

Методические вопросы обработки информации СВЧ радиометра L-диапазона на МКА ФКИ №1

М.Т. Смирнов, Д.М. Ермаков

*ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, г. Фрязино, Московская обл., Россия
E-mail: smirnov@ire.rssi.ru*

Эксперимент по СВЧ радиометрическому дистанционному зондированию Земли в L диапазоне осуществлялся при помощи специально разработанной научной аппаратуры «Зонд-ПП» установленной на малом космическом аппарате МКА ФКИ №1. В работе рассмотрены методические вопросы обработки полученной информации, главным образом в части учета аппаратурных факторов. Анализ результатов измерений показал, что внешние помехи играют довольно значительную роль, но не носят критического характера. Наряду с внешними помехами от активных радиотехнических средств, носящих локальный характер, в измеренных сигналах иногда наблюдались длительные, достаточно регулярные, плавные изменения. На основе статистического анализа ряда сеансов была подобрана линейная корректирующая функция, позволяющая сместить результаты измерений во втором канале, так чтобы в однородных областях разность сигналов обоих каналов была минимальной в каждом из сеансов. Для оценки достоверности полученных данных и проверки качества калибровки измерений выполненных при помощи «Зонд-ПП» проведено сравнение их с результатами измерений при помощи аналогичного европейского проекта SMOS, показавшее их хорошее соответствие. Обсуждаются особенности обработки информации с целью оценки солености океанов. Достичь высокой точности решения поставленной задачи можно только путем статистического усреднения оценок в отдельных пикселях. При реализованном пространственном разрешении прибора и достаточно высокой частоте выборки это возможно, но при наличии нестабильностей работы прибора такое усреднение при определенных условиях может стать некорректным. Рассмотрены возможности совместной обработки синхронных оптических изображений и СВЧ радиометрических измерений.

Ключевые слова: СВЧ радиометрические измерения, дистанционное зондирование Земли.

Введение

Эксперимент по СВЧ радиометрическому дистанционному зондированию Земли в L диапазоне осуществлялся при помощи специально разработанной научной аппаратуры установленной на малом космическом аппарате МКА ФКИ №1 (Смирнов и др., 2013). Основной полезной нагрузкой МКА ФКИ №1 является панорамный СВЧ радиометр L-диапазона «Зонд-ПП». Панорамные измерения в нем обеспечиваются путем одновременного измерения радиотеплового излучения вертикальной поляризации с разных участков земной поверхности с помощью 2-х лучевой антенны и 2-х канального СВЧ радиометрического приемника. В качестве дополнительной нагрузки на МКА ФКИ №1 была установлена также многоспектральная камера (МСК), работающая в оптическом и ИК диапазонах, позволяющая проводить съемки в той же полосе обзора что и «Зонд-ПП».

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с Научной программой (Арманд и др., 2009). За время измерений с сентября 2012 г. по май 2013 г. были получены ряды научных данных пригодных к тематической обработке. Анализ полученных данных показал необходимость разработки специальных методик обработки информации с учетом специфических особенностей функционирования бортовой аппаратуры.

Большое внимание было уделено также вопросам калибровки и учета аппаратурных искажений прибора. От качества калибровки зависит точность и надежность определения геофизических параметров Земли. При калибровке следует учитывать необходимость сопоставления полученных данных с результатами других аналогичных экспериментов для получения более полных рядов измерений. Конечным критерием качества работы научной аппаратуры является возможность решения целевых задач. В данном эксперименте одной из главных задач была проверка возможностей определения солености океанов для изучения ее динамики.

Калибровка измерений и сравнение с данными SMOS

Калибровка полученных данных проводилась по специально разработанной методике (Смирнов, Халдин, 2012) с использованием независимых данных об излучательных характеристиках выбранных районов. При калибровке оценивались также потери в антенно-фидерном тракте радиометра. Указанные потери корректировались по температурным датчикам, расположенным на антенне.

Недостатком данной методики является то, что от качества выбора районов калибровки зависит точность полученных результатов. Опыт обработки информации показал, что с наименьшей точностью определяются коэффициент, учитывающий потери в антенно-фидерном тракте, поэтому он оценивался по нескольким сеансам, где наблюдались большие изменения температуры антенны, вычислялось среднее значение этого коэффициента и в дальнейшем использовалось его фиксированная величина. Пример откалиброванных результатов измерений радиояркостных температур Земли приведен на *рис. 1*.

