

Натурные измерения излучения морской поверхности с помощью радиометра L диапазона

С.В. Маречек¹, М.Т. Смирнов¹, А.А. Халдин²

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН
141190, г. Фрязино, Московской обл., пл. Введенского, 1

E-mail: smirnov@ire.rssi.ru

²СКБ ИРЭ РАН,

141190, г. Фрязино, Московской обл., пл. Введенского, 1

E-mail: ahaldin@sdb.ire.rssi.ru

Доклад посвящен обсуждению технических проблем создания СВЧ радиометра L диапазона для дистанционного зондирования Земли на основе опыта работы в натуральных условиях. Одна из основных трудностей при создании СВЧ радиометра L диапазона состоит в необходимости разработки специальных мер для борьбы с внешними помехами. Для проведения натурных измерений был разработан малогабаритный узкополосный супергетеродинный радиометр с возможностью перестройки центральной частоты. С его помощью были исследованы различные потенциальные источники помех и выработаны рекомендации по проведению измерений. Наиболее полную информацию об объекте исследования, можно получить, используя полный набор поляризационных параметров проходящего радиоизлучения от исследуемого объекта. Проанализирована возможность измерения одноканальным радиометрическим приемником параметров поляризации Стокса в L диапазоне без применения корреляционной обработки сигналов. В предложенной методике используется прием сигналов на двух ортогональных поляризациях с последующей обработкой их на несущей частоте в блоке векторных сумматоров. Во время экспедиции «Кацивели-2007» на морской платформе получены натурные данные по изменчивости характеристик излучения морской поверхности при различных метеорологических и прочих условиях.

Введение

В настоящее время довольно сильно возрос интерес к СВЧ радиометрическим измерениям в L диапазоне. Это обусловлено перспективностью этого диапазона для дистанционного зондирования влажности почв и солености океана, а также разработкой новых спутниковых систем, таких как SMOS [1] и др. Одна из основных трудностей при создании СВЧ радиометра L диапазона состоит в необходимости разработки специальных мер для борьбы с внешними помехами. Для проведения натурных измерений был разработан малогабаритный узкополосный супергетеродинный радиометр с возможностью перестройки центральной частоты. С его помощью были исследованы различные потенциальные источники помех и выработаны рекомендации по проведению измерений.

Наиболее полную информацию об объекте исследования можно получить, используя полный набор поляризационных параметров проходящего радиоизлучения от исследуемого объекта. Рассматривается методика и алгоритмы получения полного набора параметров поляризации Стокса. Проанализирована возможность измерения одноканальным радиометрическим приемником параметров поляризации Стокса в L диапазоне без применения корреляционной обработки сигналов. В предложенной методике используется антенная система, позволяющая одновременный прием сигналов на двух ортогональных поляризациях с последующей обработкой их на несущей частоте в блоке векторных сумматоров.

Общее описание экспериментов

Натурные эксперименты проводились на морской платформе ЭО МГИ НАНУ в п. Кацивели (Крым) в августе 2007 г. в рамках комплексного эксперимента по дистанционному зондированию

морской поверхности «САРМОС'07», который являлся продолжением серии экспериментов [2-3]. Основные технические характеристики СВЧ радиометра приведены в таблице 1. Одной из важных особенностей радиометра является то, что центральная частота приемника может быть изменена вручную в пределах указанного диапазона.

Таблица 1. Основные технические характеристики СВЧ радиометра

Центральная частота, МГц	1380-1420
Полоса частот, МГц	7
Флуктуационная чувствительность, К	0,4
Питание, В	27
Размер, мм	130x1700x70
Вес, кг	≈1

Одной из важных задач эксперимента было изучение возможностей проведения измерений при наличии внешних помех или радиоинтерференции. Опыт показал, что перестройка частоты позволяет избавиться с основной части внешних помех, но они все равно присутствуют в измеренных сигналах. Важно отметить, что одним из самых активных источников помех является компьютер, используемый для сбора данных. Требуется максимальное удаление его от радиометра и тщательное экранирование.

Пример реализации измеренного сигнала радиометра при наличии внешних помех приведен на рис. 1. Одним из эффективных методов оценки присутствия помех является статистический анализ нормальности распределения сигнала [4]. Использование такого признака позволяет достаточно надежно идентифицировать кратковременные помехи, но исключить помехи такого вида как на приведенном примере в середине рис. 1 не удастся. Для этого требуется разработка специальных алгоритмов.

