

Корреляционный анализ результатов дистанционного зондирования атмосферы трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой

¹Е.В.Федосеева, ¹И.Н. Ростокин, ^{1,2}Г.Г. Шукин, ¹И.Ю. Холодов

¹Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г.Столетовых», 602264, г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская 23, E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru

²Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13, E-mail: ggshchukin@mail.ru

Представлены результаты корреляционного анализа данных измерений радиотеплового излучения неоднородной атмосферы с осадками трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой с приемом по одному направлению на общую апертуру зеркальной антенны на трех частотах 7,5 ГГц, 10 ГГц, 22 ГГц. Рассчитаны коэффициенты корреляции выходных сигналов всех приемных каналов системы с результатами измерений метеопараметров - температуры, интенсивности осадков, влажности приземного слоя атмосферы, полученными с метеостанций пяти городов, ближайших к месту расположения измерительного СВЧ радиометрического комплекса. Показана зависимость результатов измерений с компенсацией влияния внешних воздействий и без компенсации на разных частотах от степени однородности метеопараметров атмосферы и от наличия в атмосфере локальных неоднородностей и их удаленности от месторасположения измерительного СВЧ радиометрического комплекса.

Correlation analysis of the results of remote sensing of the atmosphere by a three-band microwave radiometric system

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

¹ *Murom Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "A.G. and N.G. Stoletovs Vladimir State University", 602264, Murom, 23, Orlovskaya str.*

² *Academy of Space and Military Sciences. A.F. Mozhaisky, 191198, St.-Petersburg, Zhdanovskaya, 13*

The results of the correlation analysis of the data of measurements of radiothermal radiation of an inhomogeneous atmosphere with precipitation by a three-band microwave radiometric system with reception in one direction for a common aperture of a mirror antenna at three frequencies 7.5GHz, 10GHz, 22 GHz are presented. The coefficients of correlation of the output signals of all receiving channels of the system with the results of measurements of meteorological parameters - temperature, precipitation intensity, humidity of the surface layer of the atmosphere, obtained from weather stations in five cities closest to the location of the measuring microwave radiometric complex are calculated. The dependence of the measurement results with compensation for the influence of external influences and without compensation at different frequencies on the degree of uniformity of atmospheric meteorological parameters and on the presence of local inhomogeneities in the atmosphere and their distance from the location of the measuring microwave radiometric complex is shown.

Введение

Дистанционное зондирование СВЧ радиометрическими системами решает задачи оперативного отслеживания изменения состояния атмосферы по величине принимаемой мощности ее собственного радиошумового излучения [1].

Выполнение многочастотных измерений расширяет возможности оценки метеопараметров атмосферы из-за различной частотной зависимости мощности собственного радиошумового излучения для разных метеопараметров, таких как температура, водо- и влагосодержание, интенсивность осадков.

Реализация многочастотного дистанционного зондирования атмосферы СВЧ радиометрическими системами предполагает необходимость решения следующих задач: обеспечение однонаправленного приема на всех частотах и учет влияния различий угловых размеров пространственных областей, существенно определяющих уровень сигнала на входе системы, обусловленных изменением направленных свойств антенн в разных частотных диапазонах.

Для обеспечения однонаправленного приема возможно применение антенны с общей апертурой зеркала для всех частотных каналов с последующим разделением каналов в облучателе [2]. Такой вариант однонаправленного приема реализован в трехдиапазонной СВЧ радиометрической системе с частотным разделением в облучателе зеркальной антенны с дополнительным формированием сигнала компенсации для снижения влияния фоновых шумов [2-4].

Различие направленных свойств общей антенны в разных частотных диапазонах определяет влияние на результаты измерений разных по угловым размерам областей атмосферы, т.е. различную степень сглаживающего эффекта, обусловленного конечными размерами главного лепестка диаграммы направленности (ДН) антенны.

В данной работе представлены результаты корреляционного анализа данных измерений радиотеплового излучения атмосферы трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой с однонаправленным приемом на общую апертуру зеркальной антенны.