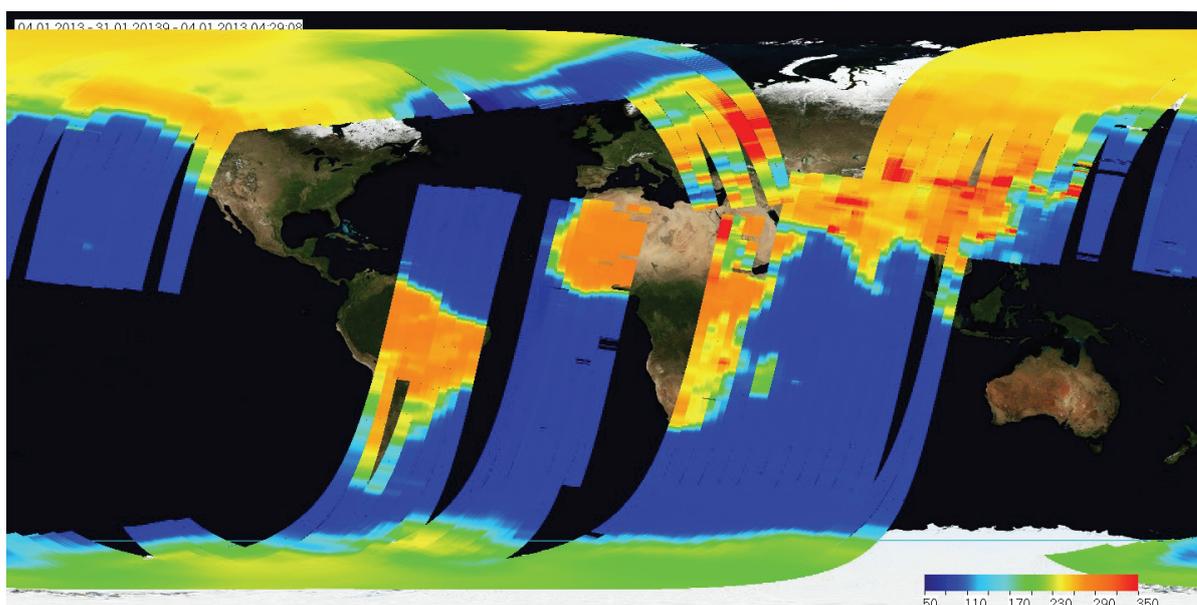


Рис. 1. Радиояркостные температуры Земли по измерениям за январь 2013 г.

С точки зрения стабильности характеристик и точности знания излучения природных объектов для целей калибровки представляется перспективным использование континентальных областей Антарктиды. Основной особенностью данного региона является стабильность характеристик его излучения практически независимо от внешних условий. Так, согласно экспериментальным данным (Macelloni et al., 2007), при суточных вариациях температуры воздуха порядка 15 К радиояркие температуры в L-диапазоне изменяются не больше, чем на 1-2 К.

Для оценки достоверности полученных данных и проверки качества калибровки измерений выполненных при помощи «Зонд-ПП» было проведено сравнение их с результатами измерений при помощи аналогичного европейского проекта SMOS. SMOS представляет собой спутниковый СВЧ радиометрический комплекс L-диапазона с антенной синтезированной апертуры (Kerr et al., 2010). Этот прибор успешно функционирует с 2009 года. Калибровкой и валидацией данных в этом проекте занимается большой коллектив специалистов из различных научных организаций Европейского союза и других стран.

Для сравнения выбирались измерения «Зонд-ПП» и SMOS на витках, где имеется пересечение областей наблюдений обоими приборами. Разность по времени между ними выбиралась минимально возможной и не превышала 10-12 часов. Пример сравнения результатов измерений радиоярких температур Земли, полученных двумя приборами, приведен на *рис. 2*. На нем сверху представлено изображение, полученное при помощи «Зонд-ПП», а внизу аналогичное изображение по данным SMOS. Из нескольких поляризационных каналов SMOS использовались радиояркие температуры на вертикальной поляризации, приведенные к углу падения $42,5^\circ$. Изображения в достаточной степени похоже отображают основные особенности собственного теплового излучения наблюдаемых природных объектов.

Справа вверху *рис. 2* представлена скаттерограмма значений радиоярких температур по результатам измерений «Зонд-ПП» (вертикальная ось) и SMOS (горизонтальная ось). На скаттерограмме отмечены области, относящиеся к районам суши и льдов. Сравнить значения радиоярких температур на воде не удастся, поскольку они отсутствуют в данных SMOS свободного доступа. Значения радиоярких температур на суше и области льдов достаточно хорошо ложатся на регрессионную прямую. Наблюдаемый большой разброс данных может быть объяснен существенным различием пространственного разрешения приборов.

