

Некоторые результаты исследований взаимных спектров вариаций яркости восходящего излучения системы “водная толща - поверхность - атмосфера” в оптическом диапазоне длин волн по материалам многоуровневого эксперимента Карибэ-88

Е.М. Козлов

*Институт космических исследований РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: ekozlov@iki.rssi.ru*

Приводятся результаты исследований структурных особенностей взаимных спектральных образов вариаций яркости системы “атмосфера - водная поверхность” в оптическом диапазоне длин волн, на основе измерений в международном многоуровневом космическом эксперименте “Карибэ-88”. В заключении к отчету формулируются возможность применимости полученных результатов исследований для идентификации компонентного состава системы “атмосфера - водная поверхность” при решении задач дистанционного зондирования Земли.

Введение

Одна из основных задач дистанционного зондирования Земли состоит в определении характеристик образующего систему поверхность - атмосфера (САП) компонентного состава и его идентификации на основе анализа реакции САП при ее взаимодействии (возмущении) с солнечным излучением, на основе измерений восходящего излучения $I_\lambda(x)$, где x - текущая координата наблюдений; λ - длина волны. Учитывая сложный, зависящий от пространственной координаты состав САП, ее пространственную неоднородность и далеко не тривиальный механизм преобразования падающего излучения Солнца [1], достоверность и надежность восстановления характеристик компонентов с одной стороны определяется полнотой и глубиной понимания физического механизма формирования и трансформации поля восходящего излучения САП, а с другой совершенством теоретического аппарата его описания, совокупностью используемых методов и подходов при решении указанной задачи, процесс совершенствования и развития которых проходит при непрерывном сравнении и сопоставлении с результатами комплексных многоуровневых экспериментальных исследований САП в реальных условиях наблюдений.

Благодаря своей универсальности, в экспериментальной практике все более широкое применение при изучении физического механизма трансформации излучения в САП находит линейно системный подход [2], суть которого сводится к тому, что исходя из определения системы как совокупности всех образующих ее компонентов, которые осуществляют преобразование ряда входных функций $I_{0\lambda}(x)$ (возмущений) в ряд выходных $I_\lambda(x)$ (реакций), функциональное соотношение связывающее возмущения и реакции линейной системы имеет фундаментальный характер и известно как интеграл суперпозиции, означающий, что линейная система полностью характеризуется суммой ее откликов на входные воздействия.

Существует два вида представления реакции. При наблюдениях со спутника или аэронавителя это в виде функции $I_\lambda(x)$, описывающей пространственную структуру реакции, и в виде ее спектрального

образа

$$S_{\lambda, \Omega} = \int_{-\infty}^{\infty} I_\lambda(x) \exp(-2\pi j \Omega x) dx, \quad (1)$$

связанные друг с другом Фурье преобразованием, записываемым в символическом виде как

$$I_\lambda(x) \xleftrightarrow{\quad} S_\lambda(\Omega) . \quad (2)$$

Проведенные в работе [3] исследования с применением средств спектрального и фрактального анализа к данным квазисинхронных самолетных и спутниковых трассовых измерений яркости системы “водная толща - поверхность - атмосфера” с помощью спектральной аппаратуры МКС-М [4], и сопоставление их с наблюдениями с борта судна, которые были получены в ходе международного эксперимента “Карибэ-88”, позволили для исследуемой зоны моря установить ряд особенностей перераспределения свойств изображения и его трансформации за счет, имеющих место в системе “водная поверхность - атмосфера”, эффектов многократного рассеяния, а также провести качественную дифференциацию по пространственным частотам атмосферных, поверхностных и гидрооптических эффектов.

В настоящей работе, которая является логическим продолжением изучения физического механизма преобразований и трансформации солнечного излучения САП спектральными методами, проведены исследования вариаций восходящего излучения в реальных условиях наблюдений во время международного, многоуровневого и многоцелевого эксперимента Карибэ-88, на основе анализа их действительной составляющей взаимных спектральных образов [5]

$$\operatorname{Re}[S_{\Omega}(\lambda_j, \lambda_i)] = \frac{1}{N \Delta\Omega} \sum_{k=1}^N \tilde{I}_{\lambda_j, \Omega}(x_k) \tilde{I}_{\lambda_i, \Omega}(x_k), \quad (3)$$

где $\Delta\Omega$ - полоса пространственных частот вариаций яркости $\tilde{I}_{\lambda}(x) = I_{\lambda}(x) - \bar{I}_{\lambda}$ регистрируемого восходящего излучения $I_{\lambda}(x)$; \bar{I}_{λ} - среднее значение яркости восходящего излучения; N - число наблюдений.

Выбор экспериментального материала обусловлен его наибольшей комплексностью по оснащенности задействованными техническими средствами, где использовалась многоканальная (МКС-М) аппаратура на самолете - лабораториях, спектрометрическая, биометрическая и гидрофизическая аппаратура на береговых станциях и на научно-исследовательских судах (НИС) с измерениями одновременно со спутниковыми оптических параметров атмосферы и поверхности [6].