Технические вопросы реализации трехдиапазонных однонаправленных СВЧ радиометрических измерений

Однонаправленные СВЧ радиометрические измерения радиотеплового излучения атмосферы в трех частотных диапазонах с центральными частотами диапазонов 7,5 ГГц, 10 ГГц, 22ГГц были выполнены с помощью трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы с приемом на общее зеркало антенны с диаметром раскрыва $D = 2400$ мм при реализации последовательного частотного разделения в модовом делителе облучателя с формированием на частотах 7,5 и 10 ГГц двух выходных сигналов, обусловленных приемом на двух линейных поляризациях - вертикальной и горизонтальной, а также выходного сигнала компенсации, обусловленного приемом по угловой области рассеяния ДН в основных измерительных каналах [2]. Структурная схема трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы и модового делителя облучателя зеркальной антенны представлены на рисунках 1-2.

Из результатов измерений в трех частотных диапазонах по семи каналам - величин выходных напряжений квадратичных детекторов с опросом АЦП с периодичностью 0.1с сформированы файлы данных для последующей обработки информации.

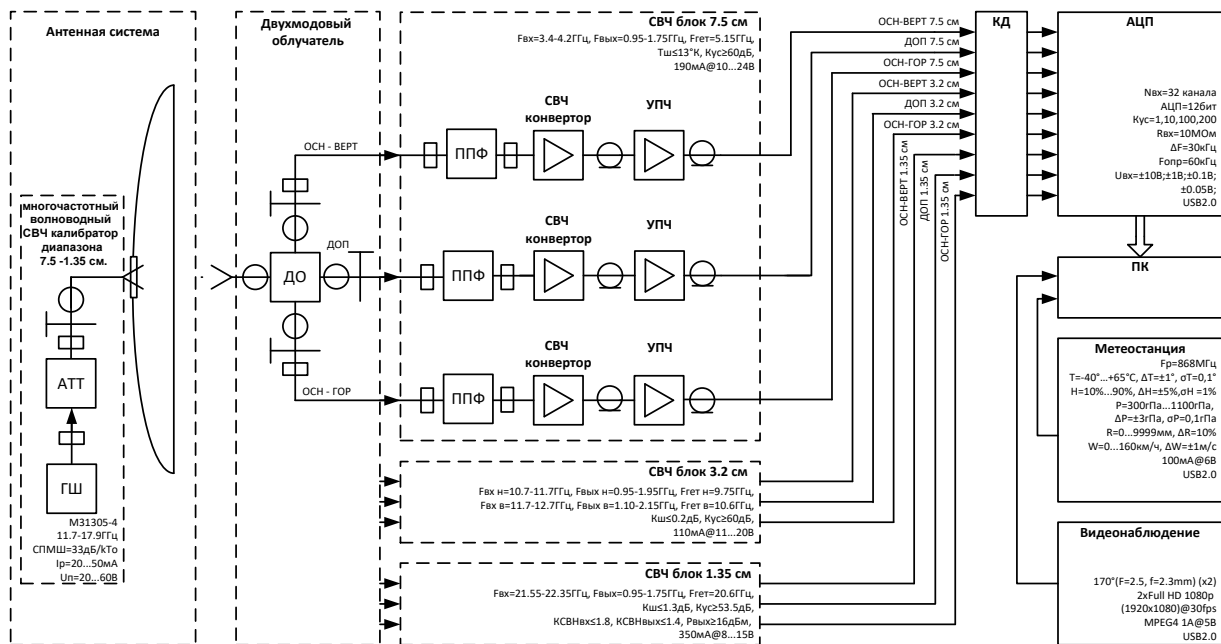


Рис. 1 Структурная схема трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы

ГШ – полупроводниковый генератор шума; АТТ – волноводный управляемый аттенуатор; ДО – двухмодовый облучатель; ППФ – волноводный полосно-пропускающий фильтр; УПЧ - усилитель промежуточной частоты; КД – многоканальный квадратичный детектор; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПК - персональный компьютер для сбора, хранения и обработки данных, ОСН-ГОР – сигнал основного измерительного канала горизонтальной поляризации; ОСН-ВЕРТ – сигнал основного измерительного канала вертикальной поляризации; ДОП – сигнал дополнительного измерительного канала