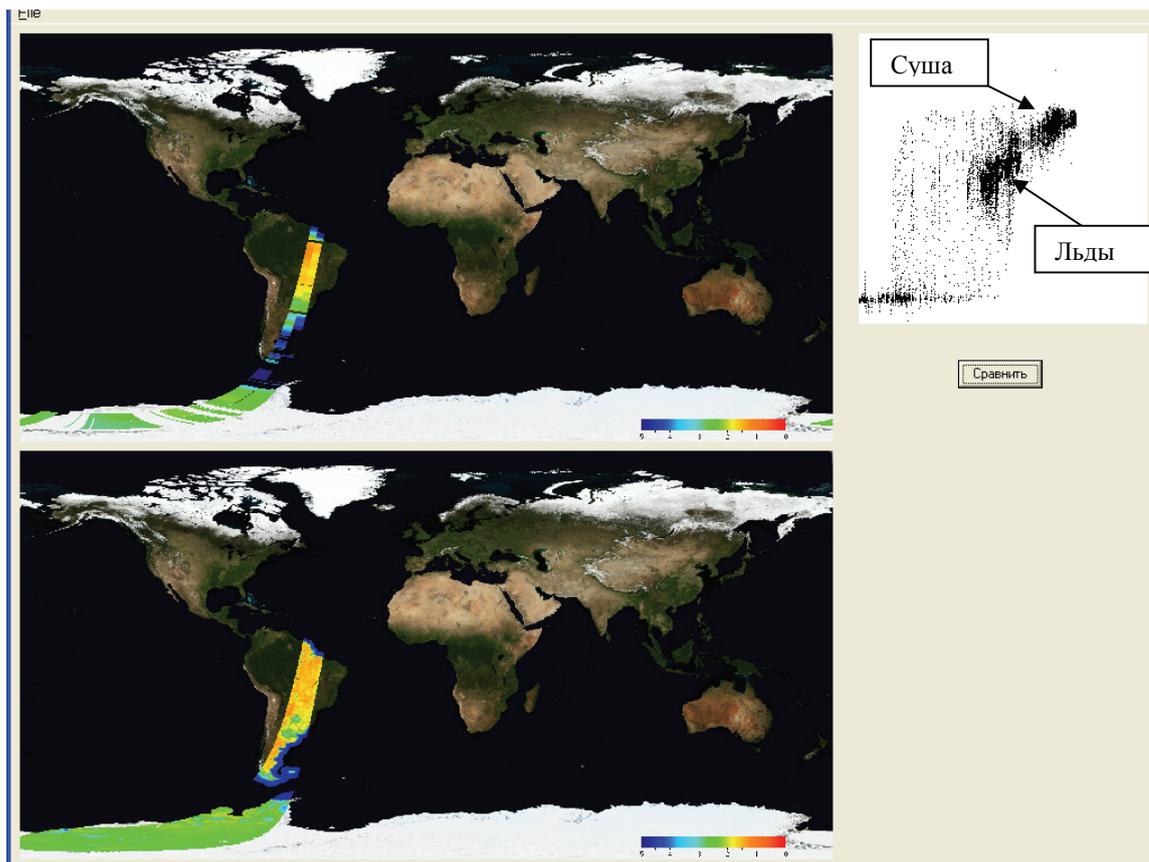


Рис. 2. Радиояркостные температуры Земли, измеренные двумя приборами (сверху – данные «Зонд-ПП», внизу SMOS, вертикальная поляризация) и скаттерограмма радиояркостных температур по данным «Зонд-ПП» в зависимости от аналогичных данных SMOS (верхний правый угол)

Анализ внешних помех и возможностей коррекции аппаратурных искажений

Анализ результатов измерений показал, что внешние помехи играют довольно значительную роль, но не носят критического характера. Об их распространенности можно судить по рис. 1, где зоны сильных внешних воздействий отображаются красным цветом. Накопленные ряды научных данных в данном эксперименте показали, что над поверхностью океанов количество таких помех минимально. По поверхности суши источники помех распределены неравномерно. Наибольшее их количество наблюдается в промышленно развитых районах и «горячих точках» (Ближний восток, Корея и т.п.).

Наряду с внешними помехами от активных радиотехнических средств, носящих локальный характер, в измеренных сигналах иногда наблюдались длительные, достаточно регулярные, плавные изменения. Пример результатов измерений при наличии таких воздействий приведен на рис. 3. Характер наблюдаемых вариаций выходных сигналов в одном из каналов радиометра не может быть объяснен внутренними изменениями характеристик прибора. Одна из основных гипотез состоит в том, что это может быть либо сол-

нечный нагрев одной из сторон антенны, либо попадание излучения Солнца в боковые лепестки диаграммы направленности антенны. Возможны также другие источники внешних воздействий. Точно установить причину пока не удалось. В связи с этим была рассмотрена возможность эмпирической коррекции полученных данных.