Краткое описание экспериментального материала. Постановка задачи

В качестве исходного материала для исследований взаимных спектральных образов $S_{\Omega}(\lambda_j, \lambda_i)$, были использованы надирные измерения спектральной яркости $I_{\lambda}(x)$, выполненные 15.04.1988 г. с помощью блока МКС-БС аппаратуры (МКС-М) во время международного многоуровневого эксперимента “Карибэ-88” над шельфовой зоной Карибского моря при зенитном расстоянии Солнца $Z_0 \sim 25^\circ$ и приводной скорости ветра $v = 3-5$ м/с. Подробное описание условий эксперимента можно найти в работах [3, 7]. В силу более широкого диапазона пространственных частот, в котором возможно проведение спектрального анализа вариаций яркости САП, для исследования распределений $S_{\Omega}(\lambda_j, \lambda_i)$ были использованы данные, полученные с борта самолета лаборатории на высоте $H = 3,5$ км. На основе свыше $N = 4200$ распределений I_{λ} , в двенадцати каналах блока БС, были посчитаны взаимные спектры (3) на 45-и пространственных частотах, представленные более чем 500-и распределений $f(\lambda)$.

Основная задача работы состояла в исследовании структурных особенностей взаимных спектров в целях изучения возможностей идентификации компонентного состава САП на основе измерений вариаций спектральной яркости восходящего излучения в широком диапазоне пространственных частот. Решение поставленной задачи осуществлялось как путем исследований всего набора взаимных спектров с привлечением статистического аппарата их обработки, так и анализа специально выбранных распределений $S_{\Omega}(\lambda_j, \lambda_i)$. При этом был использован следующий материал:

- статистические данные о частоте появления координат $P_{\Omega, \lambda}$ главных положительных экстремумов распределений $\text{Re}[S_{\Omega}(\lambda_j, \lambda_i)]$;
- характерные распределения $\text{Re}[S_{\Omega}(\lambda_j, \lambda_i)]$ для λ_j и λ_i , полученные по результатам статистического анализа.

Исследование структуры действительной составляющей взаимных спектров

Возможности дифференциации компонентов САП на основе взаимных спектров, непосредственно связаны с их структурными особенностями. Поэтому, в первую очередь были проведены исследования положений координат положительных экстремумов распределений $\text{Re}[S_{\Omega}(\lambda_j, \lambda_i)]$ в частотном пространстве λ, Ω . Результаты статистической обработки распределений приведены на рис.1, где по оси ординат отложены значения частоты появления экстремумов $P(\Omega, \lambda)$ для набора пространственных частот, соответствующего экстремумам распределений, изображенных на рис.2. Можно утверждать, что поле вариаций яркости в системе координат Ω, λ неоднородно и достаточно динамично. Взаимные спектры, главным образом, представлены двумя группами распределений, имеющими максимумы в области $\lambda = 485,5 - 570,4$ нм и на длине волны $\lambda = 880$ нм. На низких пространственных частотах для первой группы, их положение экстремумов изменчиво. Так максимум распределений $\text{Re}[S_{\Omega}(\lambda_j, \lambda_i)]$, который в интервале $\Omega = 0,38 - 1,56$ рад/км приходится на длину волны $\lambda = 485,5$ нм, на частоте $\Omega = 3,17$ рад/км смещается на $\lambda = 535,5$ нм, а по мере дальнейшего увеличения пространственной частоты занимает область центрированную около $\lambda = 570,4$ нм. Причина подобной изменчивости положения экстремумов, вероятно, связана с тем, что в этой области оптического диапазона, вариации яркости САП формируются набором различных факторов и явлений, при этом наблюдаемое положение экстремумов, определяется относительным их составом, в свою очередь, зависящим от пространственной частоты.

Что касается распределений второй группы, то можно сказать, что спектры с максимумом, приходящимся на область $\lambda = 880$ нм, наблюдаются не на всех пространственных частотах (на частотах $\Omega = 0,38$ и $1,56$ рад/км они отсутствуют).

Более полную картину о структурных особенностях поля вариаций восходящего излучения в различных интервалах оптического диапазона длин волн на рассматриваемых пространственных частотах можно получить при анализе, собственно, самих взаимных спектров

$\tilde{\text{Re}}[S_{\Omega}(\lambda_j, \lambda_i)] = \text{Re}[S_{\Omega}(\lambda_j, \lambda_i)] / \text{Re}[\bar{S}_{\Omega}(\lambda_j, \lambda_i)]$, для исключения зависимости от пространственной частоты нормированных на максимальные значения $\text{Re}[\bar{S}_{\Omega}(\lambda_j, \lambda_i)]$. Эти данные представлены на рис.