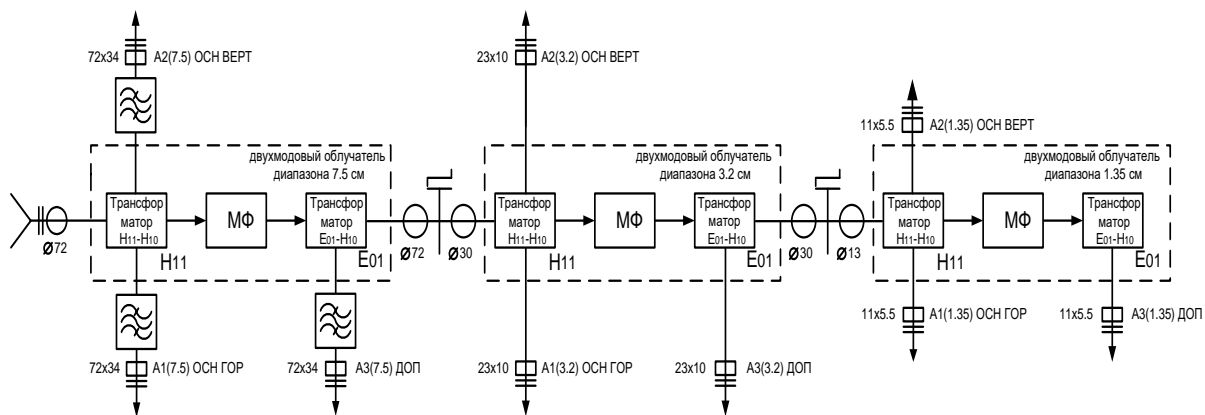


Рис. 2 Структурная схема модового облучателя зеркальной антенны трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы

Практические вопросы выполнения трехдиапазонных однонаправленных СВЧ радиометрических измерений

Задача оценки возможности кратковременного прогнозирования атмосферных явлений по данным многочастотных СВЧ радиометрических измерений предполагает выполнение зондирования атмосферы под малыми углами высоты для увеличения дальности эффективной области атмосферы, формирующей величину мощности радиотеплового излучения в точке расположения СВЧ радиометрического комплекса.

В проведенных исследованиях трехдиапазонный СВЧ радиометрических комплекс располагался в д. Урваново Меленковского района Владимирской области 55°26'с.ш., 42°03'в.д. Направление измерений - юго-запад, что обусловлено особенностями рельефа и расположением строений в ближней зоне антенны. Измерения выполнены под зенитным углом 50°, что позволяет рассматривать их, как исследование приземного слоя атмосферы.

Для исследования взаимосвязи пространственно-структурной неоднородности атмосферы и результатов СВЧ радиометрических измерений выполнен корреляционный анализ по данным метеостанций пяти близлежащих населенных пунктов Муром, Выкса, Меленки, Касимов, Рязань, расположенных на разном удалении и под разными углами от места базирования СВЧ радиометрического комплекса. Карта местности проведения СВЧ радиометрических исследований приземного слоя атмосферы с указанием координат и дальностей приведена на рисунке 3.

Корреляционный анализ проведен для измерений, выполненных 12.06.2021, т.к. в данные сутки наблюдалась изменчивая метеобстановка с выпадением осадков. На рисунке 4 показана суточная запись выходных сигналов трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы для 12.06.2021 г.