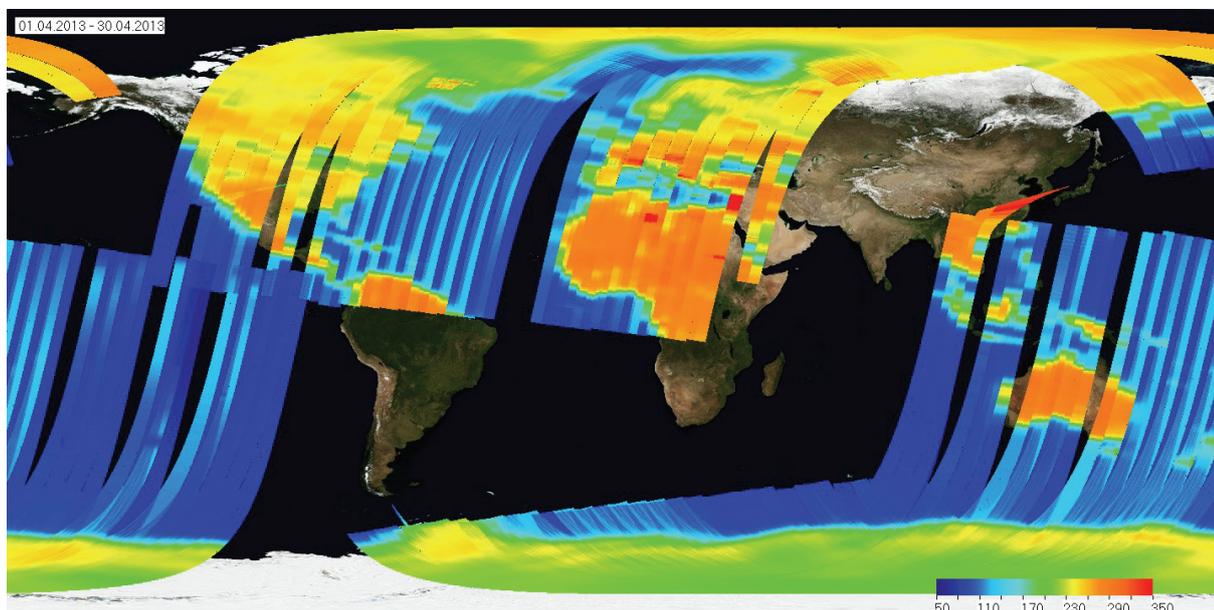


Рис. 3. Карта радиояркостных температур Земли по измерениям за апрель 2013 г.

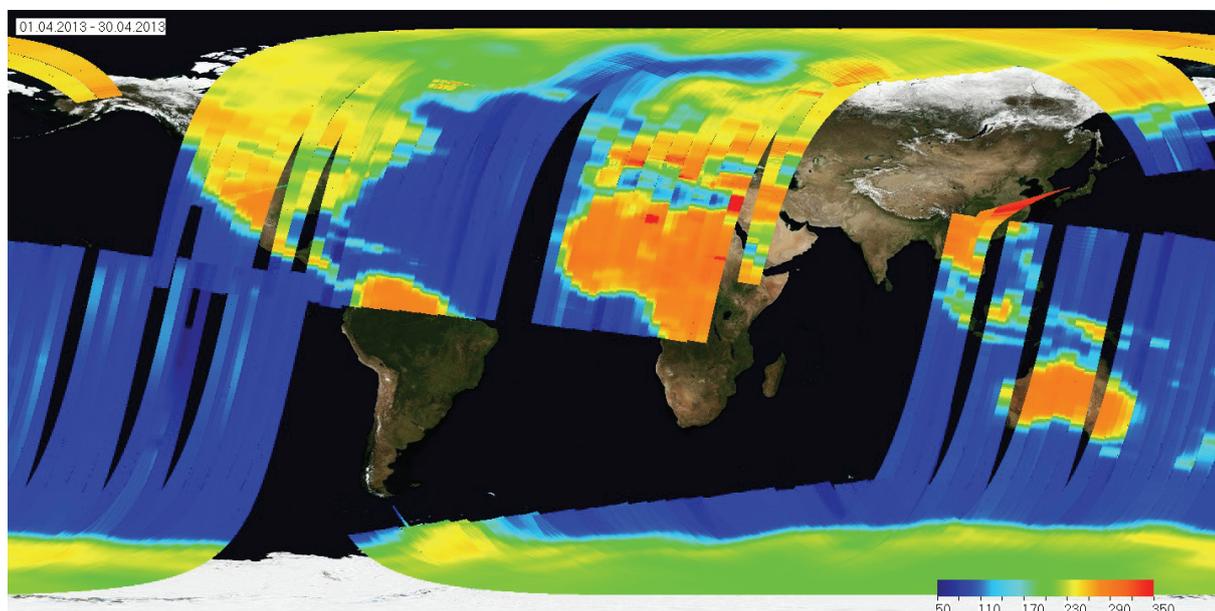


Рис. 4. Карта радиояркостных температур Земли по измерениям за апрель 2013 г. после коррекции данных

Идея алгоритма коррекции состоит в том, чтобы попытаться найти взаимосвязь между характеристиками выходных сигналов в двух каналах. Эти сигналы, вообще говоря, относятся к различным объектам на поверхности Земли, но в ряде районов уровни сиг-

налов близки и, если исключить переходные зоны, то можно подобрать линейную зависимость между двумя каналами. В результате статистического анализа ряда сеансов была подобрана линейная корректирующая функция, позволяющая сместить результаты измерений во втором канале, так чтобы в однородных областях разность сигналов обоих каналов была минимальной в каждом из сеансов. Пример результатов коррекции приведен на *рис. 4*. Таким образом удастся минимизировать влияние части внешних воздействий, но не полностью.

