

Анализ вклада радиоизлучения спокойного Солнца в тепловое излучение морской поверхности в L-диапазоне

М.Т. Смирнов, М.В. Данилычев

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал,
141190, Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1
E-mail: smirnov@ire.rssi.ru, dan@cplire.ru*

В работе выполнен анализ вклада излучения спокойного Солнца в радиотепловое излучение морской поверхности в L-диапазоне на основе сравнения данных натурных измерений и модельных расчетов. Натурные эксперименты проводились в годы спокойного Солнца на морской платформе ЭО МГИ НАНУ в п. Кацивели (Крым) в августе 2007 г. и октябре 2009 г. Модельные расчеты вклада Солнца в принимаемое излучение были выполнены методом Кирхгофа в предположении развитости волнения. Сравнение экспериментальных данных и результатов модельных расчетов показало, что общий характер и максимальное значение вклада излучения Солнца в принимаемое излучение неплохо описываются в рамках принятой модели.

Ключевые слова: СВЧ радиометрия, система океан-атмосфера, морское волнение.

Введение

Для правильной количественной и качественной интерпретации о распределении восходящего радиотеплового излучения системы “океан-атмосфера” необходимо корректно учитывать все источники радиоизлучения, формирующие общую наблюдаемую картину. Исследование данного вопроса особенно важно с учетом запуска отечественных спутниковых СВЧ-радиометрических систем L-диапазона (Арманд и др., 2010). Одним из факторов такого рода является радиоизлучение, создаваемое на орбите Земли потоками от источников излучения внеземного происхождения. Величины плотностей некоторых из этих потоков вблизи Земли могут оказаться достаточно значительными для того, чтобы заметным образом влиять на точность результатов получаемых при выполнении процедуры восстановления параметров системы “океан-атмосфера”. Источником самого мощного потока электромагнитного излучения космического происхождения во всех частотных диапазонах вблизи Земли является Солнце.

Целью данной работы является анализ вклада излучения спокойного Солнца в радиотепловое излучение морской поверхности в L-диапазоне на основе сравнения данных натурных измерений и модельных расчетов.

Экспериментальные данные

Натурные эксперименты проводились в годы спокойного Солнца на морской платформе ЭО МГИ НАНУ в п. Кацивели (Крым) в августе 2007 г. и октябре 2009 г. в рамках комплексных экспериментов по дистанционному зондированию морской поверхности «САРМОС’07», «САРМОС’09» (Кузьмин и др., 2009; Поспелов и др., 2010).

Для проведения натурных измерений использовались малогабаритные узкополосные супергетеродинные СВЧ радиометры L диапазона с применением рупорно-линзовой антен-

ны. Измерения проводились непрерывно в течение нескольких суток. Антенна была направлена на морскую поверхность под фиксированным углом 57° относительно надира для центрального луча диаграммы. Ширина диаграммы направленности на частоте 1,423 ГГц составляла примерно $33,5^\circ$ по уровню половинной мощности. Излучение принималось на вертикальной поляризации.

Измерения вариаций радиоярких температур проводились с целью анализа естественной изменчивости принимаемых сигналов, выявления основных факторов определяющих их и оценки вклада помех в зависимости от времени суток. Максимальные изменения принимаемого сигнала наблюдались в дневное время суток при прохождении через диаграмму приемной антенны радиоизлучения Солнца, рассеянного на шероховатостях взволнованной поверхности моря.

Метеорологическая обстановка во время измерений была несколько необычной. Температура поверхности воды изменялась лишь в пределах $0,5^\circ\text{C}$, соленость воды была практически неизменной, а скорость приводного ветра менялась в больших пределах от 0 до 18 м/с. Графики соответствующих величин приведены на рис. 1.

Данные, пригодные для обработки и анализа были получены за 6 суток непрерывных измерений. Полные ряды экспериментальных данных приведены на рис. 2. На приведенных графиках наряду с разнообразными вариациями сигнала отчетливо видно общее повышение уровня излучения в области полудня, которое по времени совпадает с прохождением Солнца почти в зеркальном направлении. В связи с этим нами была предпринята попытка количественной интерпретации данного эффекта на основе модельных расчетов.