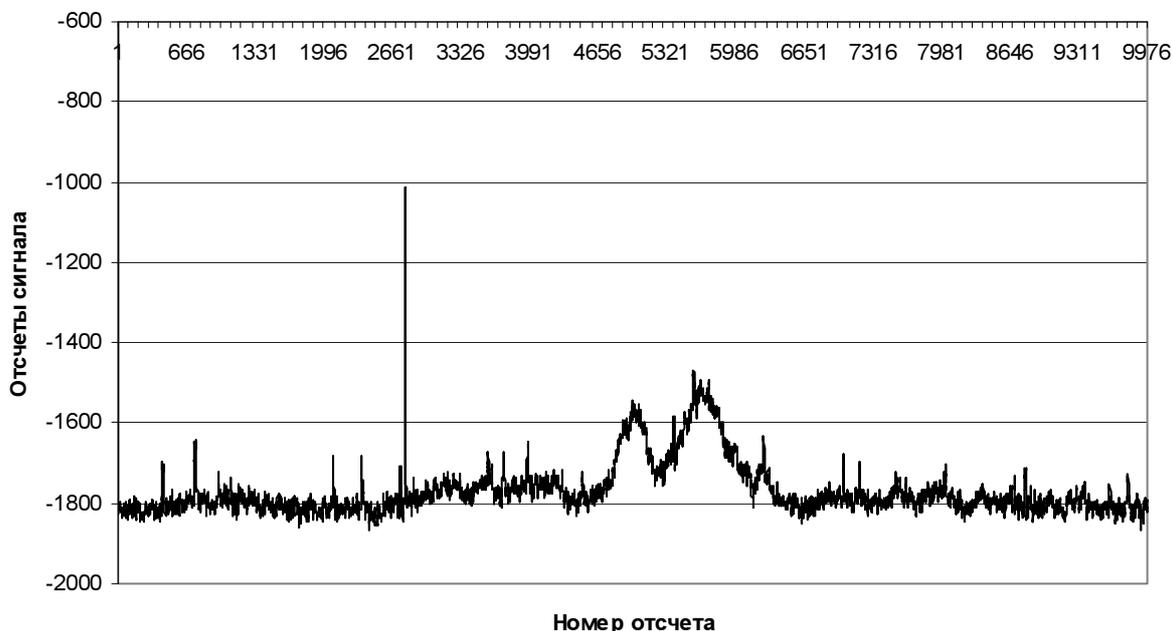


Рис. 1. Пример записи радиометрического сигнала при наличии внешних помех

Для измерений использовались 2 различных антенны: рупорная измерительная антенна Пб-23А и зеркальная антенна. Зеркальная антенна была специально разработана специалистами

ВЛГУ и обеспечивала одновременный прием излучения на двух ортогональных поляризациях.

Во время проведения эксперимента наблюдались как штилевые условия, так и значительные вариации скорости приводного ветра.

Длительные измерения вариаций радиоярких температур

Длительные измерения вариаций радиоярких температур проводились при помощи рупорной антенны с целью анализа естественной изменчивости принимаемых сигналов, выявления основных факторов определяющих их и оценки вклада помех в зависимости от времени суток. Измерения проводились непрерывно в течение нескольких суток. Антенна была направлена на морскую поверхность под углом около 60° относительно надира. Ширина диаграммы направленности составляла примерно 20° .

Для калибровки измерений использовались измерения угловой зависимости излучения атмосферы и гладкой морской поверхности на двух поляризациях. При этом изменение поляризации производилось поворотом радиометра с антенной, что обеспечивало неизменность параметров приемного тракта и усиления. На рис. 2 представлен пример измеренной угловой зависимости излучения при изменении угла возвышения от -30° (водная поверхность) до 90° (надир). Связь между радиояркими температурами $Tя$ и отсчетами сигналов радиометра U предполагалась линейной:

$$Tя = C + kU \quad (1)$$

Расчет калибровочных коэффициентов k и C производился путем минимизации среднеквадратичной разности между расчетными (модельными) значениями $Tя$ и значениями рассчитанными по (1) методом наименьших квадратов.