Определение солености океанов

Одной из основных задач космического эксперимента была проверка возможностей определения солености океанов для изучения ее динамики. Физической основой возможности и перспективности определения солености океанов по СВЧ радиометрическим измерениям является зависимость излучательной способности морской воды от ее проводимости, определяемой, главным образом, количеством растворенной соли. В дециметровом диапазоне эта зависимость имеет ряд особенностей. В частности, измеряемые радиояркие температуры морской поверхности практически линейно убывают с ростом солености. Другой важной особенностью является слабая зависимость измеряемых радиоярких температур от температуры самой воды. Результаты модельных расчетов показывают, что диапазон вариаций радиоярких температур при изменениях температуры воды от 5 до 35 К не превышает 2 К.

Модельные расчеты показали, что в первом приближении оценка солености может быть выполнена по следующей формуле:

$$S = (119,3 - T_b) / 0,61.$$

К существенным внешним мешающим факторам для определения солености океана относится ветровое воздействие на поверхность морской воды. По широко используемой эмпирической модели, полученной по результатам натуральных экспериментов (Camps et al., 2004), приращения радиоярких температур за счет влияния ветра для наших условий наблюдения можно описать выражением $\Delta T_w \approx 0,25W$. В соответствии с ним при вариациях W в диапазоне 0-20 м/с значения ΔT_w могут достигать 5 К.

Определение солености производилось по модельному регрессионному линейному алгоритму, связывающему измеренные радиояркие температуры с соленостью океана. Первые результаты полученных оценок солености океанов были представлены в статье (Смирнов и др., 2013). Они показали, что полученные данные отражают общую картину пространственной неоднородности солености океанов, но алгоритмы их оценки требуют дальнейшего развития.

Анализ результатов обработки полученных данных показал, что для определения солености океанов с требуемой точностью в данном эксперименте наибольшее внимание требуется уделять учету различных аппаратурных факторов. Поскольку погрешность измерений радиояркостных температур в 0,4 К, равная флуктуационной чувствительности СВЧ радиометрического приемника, приводит к ошибкам определения солености примерно в 0,65 промилле, то достичь высокой точности решения поставленной задачи можно только путем статистического усреднения оценок в отдельных пикселях. При реализованном пространственном разрешении прибора и достаточно высокой частоте выборки это возможно, но при наличии нестабильностей работы прибора такое усреднение при определенных условиях может стать некорректным. В качестве одного из вариантов была рассмотрена возможность использования каналов измерений «Зонд-ПП» по отдельности. При этом ухудшаются характеристики обзора пространства, но улучшается качество определения пространственной структуры полей солености (удаляются полосы явно завышенных оценок). На *рис. 5* приведен пример результатов оценки солености океанов по данным только одного из каналов «Зонд-ПП».

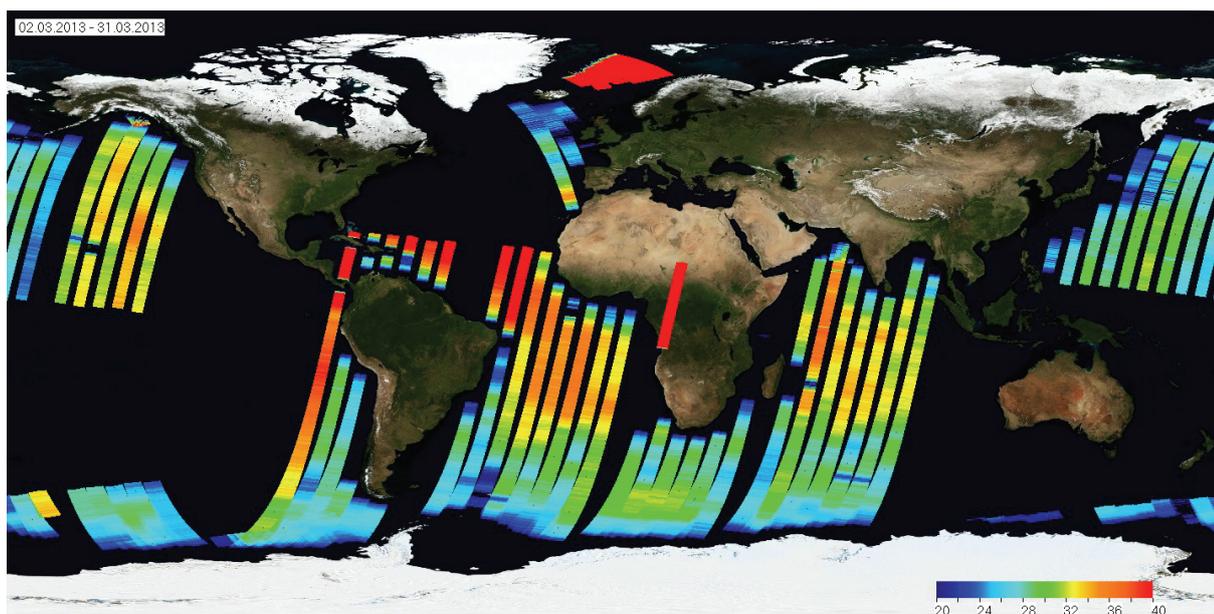


Рис. 5. Результаты оценки солености океанов по данным одного из каналов «Зонд-ПП», март 2013 г.