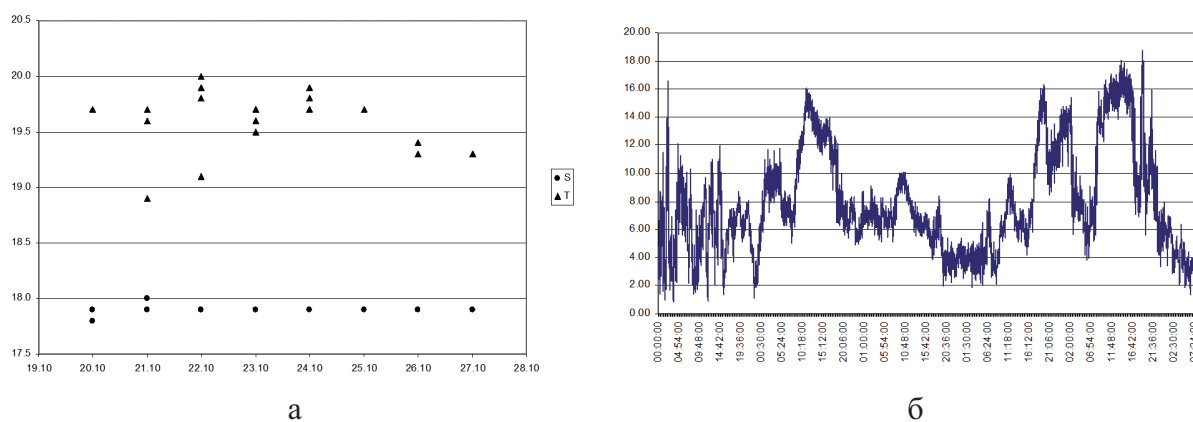


Рис. 1. Вариации параметров поверхности воды и атмосферы за период наблюдений, а) \blacktriangle – температура ($^\circ\text{C}$) и \bullet – соленость (промилле), б) скорость приводного ветра (м/с)

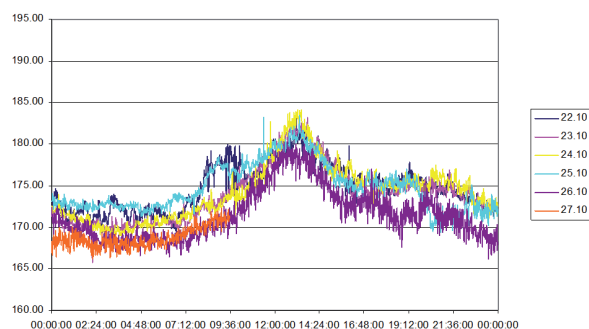


Рис. 2. Экспериментальные данные по измерениям радиоярких температур морской поверхности за 22-27 октября 2009 г. Кривые разного цвета соответствуют разным дням измерений

Модельные расчеты вклада Солнца в принимаемое излучение моря

В солнечной радиоастрономии, в отличие от дистанционного зондирования Земли, принято оперировать понятием полного потока излучения $S(\lambda)$. В радиодиапазоне связь между радиояркой температурой T_b и $S(\lambda)$ определяется законом Рэлея – Джинса и может быть записана в виде:

$$S(\lambda) = \frac{2k_b T_b}{\lambda^2} \Omega_s, \quad (1)$$

где $k_b = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана, видимый угол Солнца Ω_s измеряется встерад, λ – длина волны в метрах, а $S(\lambda)$ – в единицах потока $\text{вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$. В практических разделах солнечной радиоастрономии применяется солнечная единица потока (СЕП или s.u., иногда s.f.u.):

$$1 \text{ СЕП} = 1 \text{ s.f.u.} = 10^{-22} \text{ вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1} \quad (2)$$