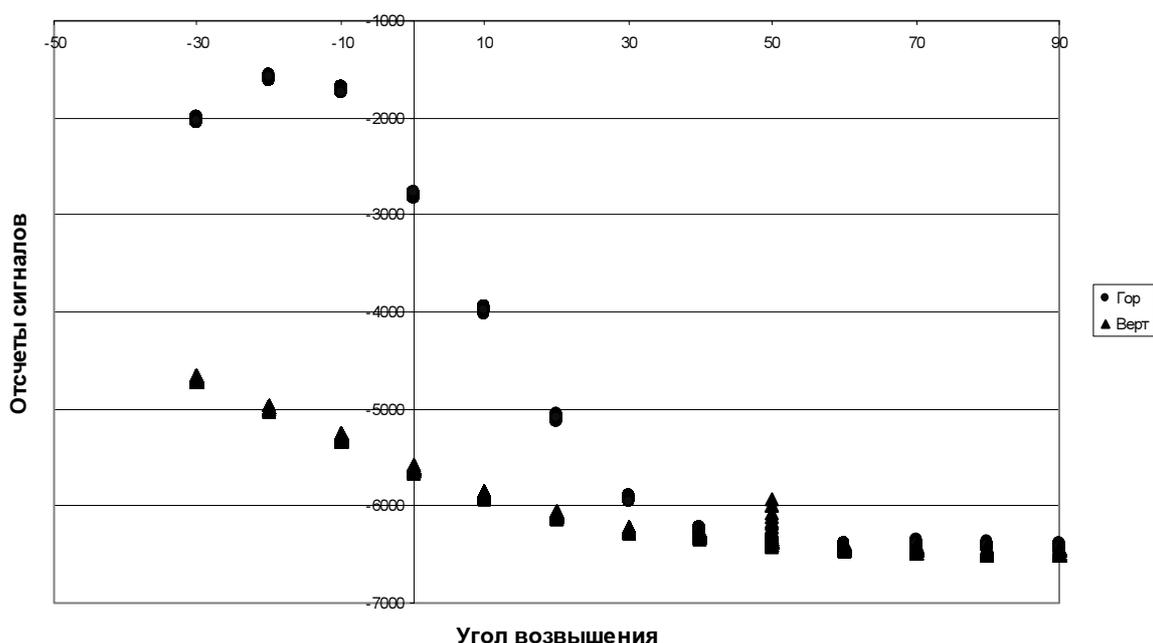


Рис. 2. Угловые зависимости излучения системы морская поверхность – атмосфера на горизонтальной и вертикальной поляризациях, 17.08.2008, штиль

Суточный ход вариаций измеренных радиоярких температур за трое суток представлен на рис. 3. Максимальные изменения сигнала наблюдались в дневное время. Погодные условия были такими что, как правило, ночью дул слабый ветер, а днем он усиливался. Предварительные оценки показывают, что такие большие вариации радиоярких температур влиянием только

шероховатости поверхности за счет волнения объяснить трудно. В дневное время они могут быть в частности обусловлены вкладом рассеянного от волнения излучения Солнца. Этот эффект требует дополнительного исследования.

Сравнение вариаций радиотеплового излучения и скорости ветра показывает подобный характер их изменений (рис. 4). Связь между $Tя$ и скоростью ветра явно неоднозначна. Можно отметить, что уменьшение скорости ветра в районе 17 часов приводит к уменьшению $Tя$ с задержкой по времени порядка 30-40 мин.