Совместный анализ СВЧ радиометрических и оптических изображений

Использование детальной информации об изучаемой поверхности из оптических или ИК каналов МСК открывает дополнительные возможности при решении задач повышения пространственного разрешения СВЧ радиометрических измерений и их тематической обработки. Пример совмещенных синхронных изображений МСК и «Зонд-ПП» приведен на *рис. 6*. Благодаря различию механизмов формирования полей микроволнового и

оптического излучения океана, имеется возможность расширения количества физических параметров океана, определяемых по результатам совместного анализа данных о характеристиках этих полей. Вместе с тем при наличии параметров среды (общих факторов), которые одновременно влияют на оба типа измерений, возможно взаимное дополнение информации, содержащейся в каждом типе измерений.

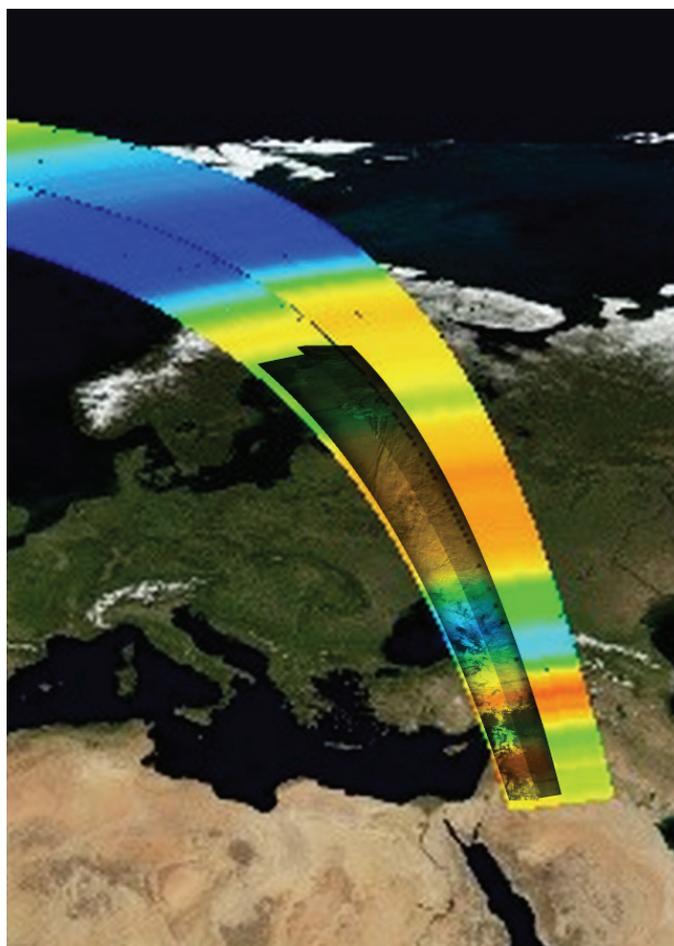


Рис. 6. Совмещенные изображения МСК и «Зонд-ПП». Данные «Зонд-ПП» в псевдоцвете, а МСК – серая шкала

Для оценки общности информации синхронных оптических изображений и СВЧ радиометрических измерений была рассчитана пространственная корреляция совмещенных данных МСК и «Зонд-ПП». Расчет производился в скользящем окне заданного размера. Полученное значение для данного положения окна приписывалось центральной точке окна, в результате формировалась матрица значений в диапазоне $[-1; 1]$, равная по размерам матрицам исходных изображений. На *рис. 7* визуализированы с помощью растровых изображений полученные матрицы корреляций для размеров скользящего окна 20×20 узлов. Отрицательные значения кодированы тонами синего цвета, положительные – тонами красного цвета; увеличению модуля корреляции соответствует увеличение яркости тона; нулевым значениям соответствует черный цвет.

