

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНОТИПНЫХ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОКЕАНА

Ермаков Д.М., Смирнов М.Т.

*Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязинское отделение,
141190, г. Фрязино, Московской обл., пл. Введенского, 1
E-mail: smirnov@ire.rssi.ru*

В данной работе предпринимается попытка систематизации возможных путей использования разнотипных данных в задачах дистанционного зондирования океана. В частности рассматриваются возможности совместного использования: данные дистанционного зондирования + информация качественного характера; Данные дистанционного зондирования + априорная информация о масштабах пространственной неоднородности изучаемых геофизических параметров; Оптические + СВЧ радиометрические изображения; и другие варианты. Основное внимание уделено исследованию возможностей совместного использования СВЧ радиометрических и оптических изображений, получаемых со спутников.

Введение

В настоящее время имеется множество работ посвященных совместной обработке данных различных приборов дистанционного зондирования (data fusion в англоязычной литературе). Как правило, data fusion относится к однотипным данным [1], т.е. данным однотипных приборов, но полученным в различное время, с разным пространственным разрешением и др.

В данной работе предпринимается попытка систематизации возможных путей использования разнотипной информации в задачах дистанционного зондирования океана. Под разнотипными данными при этом понимается следующее:

- данные приборов измеряющих характеристики излучения физические механизмы формирования которых различны;
- данные дистанционного зондирования и контактные измерения;
- данные дистанционного зондирования и априорная информация качественного характера.

С математической точки зрения это приводит к трудностям формализации целевой функции. Для каждого конкретного случая требуется индивидуальный подход.

Основное внимание уделено исследованию возможностей совместного использования оптических и СВЧ радиометрических изображений, получаемых со спутников.

Общая формулировка проблемы

Одной из основных задач дистанционного зондирования океана является определение значений геофизических параметров по измеренным значениям характеристик принятого излучения различными приборами. С математической точки зрения это решение обратной задачи путем минимизации целевой функции:

$$\|A\psi - u\|^2 = \min_{\psi} \quad (1)$$

где A – ограниченный оператор, переводящий пространство параметров в пространство измерений, u - вектор измеренных значений, ψ - вектор искомых параметров.

Оператор A включает в себя как аппаратную функцию прибора, так и радиационно-геофизическую модель, связывающую измеренные характеристики излучения и определяющие их значения геофизических параметров. Обычно аппаратную и модельную части стараются разделить, т.е. до восстановления параметров учесть искажающие влияния аппаратной функции, но не всегда это является целесообразным.

Особенности проблемы можно проиллюстрировать на тривиальном примере, когда задача допускает линеаризацию, т.е. оператор A превращается в матрицу линейных коэффициентов A . Для простоты ее можно представить в блочном виде, где блоки относятся к двум группам измеренных характеристик различными приборами:

$$A = \begin{pmatrix} \|A_1\| & \|C_1\| \\ \|C_2\| & \|A_2\| \end{pmatrix}$$

Если измеренные значения сигналов двух приборов полностью определяются различными параметрами (т.е. $|C_1| = |C_2| = |0|$), то задача распадается на две независимых

$$\|A_1 \psi_1 - u_1\|^2 = \min_{\psi}$$

$$\|A_2 \psi_2 - u_2\|^2 = \min_{\psi}$$

и общность может быть только в некоторых условиях налагаемых на искомые функции.

Полезная информация с точки зрения совместной обработки содержится как раз в «корреляционной» части, т.е. в матрицах C_1 и C_2 .

В то же время возникает ряд проблем:

- При увеличении числа параметров и слабой их взаимосвязи с измеренными сигналами, задача становится плохо обусловленной, т.е. малые погрешности измерений приводят к большим ошибкам оценки параметров.
- Наиболее устойчивые решения получаются при стремлении матрицы A к диагональному или ленточному виду.
- Простое объединение измерений в различных каналах может даже ухудшить точность определения геофизических параметров.

Далее рассматривается ряд частных случаев ранее изученных авторами.