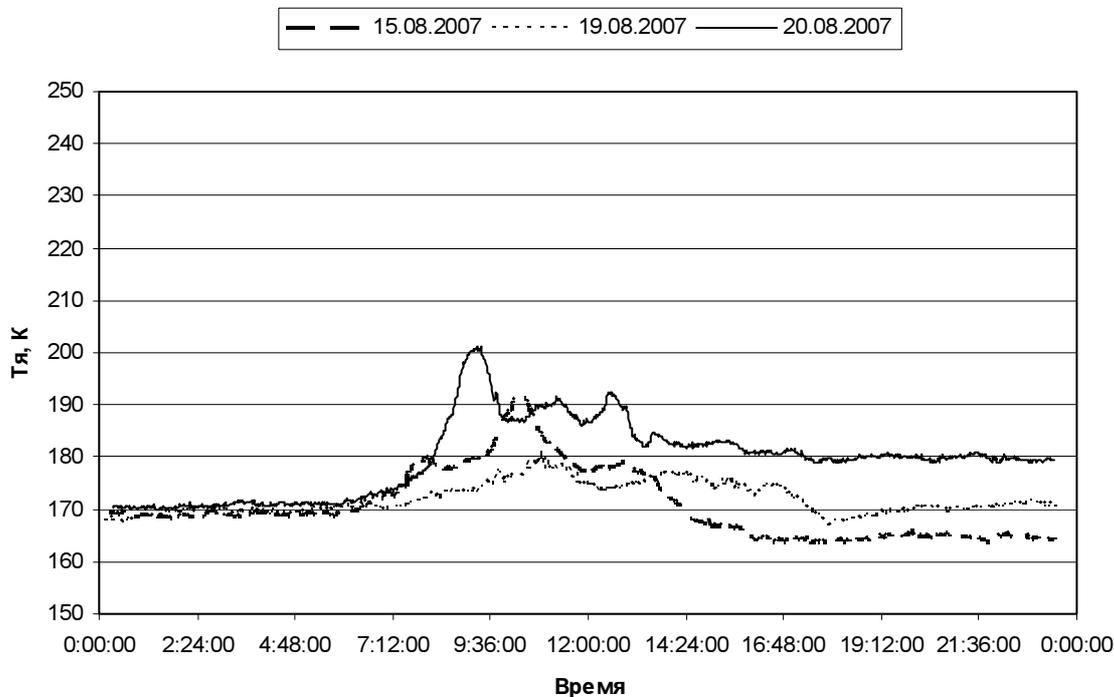


Рис. 3. Суточный ход измеренных радиоярких температур на вертикальной поляризации, угол наблюдения 60° от надир

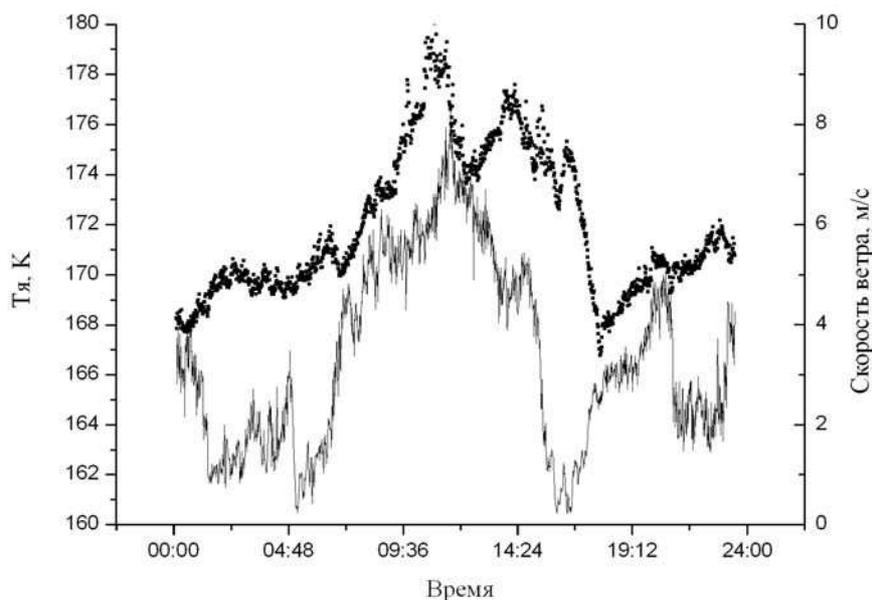


Рис. 4. Взаимосвязь радиотеплового излучения моря и скорости приводного ветра, 19.08.2007, точки – радиояркая температура, сплошная линия – ветер

Поляризационные измерения излучения морской поверхности

Методика определения параметров Стокса

Наиболее полную информацию об объекте исследования, можно получить, используя полный набор поляризационных параметров приходящего радиоизлучения от исследуемого объекта. В случае частично поляризованного излучения параметры Стокса могут быть найдены из выражений [5]:

$$\begin{cases} I = 2T^N + T_H^P + T_V^P \\ D = T_V^P - T_H^P \\ U = 2\sqrt{T_H^P T_V^P} \cos \varphi \\ B = 2\sqrt{T_H^P T_V^P} \sin \varphi \end{cases} \quad (2)$$

где T^N - мощность (температура) неполяризованной компоненты; T_V^P, T_H^P - мощность (температура) поляризованной компоненты, φ - угол фазового сдвига.