Эксперименты показывают, что, несмотря на возможную круговую поляризацию от отдельных локальных источников, интегральный поток (от всего Солнца) солнечного радиоизлучения в СВЧ диапазоне практически не поляризован и образуется как за счет механизмов теплового излучения, так и в значительной мере за счет механизмов нетепловой природы. Солнце принято считать “невозмущенным” или “спокойным”, если на его видимом диске отсутствуют какие-либо активные образования (пятна, фолликулы, поры, волокна и т.д.). Тогда под уровнем излучения спокойного Солнца понимают интегральное излучение всей поверхности Солнца за вычетом областей повышенной активности (с характерными временами изменчивости от секунд до месяцев). При таком подходе уровень излучения “спокойного Солнца”, приведенный к расстоянию в 1 а.е., становится величиной переменной и квазициклической, правда с очень большим периодом – около 11 лет (а также с учетом смены магнитной полярности между полушариями – около 22, и с модуляцией еще более длительными колебаниями с периодом около 80 лет и т.д.). На рис. 3 приведена среднегодовая плотность потока излучения Солнца по измерениям за период порядка 60 лет.

При описанной выше схеме эксперимента принимаемое радиометром излучение складывается из собственного излучения морской поверхности, а также отраженного от него и рассеянного на взволнованной поверхности излучения Солнца. Вклад излучения Солнца зависит от его положения на небесной сфере относительно направления визирования и состояния морской поверхности.

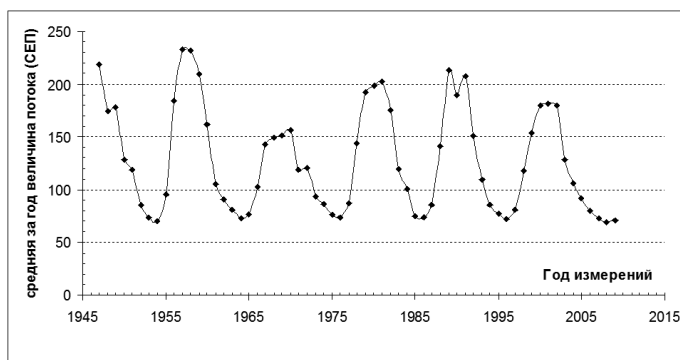


Рис. 3. Среднегодовая плотность потока излучения Солнца

Модельные расчеты вклада Солнца в принимаемое излучение были выполнены методом Кирхгофа в предположении развитости волнения. При этом использовалась модель развитого волнения и методика ее использования в радиодиапазоне, полученные ранее в результате статистической обработки экспериментальных данных комплексных экспериментов по программе дистанционного зондирования “Природа” на полигоне Кацивели (Данилычев и др., 1993, 2009).

В качестве источника информации о величине потока солнечного радиоизлучения в данном диапазоне на время проведения эксперимента были использованы данные международной Службы Солнца (радиообсерватории Palehua (PALE), Learmonth (LEAR), Sagamore_Hill (SGMR) и San_Vito (SVTO)).

Обсуждение результатов

На рис. 4 на фоне экспериментальных данных за 23 октября 2009 года приводятся результаты модельного расчета величины вклада отраженного солнечного радиоизлучения для трех значений скорости приводного ветра на высоте 19,5 метра: 5 м/с, 10 м/с и 15 м/с. Плотность потока во время измерений составляла около 56 СЕП, температура воды показывала слабый рост от 16 до 17,5°C, соленость была практически неизменной и равной 17,9 промилле.

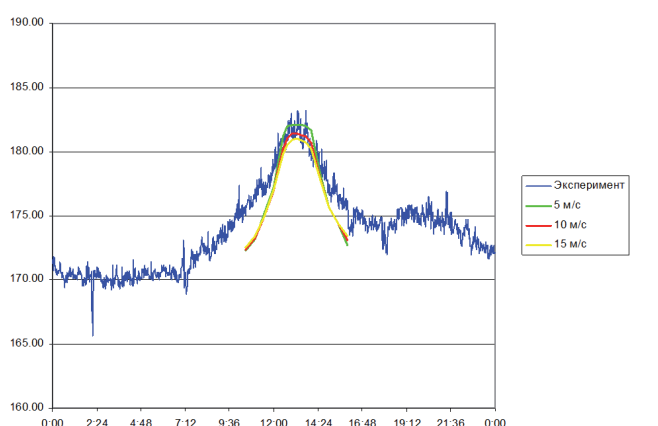


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных и результатов модельных расчетов

Результаты модельных расчетов показывают, что при увеличении скорости ветра вклад излучения Солнца при углах близких к зеркальному направлению уменьшается, а при отклонении от этого направления немного начинает повышаться. Вариации отраженного излучения Солнца, обусловленные возможными различиями шероховатости поверхности за счет ветрового воздействия, оцениваются величиной примерно в 3 К.