2. Из рисунка видно, что на область оптического диапазона $\lambda = 485,5 - 570,4$ нм приходится максимум вариаций яркости. Вместе с отмеченным выше изменением положения максимумов распределений, происходит и изменение их формы. Так на пространственных частотах $\Omega = 0,38 - 1,56$ рад/км. максимум спектральной плотности приходится на длину волны $485,5$ нм. По мере продвижения в область более высоких пространственных частот его форма деформируется во всем диапазоне длин волн оптического диапазона и характеризуется малыми значениями взаимной спектральной плотности в его длинноволновой области. При этом, на пространственной частоте $\Omega = 0,78$ рад/км спектральный ход ковариаций в этой области инвертирован по отношению к распределениям на остальных пространственных частотах. При $\Omega = 3,17$ рад/км, максимум спектральной плотности приходится на длину волны $\lambda = 535,5$ нм, со значениями взаимной спектральной плотности в длинноволновой области оптического диапазона практически равными

0. На высоких пространственных частотах $\Omega = 8,28-21,15$ рад/км распределения $\tilde{\text{Re}}[S_{\Omega}(\lambda_j, \lambda_i)]$ имеют максимумом на длине волны, центрированной около $\lambda = 570,4$ нм. Для этого типа взаимных спектров характерно увеличение отношения ковариаций в длинноволновой области оптического диапазона по отношению к его коротковолновой области по мере смещения в область высоких пространственных частот.

Второй тип действительной составляющей спектров $\text{Re}[\bar{S}_\Omega(\lambda_j, \lambda_i)]$, в соответствии с условиями эксперимента [3], в длинноволновой области оптического диапазона обусловлен эффектами отражения света от водной поверхности. Для него, в окнах прозрачности этой области длин волн, характерно монотонное увеличение вариаций с увеличением длины волны. По мере смещения в высокочастотную область пространственных частот имеет место относительное увеличение этого типа вариаций по отношению к первому. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что в интервале $\lambda = 415,6 - 620,6$ нм, этот тип распределений $\text{Re}[\bar{S}_\Omega(\lambda_j, \lambda_i)]$ весьма динамичен и существенно зависят от пространственной частоты. В то время, как на высоких пространственных частотах ($\Omega = 13,6$ и $21,15$ рад/км) их спектральный ход с точностью до коэффициента пропускания атмосферы определяется френелевским отражением от водной поверхности, на более низких частотах наблюдается существенная деформация взаимных спектров $\text{Re}[\bar{S}_\Omega(\lambda_j, \lambda_i)]$, которая на пространственной частоте $\Omega = 0,26$ рад/км сопровождается большими значениями взаимной спектральной плотности, а на пространственных частотах $0,78$ и $3,17$ рад/км их меньшими значениями, характеризующимися на частоте $\Omega = 0,78$ рад/км и отрицательными величинами.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования структурных особенностей взаимных спектров в реальных условиях наблюдений над водной поверхностью, демонстрируют существенную неоднородность вариаций в частотном пространстве λ, Ω , обусловленную как, собственно, неоднородностью реакции при взаимодействии с солнечным излучением отдельных компонентов САП, так и их разнообразием. Совокупность полученных результатов может служить предпосылкой для поиска путей по разработке методики идентификации компонентного состава САП на основе взаимных спектральных образов вариаций яркости восходящего излучения.

Литература

1. Малкевич М.С. Оптические исследования атмосферы со спутников // М.: Наука, 1973. 303 с.
2. Сушкевич Т.А. О решении задач атмосферной коррекции спутниковой информации // Исслед. Земли из космоса, 1999. №6. С. 42-59.
3. Бадаев В.В., Васильев Л.Н., Козлов Е.М., Мулдашев Т.З. О масштабной дифференциации компонентов системы “водная толща - поверхность - атмосфера” при дистанционном зондировании в видимой области спектра // Исслед. Земли из космоса, 2003. № 4. с.1-6.
4. Zimmermann G., Badaew W.W., Malkevich M.S., Piesik B. The MKS-M remote sensing experiment for determination of ocean and atmospheric parameters from SALUT-7 // Acta Astronautica, 1985. V. 12. No. 7/8. P. 475-483.
5. Козлов Е.М. Отчет по исследованиям взаимных спектров вариаций яркости восходящего излучения системы “водная толща-поверхность-атмосфера” в оптическом диапазоне длин волн по материалам международного многоуровневого эксперимента Карибе-88 // Москва: ИКИ РАН, 2005. 21 с.
6. Бадаев В.В., Городецкий А.К., Гречко Г.М. и др. Научная программа исследований атмосферы и земной поверхности по международному проекту “Космометрия” // Исслед. Земли из космоса, 1992. № 6. С. 91-97.
7. Бадаев В.В., Васильев Л.Н., Пелевин В.Н., Соломаха В.Л., Циммерманн Г. Определение концентрации хлорофилла фитопланктона в океане по измерениям с орбитальной станции МИР в эксперименте “Карибэ-88” // Исслед. Земли из космоса, 1991. №5. С. 47-55.