Для эллиптически поляризованной волны при этом параметры Стокса связаны соотношением:

$$I^2 = U^2 + B^2 + D^2 \quad (3)$$

При проведении измерений параметров поляризации должна использоваться антенная система с двумя выходами, позволяющая одновременно принимать сигнал на двух ортогональных поляризациях – вертикальной и горизонтальной. Между выходами антенной системы и входом радиометрического приемника подключается векторный сумматор сигналов. Обобщенная блок-схема такого радиометра представлена на рис. 5. Антенная система визируется на морскую поверхность под некоторым углом, и производится прием излучения на вертикальной U_V и горизонтальной U_H поляризациях, а также их векторные суммы без сдвига U_0 и со сдвигом по фазе на 90° U_{90} .

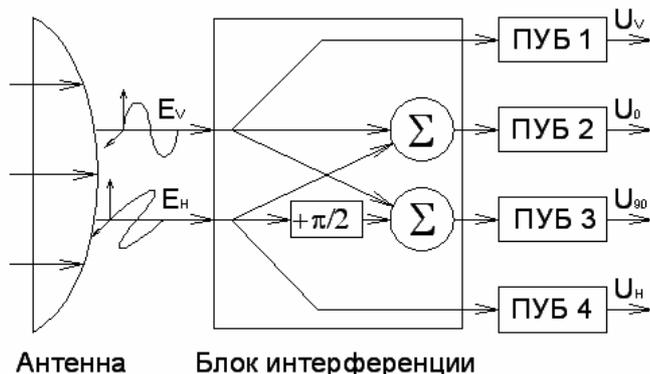


Рис. 5. Схема работы поляриметрического радиометра с векторным суммированием сигналов

Серия из четырех измерений в общем виде может быть описана следующим образом:

$$\begin{cases} U_V = k_V(T^N + T_V^P) + C \\ U_H = k_H(T^N + T_H^P) + C \\ U_0 = k_V^0(T^N + T_V^P) + k_H^0(T^N + T_H^P) + k^0 T_0 + C_0 \\ U_{90} = k_V^{90}(T^N + T_V^P) + k_H^{90}(T^N + T_H^P) + k^{90} T_{90} + C_{90} \end{cases} \quad (4)$$

где k, C – коэффициенты линейной связи измеренных выходных сигналов радиометра и соответствующих радиоярких температур, определяемые при калибровке.

Если радиофизические характеристики объекта исследования изменяются во времени достаточно медленно, то можно использовать одноканальный радиометрический приемник и проводить измерения соответствующих сигналов последовательно по времени.

В этом случае при проведении измерений U_V и U_H на один из входов подключается приемная антенна соответствующей поляризации, а на второй вход векторного сумматора подключается согласованная нагрузка (СН) с температурой порядка 300К. Если полагать характеристики антенны и сумматора близкими к идеальным, то выражения (3) примут вид:

$$\begin{cases} U_V = k(T^N + T_V^P)/2 + kT_{CH}/2 + C \\ U_H = k(T^N + T_H^P)/2 + kT_{CH}/2 + C \\ U_0 = k(T^N + T_V^P)/2 + k(T^N + T_H^P)/2 + k\sqrt{T_V^P T_H^P} \cos \varphi + C \\ U_{90} = k(T^N + T_V^P)/2 + k(T^N + T_H^P)/2 + k\sqrt{T_V^P T_H^P} \sin \varphi + C \end{cases} \quad (5)$$

После проведения калибровки радиометра, т.е. выполнения измерений излучения объектов с известными значениями радиоярких температур, определяются коэффициенты k, C и системы уравнений (2, 5) позволяют определить все значения параметров Стокса.

Экспериментальные результаты

При проведении экспериментальных исследований возможности получения параметров поляризации по изложенной выше методике, использовалась зеркальная антенная система с двумя коаксиальными выходами, позволяющая одновременно принимать сигнал на двух ортогональных поляризациях – вертикальной и горизонтальной. Использовался одноканальный радиометрический приемник. Между выходами антенной системы и входом радиометрического приемника подключался векторный сумматор сигналов. Антенная система визировалась на морскую поверхность под углом в 53° от надира. Был проведен прием излучения морской поверхности антенной системой на вертикальной и горизонтальной поляризациях, а также их векторные суммы без сдвига и со сдвигом по фазе на 90° .

