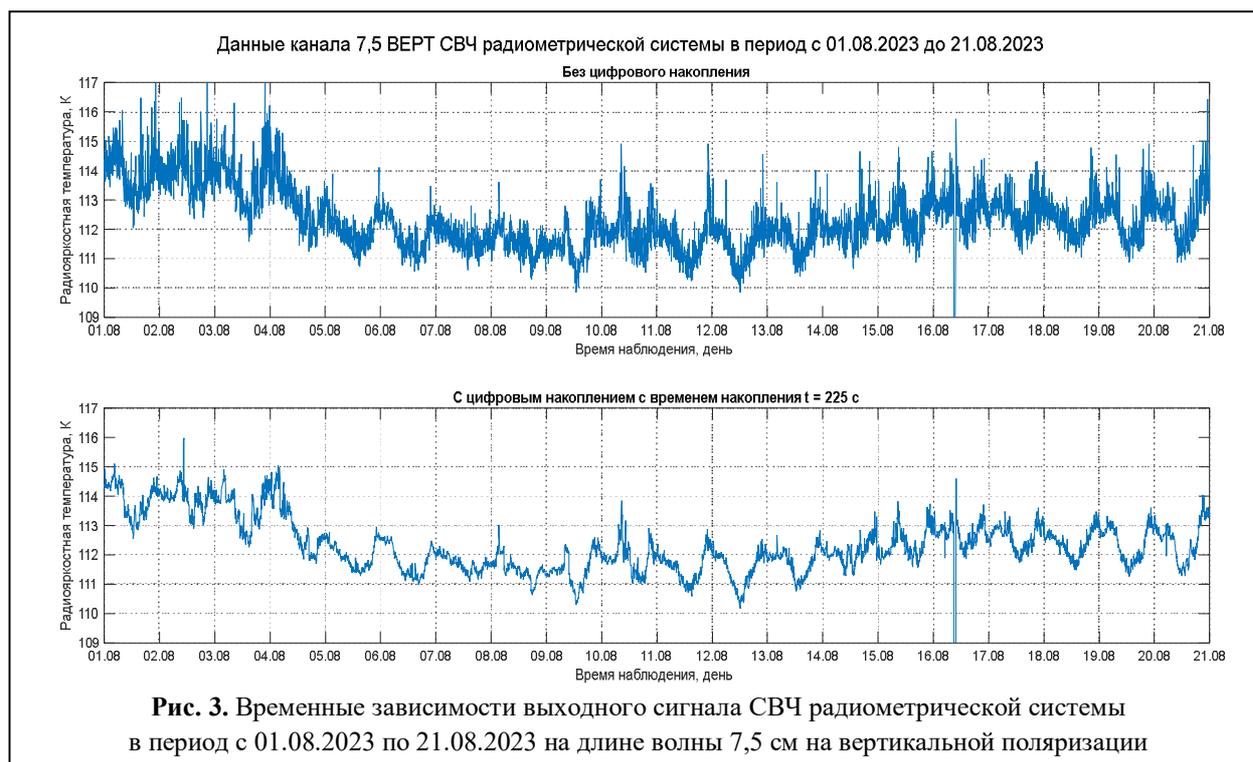


Рис. 3. Временные зависимости выходного сигнала СВЧ радиометрической системы в период с 01.08.2023 по 21.08.2023 на длине волны 7,5 см на вертикальной поляризации

В таблицах введены следующие сокращения: K_1 — коэффициент корреляции без цифрового накопления; K_2 — коэффициент корреляции с цифровым накоплением; ΔK — относительное увеличение коэффициента корреляции при цифровом накоплении, %; τ — значение времени оптимального накопления, с.

По анализу полученных результатов применения цифрового накопления выходных сигналов многодиапазонной СВЧ радиометрической системы были сделаны следующие выводы:

1. Применение цифрового накопления выходных сигналов высокочастотных каналов измерения (1,35 см и 0,8 см) не приводит к существенному увеличению коэффициента корреляции между выходными сигналами системы и метеопараметрами пограничного слоя атмосферы, как температуры, так и относительной влажности воздуха, что может быть обусловлено более высокой исходной чувствительностью сигналов высоких частот к изменению состояния пограничного слоя атмосферы.