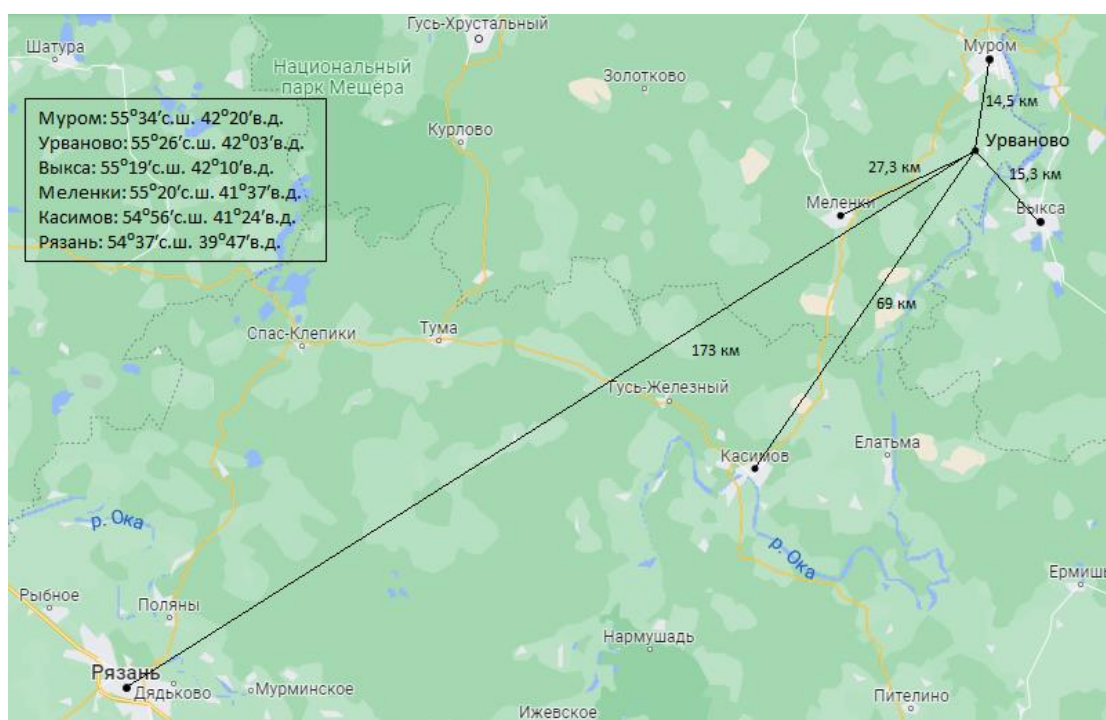


Рис. 3 Карта местности проведения СВЧ радиометрических исследований приземного слоя атмосферы

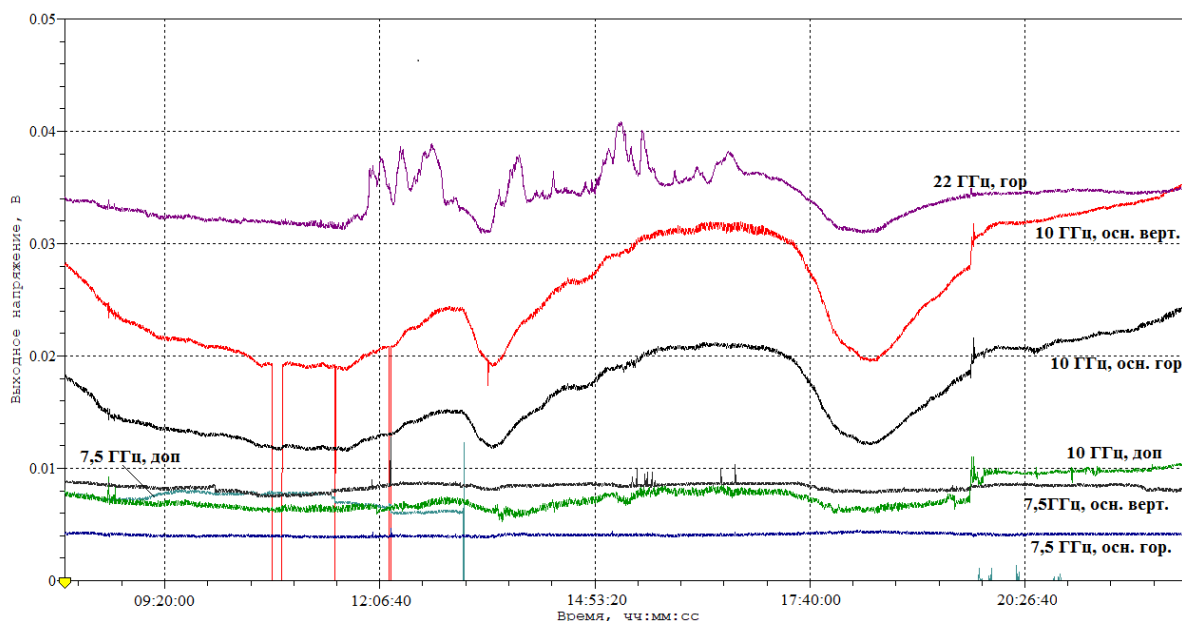


Рис. 4 Временная зависимость величины выходных сигналов трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы от 12.06.2021 г.

Результаты корреляционного анализа данных СВЧ радиометрических измерений радиотеплового излучения атмосферы

Анализ результатов СВЧ радиометрических измерений проводился с целью выявить характер взаимосвязи метеопараметров атмосферы (температуры, влажности, интенсивности осадков) и величины сигнала в трех существенно различных частотных диапазонах, а также оценить степень влияния удаления пространственной области атмосферы на характер изменения выходных сигналов.

Для выполнения указанных корреляционных исследований отбирались данные измерений для тех дней, когда наблюдалась существенная пространственная и структурная неоднородность атмосферы, наличие пространственно-локализованных областей осадков. В частности, такая ситуация наблюдалась в 12.06.2021. на рисунке 5 представлены диаграммы пространственного изменения метеопараметров для 18 часов.