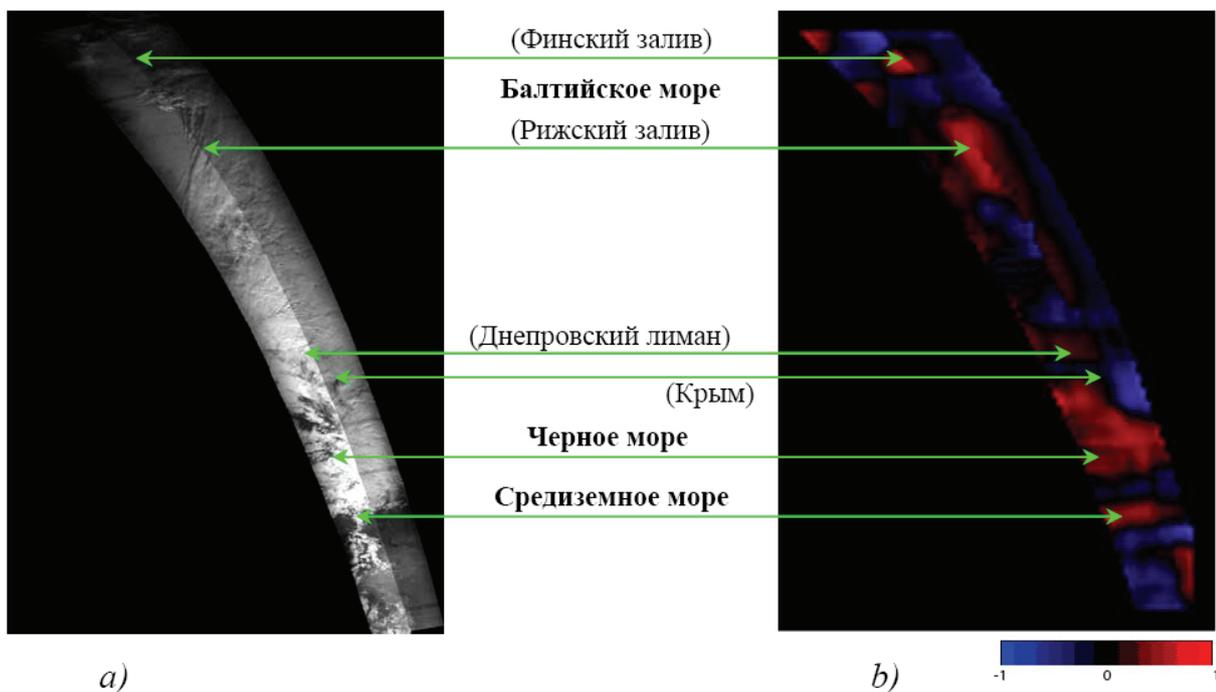


Рис. 7. Сопоставление изображения МСК (а) и матрицы корреляций с данными «Зонд-ПП» (b).

На рис. 7 видно, что максимальная корреляция последовательно (вдоль трассы измерений) наблюдается при пересечении береговых линий Средиземного, Черного и Балтийского морей. Интересно отметить, что положительная корреляция в районах береговых линий проявляется даже при наличии довольно плотной облачности (в случае Черного моря), причем в свободных от облачности областях выделяются даже относительно мелкие детали (например, Днепровский лиман на северном побережье Черного моря и северо-восточная оконечность Средиземного моря). Над областями суши наблюдается в основном отрицательная или близкая к нулевой корреляция.

В целом, результаты предварительного анализа свидетельствуют о перспективности совместной обработки измерений МСК и «Зонд-ПП», в частности, для автоматического выделения зон перехода суша-вода на большом массиве данных и осуществления дальнейших процедур повышения разрешения микроволновых данных. При наличии достаточных объемов качественных совместных измерений возможна их обработка на основе предложенной ранее модели нелинейного факторного анализа (Ермаков, Смирнов, 2011).

Заключение

Проведенный эксперимент позволил накопить ряды научных данных, пригодных для тематической обработки, но при их использовании необходим тщательный учет различных аппаратурных факторов.

Для определения солености океанов с требуемой точностью в данном эксперименте наибольшее внимание требуется уделять учету аппаратурных факторов.

Сравнение данных полученных при помощи «Зонд-ПП» и результатов калибровки измерений с результатами измерений при помощи аналогичного европейского проекта SMOS показало их хорошее согласие. Данные SMOS предоставлены ESA.

Результаты предварительного анализа свидетельствуют о перспективности совместной обработки измерений МСК и «Зонд-ПП».