2. Применение цифрового накопления выходных сигналов для низкочастотных каналов (7,5 см и 3,2 см) приводит к увеличению коэф-

фициента корреляции между выходными сигналами системы и метеопараметрами пограничного слоя атмосферы на 25–50% в зависимости от центральной частоты канала.

3. В период с 09.12.2023 по 29.12.2023 применение цифрового накопления приводит к увеличению коэффициента корреляции только между выходным сигналом дополнительного канала 3,2 см и метеопараметрами пограничного слоя атмосферы. По остальным выходным сигналам низкочастотных каналов применение цифрового накопления не приводит к увеличению коэффициента корреляции, по сравнению с периодом с 01.08.2023 по 21.08.2023, что может быть обусловлено отсутствием сильных перепадов температуры и относительной влажности воздуха в данный период времени (по сравнению с данными с 01.08.2023 по 21.08.2023).

Заключение

В целом полученные результаты оценки эффективности применения цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы показали возможность её реализации при условии значительного увеличения времени накопления, а, следовательно, и повышения

Таблица 1. Результаты оценки эффективности цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы в период с 01.08.2023 по 04.08.2023

Канал	Параметр корреляции	K_1	K_2	ΔK	τ
7,5 ГОР	Корреляция по температуре	0,816	0,861	5,53	191
7,5 ВЕРТ		0,616	0,780	26,75	234
7,5 ДОП		0,417	0,600	43,83	234
3,2 ГОР		0,022	0,035	57,68	173
3,2 ВЕРТ		0,644	0,763	18,58	268
3,2 ДОП		0,865	0,865	0	0
1,35 ГОР		0,628	0,729	16,08	205
1,35 ВЕРТ		0,291	0,291	0	0
1,35 ДОП		0,944	0,944	0,04	9
0,8 ГОР		0,924	0,924	0	0
0,8 ВЕРТ		0,940	0,940	0	0
0,8 ДОП		0,940	0,940	0	0
7,5 ГОР	Корреляция по относительной влажности воздуха	0,837	0,884	5,68	191
7,5 ВЕРТ		0,498	0,639	28,3	287
7,5 ДОП		0,371	0,536	44,43	287
3,2 ГОР		0,250	0,261	4,17	173
3,2 ВЕРТ		0,624	0,732	17,31	268
3,2 ДОП		0,668	0,668	0	0
1,35 ГОР		0,421	0,506	20,21	222
1,35 ВЕРТ		0,141	0,141	0	0
1,35 ДОП		0,908	0,908	0	0
0,8 ГОР		0,895	0,895	0	0
0,8 ВЕРТ		0,874	0,874	0	0
0,8 ДОП		0,874	0,874	0	0

Таблица 2. Результаты оценки эффективности цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы в период с 09.08.2023 по 12.08.2023

Канал	Параметр корреляции	K_1	K_2	ΔK	τ
7,5 ГОР	Корреляция по температуре	0,559	0,607	8,65	176
7,5 ВЕРТ		0,549	0,677	23,31	254
7,5 ДОП		0,106	0,158	49,22	193
3,2 ГОР		0,232	0,251	8,2	232
3,2 ВЕРТ		0,543	0,658	21,06	232
3,2 ДОП		0,906	0,906	0	0
1,35 ГОР		0,680	0,743	9,27	254
1,35 ВЕРТ		0,691	0,691	0	0
1,35 ДОП		0,894	0,897	0,26	14
0,8 ГОР		0,859	0,859	0	0
0,8 ВЕРТ		0,908	0,908	0	0
0,8 ДОП		0,908	0,908	0	0
7,5 ГОР	Корреляция по относительной влажности воздуха	0,539	0,591	9,64	176
7,5 ВЕРТ		0,569	0,706	24,12	254
7,5 ДОП		0,173	0,254	47,16	239
3,2 ГОР		0,233	0,253	8,81	232
3,2 ВЕРТ		0,418	0,496	18,65	232
3,2 ДОП		0,841	0,841	0	0
1,35 ГОР		0,659	0,711	7,84	211
1,35 ВЕРТ		0,629	0,629	0	0
1,35 ДОП		0,817	0,820	0,37	6
0,8 ГОР		0,791	0,791	0	0
0,8 ВЕРТ		0,832	0,832	0	0
0,8 ДОП		0,832	0,832	0	0