Численный корреляционный анализ проводился по суточным данным измерений в трех частотных диапазонах по выходным сигналам семи каналов системы и по разностным сигналам при выполнении процедуры компенсации влияния фоновых шумов. На рисунках 6-7 представлены результаты расчета коэффициента корреляции метеопараметров приземного слоя атмосферы в пяти населенных пунктах и величины выходных сигналов в трех частотных диапазонах.

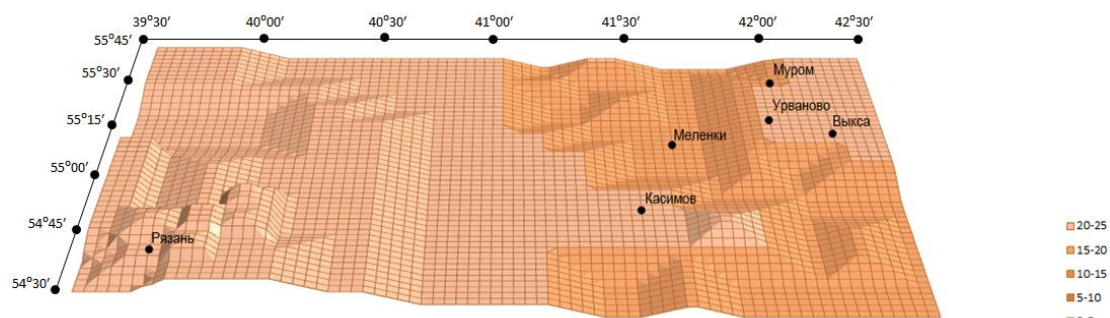
Анализ результатов корреляционной обработки данных измерений показал следующее:

- на частоте 7,5 ГГц характер корреляционной зависимости по температуре не изменен по данным всех рассмотренных городов, но меняется знак у коэффициента корреляции на вертикальной и горизонтальной поляризации; по интенсивности осадков корреляция сильнее по основным каналам, чем по дополнительному, причем зависимость по основным каналам на вертикальной и горизонтальной поляризации разнонаправленная, заметно слабее корреляционная связь с данными по интенсивности осадков по Рязани, самой удаленной от месторасположения измерительного комплекса; по влажности корреляционные зависимости аналогичные зависимостям по интенсивности осадков;

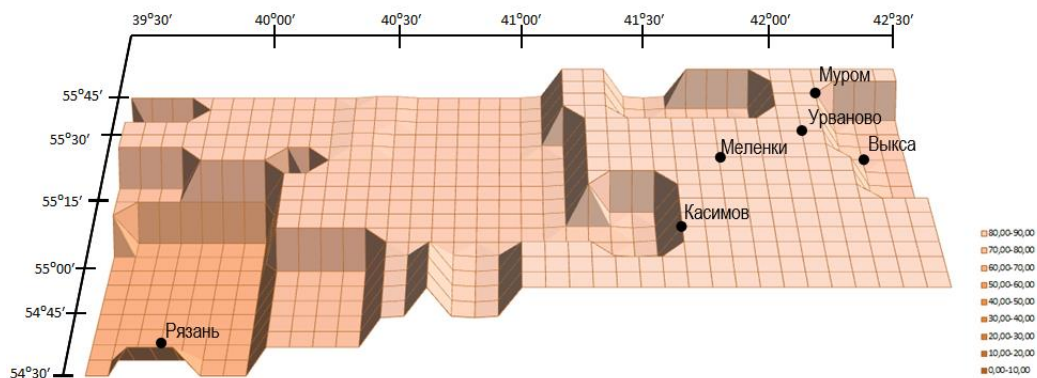
- на частоте 10 ГГц характер корреляционной зависимости по температуре одинаков для всех городов; по интенсивности осадков наблюдается уменьшение

коэффициента корреляции с данными из Выксы и Меленок и относительное повышение коэффициента корреляции с результатами измерений по дополнительному каналу для Касимова; по влажности общий характер корреляции совпадает по всем указанным населенным пунктам, но имеет место повышение коэффициента корреляции по дополнительному каналу для Рязани и Касимова.