Данные дистанционного зондирования + информация качественного характера

Для автоматизированной обработки спутниковых данных пригодна информация качественного характера, которая может быть формализована в виде неравенств или экстремума некоторой условной целевой функции.

$$\begin{cases} \|A\psi - u\|^2 = \min_{\psi} \\ \|u(\bar{x}, t_1) - u(\bar{x}, t_2)\| = \min \\ \bar{u}(s) = \min \end{cases}$$

где $u(\bar{x}, t_i)$ - значения измеренных сигналов в заданной точке \bar{x} в различное время, $\bar{u}(s)$ - среднее значение сигнала в заданной области s .

Примерами такого рода условий являются следующее:

- Минимум средней разности сигналов в областях пересечения траекторий спутника на разных витках;
- Минимум сигналов на границе таяния льдов Антарктиды в безоблачных условиях.

В работе [2] они применялись для:

- контроля качества калибровки данных и
- коррекция данных с целью исключить искажения, обусловленных аппаратной функцией прибора.

Анализ данных SSM/I показывает, что, не смотря на отсутствие опубликованных данных об этом, по видимому коррекция такого типа проведена, поскольку средняя разность значений радиоярких температур в областях пересечения траекторий практически равна нулю.

Данные дистанционного зондирования + априорная информация о масштабах пространственной неоднородности изучаемых геофизических параметров

В работе [3] был предложен метод учета априорной информации о масштабах пространственной неоднородности изучаемых геофизических параметров путем регуляризации решения с помощью сплайн аппроксимации.

Предполагается, что:

1. Имеются либо модельные уравнения, либо регрессионные соотношения, связывающие в каждой точке вектор искомых параметров ψ_x с вектором измеренных значений радиоярких температур u : $A\psi_x = u$
2. Ошибки \mathcal{E} измерений радиоярких температур, формируемых исследуемыми полями, имеют три независимые составляющие:
 - а. СВЧ радиометрические погрешности измерений радиоярких температур включая флуктуационные и калибровочные σ_T ;

б. Мелкомасштабные пространственные флуктуации σ_x ;

с. Изменения измеряемого поля за время обзора σ_t .

Величина σ_x может быть оценена по измерениям вдоль траекторий, а σ_t по вариациям измеренных сигналов в точках пересечений. Результирующие ошибки измерений в различных каналах не коррелированы и $\varepsilon^2 = \sigma_T^2 + \sigma_x^2 + \sigma_t^2$.

3. Исследуемые поля геофизических параметров имеют известные дисперсии естественных вариаций σ_p и различные масштабы пространственной изменчивости, соотношение которых известно. Время обзора согласовано с масштабами временной и пространственной изменчивости исследуемого поля.

В этом случае решение ищется в виде аппроксимирующей сплайн-функции ψ , являющейся решением уравнения с регуляризирующим слагаемым:

$$\|A\psi - u\|^2 + \alpha \|L\psi\|^2 = \min_{\psi} \quad (2)$$

где A – линейный ограниченный оператор, переводящий пространство параметров в пространство измерений, u – измеренные значения, L – линейный ограниченный регуляризирующий оператор, α – параметр сглаживания.

В качестве нормы первого члена (2) наиболее естественно использовать взвешенную евклидову норму. При этом соотношение ошибок ε_k измерений в различных каналах может быть учтено путем использования их в качестве весовых коэффициентов

$$\|A\psi - u\|^2 = \left\| \begin{array}{c} \left(\sum_{i=1}^m a_{1i}\psi_i - u_1 \right) / \varepsilon_1 \\ \dots\dots\dots \\ \left(\sum_{i=1}^m a_{mi}\psi_i - u_m \right) / \varepsilon_m \end{array} \right\|^2$$

где ψ_i – двумерная сплайн-функция i параметра, u_k радиояркостные температуры, измеренные в k канале, a_{ki} – линейные операторы при i параметре для канала k (в точках измерений – это модельные функции A).

Поскольку априорно предполагается только гладкость искомым функций, то в качестве регуляризирующего оператора L целесообразно использовать дифференциальный оператор производных D :

$$\|L\psi\|^2 = \left\| \sum_{i=1}^m \gamma_i D(\psi_i / \sigma_i) \right\|^2$$

Основным достоинством данного метода является возможность получения двумерной функции искомым геофизических параметров с заданными характеристиками гладкости по результатам измерений, полученным на произвольной, в общем случае нерегулярной, пространственной сетке.