Таблица 3. Результаты оценки эффективности цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы в период с 13.12.2023 по 16.12.2023

Канал	Параметр корреляции	K_1	K_2	ΔK	τ	
7,5 ГОР	Корреляция по температуре	0,554	0,559	0,93	200	
7,5 ВЕРТ		0,954	0,954	0	0	
7,5 ДОП		0,493	0,493	0	0	
3,2 ГОР		0,092	0,113	23,23	1	
3,2 ВЕРТ		0,490	0,490	0	0	
3,2 ДОП		0,492	0,657	33,57	258	
1,35 ГОР		0,956	0,956	0	0	
1,35 ВЕРТ		0,899	0,899	0	0	
1,35 ДОП		0,857	0,857	0	0	
0,8 ГОР		0,395	0,395	0	197	
0,8 ВЕРТ		0,803	0,806	0,35	290	
7,5 ГОР		Корреляция по относительной влажности воздуха	0,371	0,377	1,62	167
7,5 ВЕРТ			0,760	0,760	0	0
7,5 ДОП			0,549	0,549	0	0
3,2 ГОР	0,091		0,103	13,56	1	
3,2 ВЕРТ	0,548		0,548	0	0	
3,2 ДОП	0,436		0,582	33,54	178	
1,35 ГОР	0,815		0,815	0	0	
1,35 ВЕРТ	0,744		0,744	0	0	
1,35 ДОП	0,719		0,719	0	0	
0,8 ГОР	0,321		0,321	0	0	
0,8 ВЕРТ	0,638	0,640	0,27	294		

Таблица 4. Результаты оценки эффективности цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы в период с 25.12.2023 по 28.12.2023

Канал	Параметр корреляции	K_1	K_2	ΔK	τ	
7,5 ГОР	Корреляция по температуре	0,283	0,283	0	0	
7,5 ВЕРТ		0,522	0,522	0	0	
7,5 ДОП		0,590	0,590	0	0	
3,2 ГОР		0,753	0,753	0	0	
3,2 ВЕРТ		0,580	0,580	0	0	
3,2 ДОП		0,522	0,676	29,52	234	
1,35 ГОР		0,739	0,739	0	0	
1,35 ВЕРТ		0,530	0,530	0	0	
1,35 ДОП		0,804	0,804	0	0	
0,8 ГОР		0,143	0,158	10,89	286	
0,8 ВЕРТ		0,920	0,920	0	0	
7,5 ГОР		Корреляция по относительной влажности воздуха	0,310	0,317	2,18	277
7,5 ВЕРТ			0,346	0,346	0	0
7,5 ДОП			0,300	0,300	0	0
3,2 ГОР	0,544		0,544	0	0	
3,2 ВЕРТ	0,299		0,299	0	0	
3,2 ДОП	0,271		0,365	34,51	256	
1,35 ГОР	0,552		0,552	0	0	
1,35 ВЕРТ	0,460		0,460	0	0	
1,35 ДОП	0,644		0,644	0	0	
0,8 ГОР	0,372		0,374	0,4	148	
0,8 ВЕРТ	0,614	0,614	0	0		

чувствительности системы. Ограничивающим фактором в данном процессе может служить скорость изменения состояния атмосферы. Предложенный вариант определения ограниченный на длительность процесса цифрового накопления учитывает степень взаимосвязи выходного сигнала СВЧ радиометрической системы с метеопараметрами путём оценки их корреляции, что позволяет сформулировать общие требования к включению процедуры цифрового накопления выходных сигналов в алгоритмы обработки результатов СВЧ радиометрических измерений атмосферы. Применение цифрового накопления выходных сигналов многодиапазонной СВЧ радиометрической системы показало возможность увеличения коэффициента корреляции между выходными сигналами СВЧ радиометрической системы и данными метеопараметров пограничного слоя атмосферы при одновременном решении задачи повышении чувствительности СВЧ радиометрической системы.