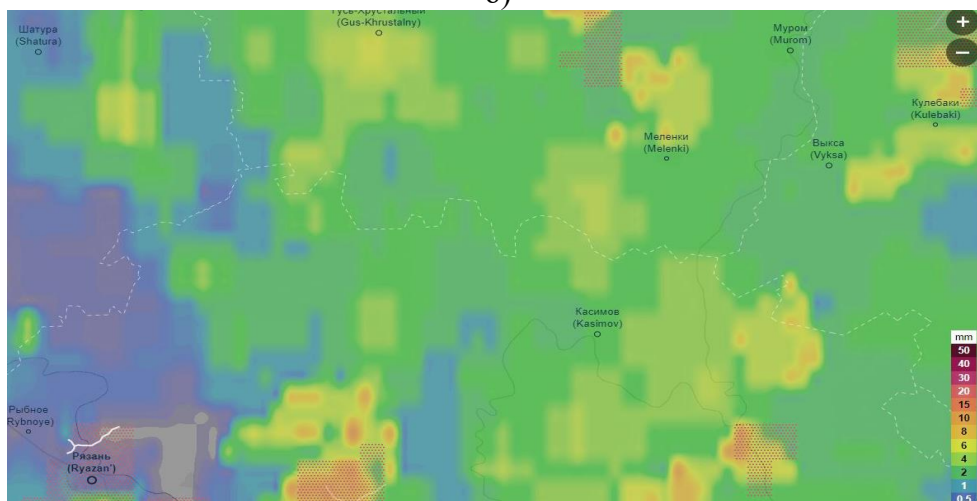
- на частоте 22ГГц по температуре коэффициент корреляции практически остается на одном уровне по всем городам; по осадкам наблюдается сильные изменения коэффициента корреляции для разных городов (-0,2 для Муром, 0,4 для Выксы и Меленок, -0,1 для Касимова, -0,2 для Рязани); по влажности относительно слабая зависимость более 0.4 для Муром, -0,1 для Выксы, -0,2 для Меленок и Касимова около нуля для Рязани.



а)



б)



в)

Рис. 5 Диаграммы пространственной изменчивости температуры (а), влажности (б), интенсивности осадков (в) в области проведения СВЧ радиометрических измерений