Литература

1. Арманд Н.А., Тищенко Ю.Г., Саворский В.П., Смирнов М.Т. О Научной программе космических экспериментов в ходе эксплуатации КА «МКА-ПП1» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 1. С. 15–21.
2. Ермаков Д.М., Смирнов М.Т. Факторный анализ многоканальных спутниковых изображений океана для исследования эффектов поверхностного волнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 25–32.
3. Смирнов М.Т., Ермаков Д.М., Маклаков С.М., Халдин А.А., Максимов А.Е. Эксперимент по дистанционному СВЧ радиометрическому зондированию Земли в L-диапазоне с малого космического аппарата, первые результаты. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 142–149.
4. Смирнов М.Т., Халдин А.А. Предварительные результаты экспериментов с СВЧ радиометрическим комплексом L-диапазона на РС МКС. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 160-166.
5. Camps A., Font J., Vall-llossera M., Gabarro C., Corbella I., Duffo N., Torres F., Blanch S., Aguasca A., Villarino R., Enrique L., Miranda J.J., Arenas J.J., Julia A., Etcheto J., Caselles V., Weill A., Boutin J., Contardo S., Niclos R., Rivas R., Reising S.C., Wursteisen P., Berger M., Martin-Neira M. The WISE 2000 and 2001 field experiment in support of the SMOS mission: sea surface salinity retrieval // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol. 42. No. 4. P. 804-823.
6. Kerr Yann, Waldteufel P., Wigneron J. P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M. J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S. E., Drinkwater M. R., Hahne A., Martin-Neira M., Mecklenburg S. The SMOS Mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle // Proceedings of the IEEE. 2010. Vol. 98. No. 5. P. 666-687.
7. Macelloni G., Brogioni M., Pampaloni P., Cagnati A., Multifrequency microwave emission from the East Antarctic Plateau: Temporal and spatial variability // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2007. Vol. 45. No.7-1. P. 2029 – 2039.

Methodological issues of data processing from passive microwave radiometer at L-band on the MKA FKI No. 1

M.T. Smirnov, D.M. Ermakov

*Fryazino Department of V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS
Fryazino, Moscow region, Russia
E-mail: smirnov@ire.rssi.ru*

The experiment on passive microwave remote sensing in L range was carried out by means of specially developed scientific equipment "Zond -PP" installed on the small spacecraft MKA, FKI No. 1. The paper discusses methodological issues of processing the information received, mainly in terms of accounting instrumental factors. Analysis of the measurements showed that external interference play a considerable role, but not critical. Along with external interference from active radio sources having local character, sometimes long, regular enough and smooth changes

were observed in the measured signals. Based on statistical analysis of a number of sessions, a linear correction function was chosen, which allows to shift the measurement results in the second channel, so that in homogeneous domains signal difference from both channels was minimal in each of the sessions. To assess the validity of the data and test the quality of calibration performed using the "Zond -PP", the results were compared with the results of the European project SMOS measurements. The comparison showed their good agreement. Peculiarities of data processing for retrieving salinity of oceans are discussed. Solving the task to a high accuracy is possible only via statistical averaging of estimates in individual pixels. It is possible, that, given the implemented spatial resolution of the device and high sampling rate, however, in the case of unstable operation of the device, such averaging may become incorrect under certain conditions. Possibilities of joint processing of synchronous optical images and microwave radiometric measurements are considered.

Keywords: passive microwave radiometric measurements, remote sensing of the Earth.

References

1. Armand N.A., Tishchenko Yu.G., Savorskii V.P., Smirnov M.T. O nauchnoi programme kosmicheskikh eksperimentov v khode ekspluatatsii KA «MKA-PN1» (On the scientific program of space experiments in the course of exploitation of the space apparatus MKA-PN1)// *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 6, No. 1, pp. 15–21.
2. Ermakov D.M., Smirnov M.T. Faktornyi analiz mnogokanal'nykh sputnikovyykh izobrazhenii okeana dlya issledovaniya effektov poverkhnostnogo volneniya (Factor analysis of multi-channel satellite images of the ocean to study the effects of surface roughness), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 25–32.
3. Smirnov M.T., Ermakov D.M., Maklakov S.M., Khaldin A.A., Maksimov A.E. Eksperiment po distantsionnomu SVCh radiometricheskomu zondirovaniyu Zemli v L-diapazone s malogo kosmicheskogo apparata, pervye rezul'taty (Experiment in passive microwave remote sensing of the Earth in the L-band with small satellite, the first results), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 142–149.
4. Smirnov M.T., Khaldin A.A. Predvaritel'nye rezul'taty eksperimentov s SVCh radiometricheskim kompleksom L-diapazona na RS MKS (Analysis of passive microwave L- band data obtained in experiment on RS ISS), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 160-166.
5. Camps A., Font J., Vall-llossera M., Gabarro C., Corbella I., Duffo N., Torres F., Blanch S., Aguiar A., Villarino R., Enrique L., Miranda J.J., Arenas J.J., Julia A., Etcheto J., Caselles V., Weill A., Boutin J., Contardo S., Niclos R., Rivas R., Reising S.C., Wursteisen P., Berger M., Martin-Neira M. The WISE 2000 and 2001 field experiment in support of the SMOS mission: sea surface salinity retrieval, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, Vol. 42, No. 4, pp. 804-823.
6. Kerr Yann, Waldteufel P., Wigneron J. P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M. J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S. E., Drinkwater M. R., Hahne A., Martin-Neira M., Mecklenburg S., The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle, *Proceedings of the IEEE*, 2010, Vol. 98, No. 5, pp. 666-687.
7. Macelloni G., Brogioni M., Pampaloni P., Cagnati A. Multifrequency microwave emission from the East Antarctic Plateau: Temporal and spatial variability, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, No. 7-1, pp. 2029 – 2039.