Возможность оперативного изменения времени накопления в зависимости от скорости развития атмосферных процессов определяет перспективность использования цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрических систем для повышения точности краткосрочного прогнозирования метеопараметров пограничного слоя атмосферы.

*Исследование выполнено за счёт гранта
Российского научного фонда № 21-19-00378,
<https://rscf.ru/project/21-19-00378/>.*

Литература

1. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии Л.: Гидрометеиздат, 1987. 283 с.
2. Кутуза Б.Г., Яковлев О.И., Данильчев М.В. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. Монография. М.: Ленанд, 2016. 336 с.
3. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы. М.: ФГБУ «ЦАО», 2020. 272 с.

4. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Определение содержания парообразной и жидкокапельной влаги из измерений микроволнового излучения атмосферы // Известия вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 12. С. 942–953.

5. Ware R.A. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid // Radio Science. 2003. Vol. 38. No. 4. P. 8079.

6. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.

7. Postylyakov O.V., Borovski A.N., Chulichkov A.I., Nikitin S.V. On estimation of cloudiness characteristics and parameters of DOAS retrieval from spectral measurements using a neural network // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 489. P. 012031. DOI 10.1088/1755-1315/489/1/012031.

8. Фалин В.В. Радиометрические системы СВЧ. М.: Луч, 1997. 440 с.

9. Федосеева Е.В., Щукин Г.Г., Ростокин И.Н., Ростокина Е.А. Компенсация помех в работе СВЧ радиометрических систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. №1(13). С. 50–62.

10. Убайчин А.В., Филатов А.В. Многоприемниковые микроволновые радиометрические системы на основе модифицированного метода нулевых измерений. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2014. 153 с.

11. Сидоров И.А., Гудков А.Г., Чижииков С.В., Лешин В.Ю. Особенности функционирования СВЧ-радиометров в условиях внешних помех // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2023. №3. Т.15. С. 223–234.

12. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г., Холодов И.Ю. Корреляционный анализ результатов дистанционного зондирования атмосферы трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой // В сборнике: Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром, 2022. С. 290–298.

13. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г. Многочастотные исследования неоднородной атмосферы // Метеорология и гидрология. 2022. №12. С. 78–87

14. Щукин Г.Г., Булкин В.В., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н. Радиометеорологические исследования в Муромском институте: пассивно-активный радиометеорологический комплекс // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. №3. С. 5–17.

Поступила 12 марта 2024 г.

English

ISSUES OF DIGITAL ACQUISITION OF OUTPUT SIGNALS IN A MULTI-BAND MICROWAVE RADIOMETRIC SYSTEM FOR REMOTE SENSING OF THE ATMOSPHERE

Ivan Yurievich Kholodov — Master's Degree Student, Radioengineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs"¹.

Maksim Andreevich Matyukov — Master's Degree Student, Radioengineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs"¹.

Elena Valeryevna Fedoseeva — Grand Dr. in Engineering, Professor, Radioengineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs"¹.

E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru

Ilya Nikolaevich Rostokin — Grand Dr. in Engineering, Professor, Department of Monitoring and Control in Engineering Systems, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs"¹.

E-mail: rostockin.ilya@yandex.ru

Georgy Georgyevich Shchukin — Grand Dr. in Physics and Mathematics, Professor, Department of Technologies and Army Geophysical Support Federal State-owned Military Educational Institution of Higher Education "Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky"², Ministry of Defense of the Russian Federation.

E-mail: ggshchukin@mail.ru

¹Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya st., 23.

²Address: 197198, Russian Federation, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya st., 13.