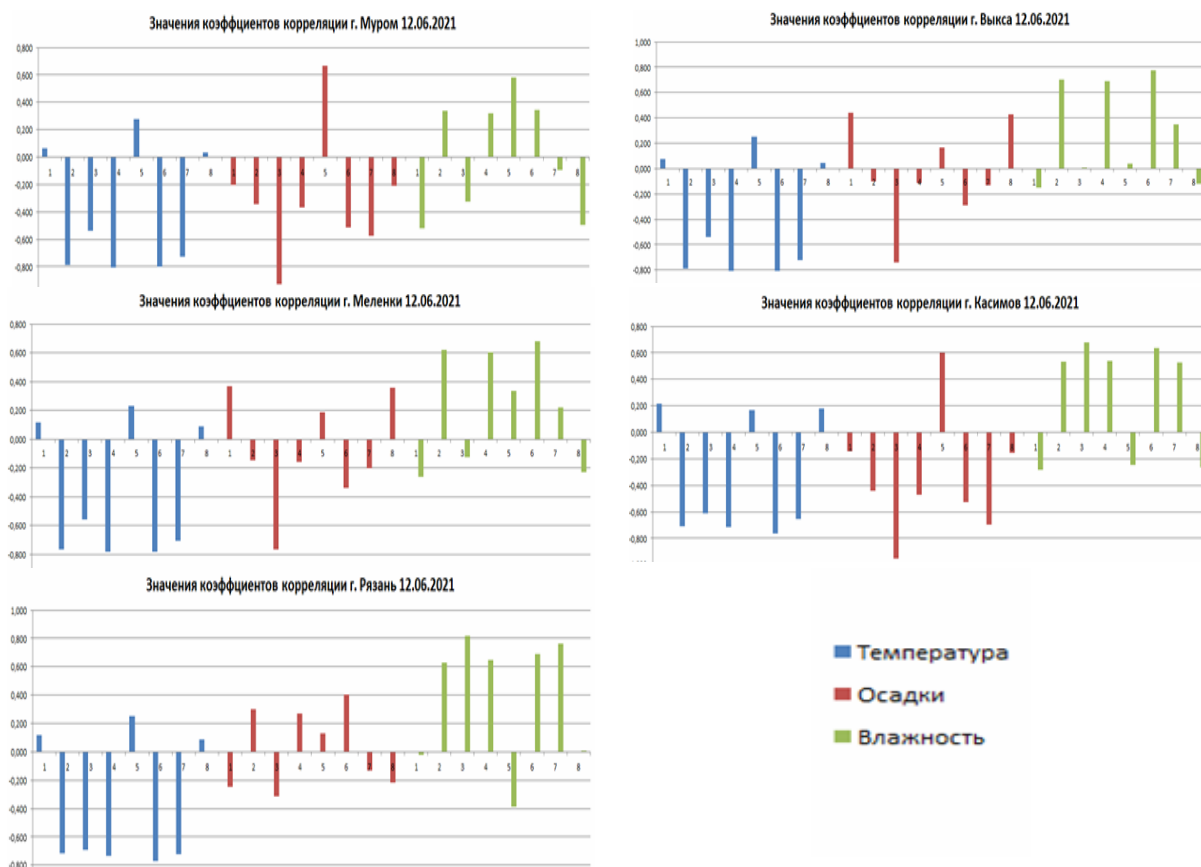


Рис. 6 Результаты корреляционного анализа значений метеопараметров температуры, влажности, интенсивности осадков и величины выходного сигнала СВЧ радиометрической системы (Нумерация каналов соответствует введенной нумерации в интерфейсе регистрирующего устройства: 1 - тестовый сигнал системы; 2 - частота 10 ГГц, поляризация горизонтальная; 3 - частота 7,5 ГГц, дополнительный сигнал компенсации; 4 - частота 10 ГГц, поляризация вертикальная; 5 - частота 7,5 ГГц, поляризация горизонтальная; 6 - частота 10 ГГц, дополнительный сигнал компенсации; 7 - частота 7,5 ГГц, поляризация вертикальная; 8 - частота 22 ГГц, поляризация вертикальная)

Анализ результатов корреляционной обработки данных измерений по разностным выходным сигналам показал следующее:

- на частоте 7,5 ГГц по температуре коэффициент корреляции примерно равен 0,5 для всех городов кроме Касимова, где его величина составила 0,6 для горизонтальной поляризации и -0,2 для вертикальной поляризации; по осадкам для всех городов 0,8 кроме Рязани, где коэффициент корреляции равен 0,25; по влажности сильнее корреляция с данными для Касимова и Рязани;

- на частоте 10 ГГц по температуре для всех городов сильная зависимость с коэффициентом корреляции -0,8; по осадкам коэффициент корреляции около нуля для Выксы и Меленки и на уровне -0,2 для Муромы и -0,4 для Рязани; по влажности общий характер корреляционной зависимости сохраняется для всех городов в пределах от 0,5 до 0,6, только для Муромы 0,3.