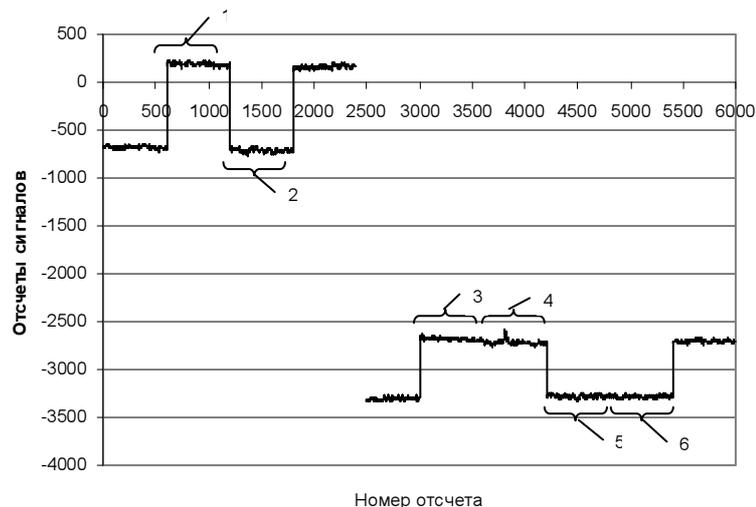


Рис. 6. Выходные сигналы радиометрического приемника для измерений: 1 – на вертикальной, 2 – горизонтальной поляризациях. 3-6 – с применением векторного сумматора. 3,4 – без дополнительного сдвига по фазе между каналами V и H . 5,6 – с дополнительным сдвигом по фазе 90° между каналами V и H

По результатам калибровки, для измерений приведенных на рис. 4, с учетом поправки по фазе на угол $\alpha = -6,67$ градуса в сигналах между каналами вертикальной и горизонтальной поляризации, определены значения параметров Стокса в яркостных температурах: $I = 217,2$; $D = 83,51$; $U = -0,0006$; $B = -52,41$.

Таким образом, с учетом поправок по фазе большая полуось эллипса располагается строго вертикально, фазовый сдвиг между ортогональными поляризациями равен 90° , а отношение длин полуосей эллипса равно

$$b/a = \operatorname{tg} \beta = -0,2878, \text{ где } \sin 2\beta = \frac{B}{\sqrt{D^2 + U^2 + B^2}}.$$

Заключение

Проведенные натурные измерения излучения морской поверхности с помощью радиометра L диапазона позволили проанализировать изменчивость характеристик излучения морской поверхности при различных метеорологических и прочих условиях.

Эксперименты показали возможность измерения параметров поляризации Стокса в L диапазоне одноканальным радиометрическим приемником без применения корреляционной обработки сигналов путем приема сигналов на двух ортогональных поляризациях с последующей обработкой их на несущей частоте в блоке векторных сумматоров.

Полученные результаты будут использованы при разработке спутниковых СВЧ радиометров L диапазона и при обработке результатов спутниковых измерений.

Авторы выражают искреннюю благодарность Поспелову М.Н. за общую организацию экспериментов, Комаровой Н.Ю. за представленные метеорологические данные, а также всем участникам экспедиции за помощь в проведении работы.

Работа выполнена при поддержке гранта INTAS 03-51-4789.

Литература

1. Font, J., G. Lagerloef, D. LeVine, A. Camps, O.Z. Zanife. The Determination of Surface Salinity with the European SMOS Space Mission // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, Vol. 42, n.10, pp 2196-2205.
2. Поспелов М.Н., Горячкин Ю.Н., Кузьмин А.В., Репина И.А., Смирнов М.Т. Мониторинг взаимодействия океана и атмосферы с использованием комплекса дистанционных и контактных приборов, установленных на прибрежной океанографической платформе// Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Сборник научных трудов. Севастополь, 2006. Выпуск 14. С. 418-430.
3. Поспелов М.Н., Ю.А. Горячкин, Н.Ю. Комарова, А.В. Кузьмин, И.А. Репина, Б.Д. Ситнянский, М.Т. Смирнов. Комплексный радиофизический эксперимент по дистанционному зондированию морской поверхности CAPMOS'05 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сборник научных статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Выпуск 4. Т. 1. С. 337-348.
4. Misra, Sidharth; Kristensen, Steen Savstrup; Skou, Niels; Sobjaerg, Sten Schmidl. CoSMOS: Performance of Kurtosis Algorithm for Radio Frequency Interference Detection and Mitigation// Proceedings of IGARSS'07, 2007, p. 2714-2717
5. Yueh, S.H., S.V. Nghiem, R. Kwok, W.J. Wilson, F.K. Li, J.T. Johnson, J.A. Kong. Polarimetric thermal emission from periodic water surfaces // Radio Science, 1994. Vol. 29. No.1. P.87-96.