Abstract: The article examines the issues of digital acquisition of output signals in a multi-band microwave radiometric system for remote sensing of the atmosphere. Information is given on the correlation between the sensitivity of the microwave radiometric system for atmospheric sensing and the time for its output signals' acquisition. The tasks are set for choosing the time value for the digital acquisition of output signals based on the correlation analysis of measurement results in the multi-band microwave radiometric system. The microwave radiometric system ensured reception of radiothermal radiation from the atmospheric ground layer in four bandwidths with band centers of 7.5GHz, 3.2GHz, 1.35GHz and 0.8GHz in vertical and horizontal polarization of the main measuring channel and the secondary channel, generating compensation signal. There are presented features of the procedure preparation for digital acquisition of the sequence of weather parameter values for the atmospheric boundary layer and forming arrays of microwave radiometric measurement results in four bandwidths of varying time of measurement interval. There are given estimations for the optimal time of the output signals' acquisition in the microwave radiometric system using digital data acquisition in the microwave radiometric system over the following periods: from 01.08.2023 to 21.08.2023 and from 09.12.2023 to 29.12.2023. There is presented correlation analysis of measurement and weather parameter results of the atmospheric boundary layer at different time values of the output signal acquisition and the conditions for their optimization are defined as well. It was shown as a result of the analysis data that time increment for the output signal acquisition in the microwave radiometric system has a significant effect for low-frequency channels, which may be due to their lower sensitivity to varying weather parameters such as temperature and humidity of the ground atmospheric layer. There was also revealed the possibility to increase correlation of the results of microwave radiometric measurements and weather parameters using the signal acquisition digital method where there are significant value variations of weather parameters during the microwave radiometric sensing of the atmosphere.

Keywords: microwave radiometric system, sensitivity, acquisition time for output signals, output signal digital acquisition.

*The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 21-19-00378
(<https://rscf.ru/projekt/21-19-00378>)*

References

1. Stepanenko V.D., Shhukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Ju. Radioteplotation in meteorology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 283 p.
2. Kutuza B.G., Jakovlev O.I., Danilychev M.V. Satellite monitoring of the Earth: Microwave radiometry of the atmosphere and surface. Monograph. Moscow: Lenand, 2016. 36 p.
3. Kadygrov E.N. Microwave remote sensing of atmospheric temperature profiles. Moscow: FGBU "TsAO", 2020. 272 p.
4. Karavaev D.M., Shhukin G.G. Determination of the content of vaporous and liquid-drop moisture using the measurements of microwave atmospheric radiation. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Radiofizika*. 2021. Vol. 64. No. 12. Pp. 942–953.
5. Ware R.A. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. *Radio Science*. 2003. Vol. 38. No. 4. P. 8079.
6. Sharkov E.S. Radiothermal Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations: in 2 volumes. Vol. 1. Moscow: IKI RAN, 2014. 544 p.
7. Postylyakov O.V., Borovski A.N., Chulichkov A.I., Nikitin S.V. On estimation of cloudiness characteristics and parameters of DOAS retrieval from spectral measurements using a neural network. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 489. P. 012031. DOI 10.1088/1755-1315/489/1/012031.
8. Falin V.V. Microwave radiometric systems. Moscow: Luch, 1997. 440 p.
9. Fedoseeva E.V., Shhukin G.G., Rostokin I.N., Rostokina E.A. Compensation of interference in the operation of microwave radiometric systems. *Radio and telecommunication systems*. 2014. No. 1(13). Pp. 50–62.
10. Ubajchin A.V., Filatov A.V. *Multipath* microwave radiometric systems based on a modified zero measurement method. Tomsk: TUSUR, 2014. 153 p.
11. Sidorov I.A., Gudkov A.G., Chizhikov S.V., Leushin V.Yu. Specific of microwave radiometers operation on the external distortions conditions. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*. 2023. Vol. 15(3). Pp. 223–234.
12. Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shhukin G.G., Kholodov I.Ju. Correlation analysis of the results of remote sensing of the atmosphere by a threeband microwave radiometric system. *All-Russian open Armand readings. Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction. Murom*, 2022. Pp. 290–298.
13. Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shhukin G.G. Multi-frequency studies of an inhomogeneous atmosphere. *Meteorologija i gidrologija*. 2022. No. 12. Pp. 78–87
14. Shhukin G.G., Bulkin V.V., Fedoseeva E.V., Rostokin I.N. Radiometeorological research at the Murom Institute: passive-active radio-meteorological complex. *Radio and telecommunication systems*. 2022. No. 3. Pp. 5–17.