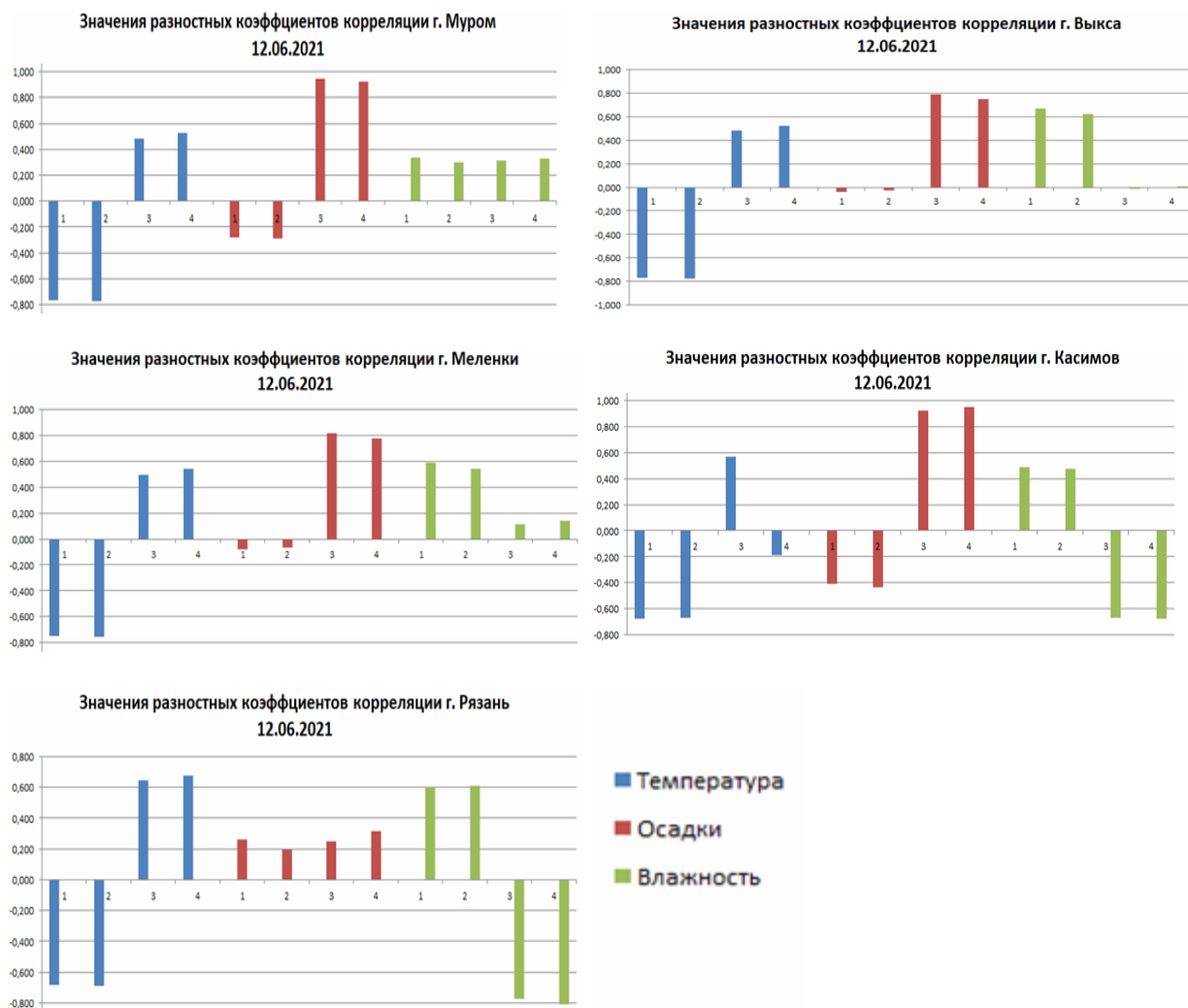


Рис. 7 Результаты корреляционного анализа значений метеопараметров - температуры, влажности, интенсивности осадков и величины выходных разностных сигналов СВЧ радиометрической системы (1 - частота 10ГГц, поляризация горизонтальная; 2 - частота 10ГГц, поляризация вертикальная; 3 - частота 7,5 ГГц, поляризация горизонтальная; 4 - частота 7,5ГГц, поляризация вертикальная)

Заключение

Полученные результаты исследований показали, что большое значение имеет степень однородности метеопараметров пространственной области атмосферы, соответствующей угловой области главного лепестка ДН антенны. Так большая степень пространственной однородности температуры в указанной местности определяет одинаковый по величине коэффициент корреляции в пределах почти двухсот километровой зоны. Наличие локальных зон осадков, привело к различию величины коэффициента корреляции результатов измерений с величиной интенсивности осадков в разных указанных городах, причем увеличение дальности до рассматриваемой области приводит к снижению коэффициента корреляции. Аналогичная зависимость от пространственной неоднородности проявляется в корреляции выходных сигналов с величиной влажности, фиксируемой в указанных населенных пунктах.

Выполнение корреляционного анализа по величине разностных сигналов показало более устойчивую взаимосвязь с значениями метеопараметров, что обусловлено компенсацией влияния на результаты измерений радиотеплового излучения той области атмосферы, которая при измерениях оказывается в области рассеяния антенны.

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

Литература

1. Радиотеплолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 283 с.
2. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Федосеев А.А. Вопросы построения многочастотной СВЧ - радиометрической системы дистанционного зондирования облачной атмосферы с компенсацией фонового излучения. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2015. – №1. – С.5 – 11.
3. Ilya Rostokin, Elena Fedoseeva, Elena Rostokina, George Shchukin Multifrequency Microwave Radiometric Method of Detection and Control of Dangerous Atmospheric Weather Events, Resistant to Changing Measurement Conditions – 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation, RWP 2019 - Proceedings 2019, 384 - 387, DOI: 10.1109/RWP.2019.8810166
4. E.V. Fedoseeva, I.N. Rostokin, G.G. Shchukin, E.A. Rostokina Multi-band microwave radiometric sensing of remote rain zones. Journal of Physics: Conference Series 2020 Russian open scientific conference «Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction» (MPRSRWPD) 2020 23-25 June 2020, Murom, Russian Federation. DOI:10.1088/1742-6596/1632/1/012012