Из рисунка 4 видно, что максимальное значение вклада излучения Солнца в принимаемое излучение неплохо описываются в рамках принятой модели. Однако, вместе с тем, в экспериментальных данных явно наблюдается вклад других внешних источников излучения и возмущающих факторов, что требует дополнительного анализа. Так ширина «солнечного пика» в эксперименте получилась существенно больше предсказанного моделью. Это может быть обусловлено необходимостью учета при больших углах между направлением визирования и углом падения излучения Солнца (при широкой диаграмме направленности антенны) мелкомасштабной составляющей спектра морского волнения, не учитываемого при использовании метода Кирхгофа.

Заключение

Сравнение экспериментальных данных и результатов модельных расчетов показало, что общий характер и максимальное значение вклада излучения Солнца в принимаемое излучение неплохо описываются в рамках принятой модели. Однако, вместе с тем, в экспериментальных данных явно наблюдается вклад других внешних источников излучения и возмущающих факторов, что требует дополнительного анализа.

Результаты работы могут быть использованы при обработке и интерпретации спутниковых СВЧ радиометрических измерений в L-диапазоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 08-05-00890-а, 09-02-00780-а.

Литература

1. Арманд Н.А., Тищенко Ю.Г., Саворский В.П. и др. Перспективные космические проекты с СВЧ-радиометрическими системами L-диапазона // Исследование Земли из космоса, 2010. № 1. С. 20–26.
2. Данилычев М.В., Евтушенко А.В., Кутуза Б.Г., Лотов А.И., Николаев А.Г. Рассеяние СВЧ-радиоизлучения Солнца на шероховатостях взволнованной морской поверхности // Радиотехника и электроника, 1993. Т. 38. № 2. С. 273-278.
3. Данилычев М.В., Кутуза Б.Г., Николаев А.Г. Использование метода Кирхгофа для практических расчетов в микроволновой радиометрии взволнованной морской поверхности // Радиотехника и электроника, 2009, Т. 54, № 8, С. 915-926.
4. Кузьмин А. В., Горячкин Ю. А., Ермаков Д. М. и др. Морская гидрографическая платформа “Кацивели” как подспутниковый полигон на Черном море // Исследование Земли из космоса, 2009, № 1, С. 31–44.
5. Поспелов М.Н., Горячкин Ю.Н., Комарова Н.Ю. и др. Исследование особенностей взаимодействия океана и атмосферы в прибрежной зоне в серии комплексных экспериментов CAPMOS'05-07-09 // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. «К 30-летию океанографической платформы в Кацивели», НАН Украины: МГИ, ИГН, ОФ ИнБЮМ.- Севастополь. 2010, Вып. 21, С. 25-34.

Analysis of quiet Sun emission impact into L-band thermal microwave emission of the sea surface

M.T. Smirnov, M.V. Danilytchev

*Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino department,
141190 Fryazino, Moscow region, 1 Vvedenskogo sq.,
E-mails: smirnov@ire.rssi.ru, dan@cplire.ru*

Analysis of quiet Sun emission impact into L-band thermal microwave emission of the sea surface is made by comparison of field experiment data and model calculations. Field experiments were held in years of quiet Sun on the Experimental Department of MHI NASU offshore sea platform in Katsiveli (Crimea) in August 2007 and October 2009. Model calculations were made by Kirchhoff method in suggestion of fully developed waves. Comparison of experimental data and the model calculation results shows that general character and maximum impact of Sun emission are in a good enough agreement.

Keywords: Microwave radiometry, ocean-atmosphere system, sea waves.