СВЧ радиометрические + оптические изображения

Основная особенность данной проблемы состоит в том, что наряду с существенно различным пространственным разрешением оптических и СВЧ радиометрических приборов, физические механизмы формирования принимаемых полей излучения в оптическом и СВЧ диапазонах принципиально отличны. В оптическом диапазоне это главным образом отраженное от поверхности океана излучение Солнца, а в СВЧ – собственное излучение поверхности океана. В обоих случаях атмосфера является мешающим фактором, но механизм ее влияния так же различен.

Для поиска путей формализации совместной целевой функции был выполнен цикл работ по анализу взаимосвязи полей излучения, измеряемых оптическими и СВЧ радиометрическими сканерами.

В первую очередь был проведен статистический анализ взаимосвязи характеристик излучения в различных каналах совмещенных изображений приборов SeaWiFS и SSM/I [5]. Было показано, что коэффициент корреляции между значениями сигналов оптического и СВЧ радиометрического приборов для открытого океана, как правило, не превышает 0,3. Этот результат свидетельствует о том, что простой статистический подход к решению задачи совместного определения геофизических параметров океана по оптическим и СВЧ радиометрическим изображениям не эффективен без понимания физических механизмов формирования общих факторов, определяющих особенности исследуемых полей.

Для анализа физических механизмов формирования общих факторов в полях оптических и СВЧ радиометрических изображений использовались данные наземных экспериментов [4, 6]. Для обработки использовались цветные фотографии моря, выполненные в надир с высоты 3 - 5 м над уровнем моря и зависимости радиоярких температур системы океан-атмосфера от зенитного угла наблюдения на двух поляризациях.

По фотографиям рассчитывались пространственные спектры флуктуаций яркости морской поверхности, наблюдаемой на трех оптических длинах волн соответствующих основным цветовым каналам снимков R, G, B. На основе теоретических результатов [7] и дополнительного рассмотрения было показано, что эти спектры могут быть удовлетворительно аппроксимированы в высокочастотной области значений зависимостью вида:

$$G(\lambda, k) \approx A_\lambda k^{\gamma(\lambda)}$$

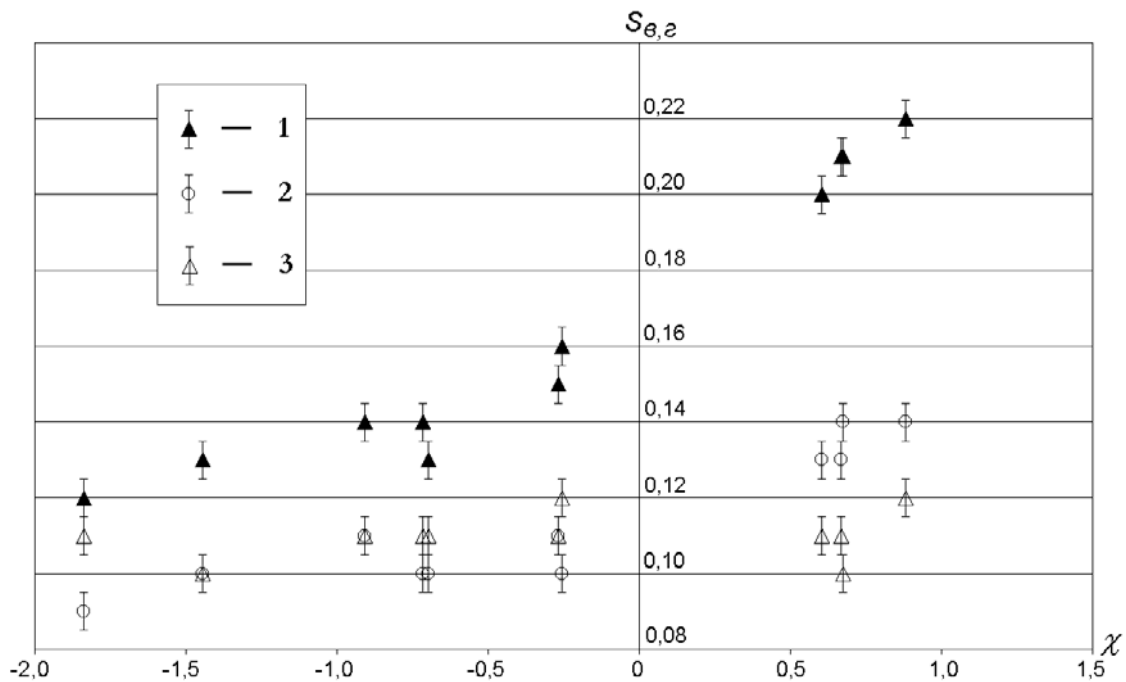
где k – волновое число морской волны на поверхности, A_λ – величина, зависящая от оптических свойств водной толщи, γ – параметр аппроксимации, $G(\lambda, k)$ – аппроксимируемый спектр. Для характеристики влияния морского волнения на оптические снимки был предложен “трехволновой оптический параметр” χ , вычисляемый по оценкам параметра аппроксимации $\gamma(\lambda)$ на трех оптических длинах волн соответствующих каналам R, G, B:

$$\chi = \frac{\gamma(R) - \gamma(G)}{\gamma(G) - \gamma(B)}$$

Для численной характеристики углового хода кривых экспериментально измеренных радиоярких температур системы атмосфера – морская поверхность использовался безразмерный параметр крутизны S :

$$S_{\theta, z} = (T(\theta_1) - T(\theta_2)) / T(\theta_3)$$

На рисунке приведены экспериментальные данные обработки серии экспериментальных данных. Группы точек 1, 2 и 3 соответствуют синхронным СВЧ радиометрическим измерениям: 1) на длине волны 3 мм, вертикальной поляризации излучения; 2) – 8 мм, горизонтальной поляризации; 3) – 8 мм, вертикальной поляризации.



Полученные результаты показали в частности, что имеется взаимосвязь характеристик излучения в оптическом и СВЧ диапазонах, которая может быть объяснена влиянием гравитационно-капиллярного волнения.

Выводы и перспективы

Область применимости рассмотренных в данной работе методов использования разнотипной информации можно представить в следующем виде:

<i>Основные данные</i>	<i>Дополнительная информация</i>	<i>Область применения</i>
СВЧ радиометрические данные	Информация качественного характера	Коррекция аппаратных искажений
СВЧ радиометрические данные	Априорная информация о масштабах пространственной неоднородности изучаемых геофизических параметров	Регуляризация решения обратной задачи
СВЧ радиометрические изображения	Оптические изображения	Расширение количества определяемых параметров и точности их определения

Для совместной обработки оптических и СВЧ радиометрических данных необходимо построение единой радиационной модели на основе анализа физических механизмов формирования соответствующих полей излучения и выявления общих факторов, влияющих на эти поля.

После построения такой модели перспективным представляется подход, основанный на использовании сплайн-аппроксимации, описанный выше. При этом имеется возможность работать на регулярной сетке, соответствующей пространственному разрешению оптики, но использовать весовые коэффициенты (параметры гладкости) в зависимости от определяемого параметра.

Литература

1. *Din-Chang Tseng, Yi-Ling Chen, and Michael S. C. Liu. Wavelet-based Multispectral Image Fusion// IGARSS 2001*
2. *Выставкин А.Н., Кутуза Б.Г., Обухов Ю.В., Смирнов М.Т., Терентьев Е.Б. Синтез изображений геофизических полей по трассовым СВЧ-радиометрическим спутниковым измерениям// Иссл. Земли из космоса, 1989. №4. С. 91-98*
3. *Лобанова Е.Н., Смирнов М.Т. Использование сплайн-аппроксимации для синтеза полей геофизических параметров Земли по спутниковым СВЧ радиометрическим многоканальным измерениям// Иссл. Земли из космоса, 1992. №4, С. 40-47*
4. *Трохимовский Ю.Г., Кузьмин А.В., и др. Исследования радиояркостной температуры взволнованной поверхности моря в эксперименте "Геленджик'99"// Исслед. Земли из космоса, 2002. №3. С.20-28.*
5. *Ермаков Д.М., Смирнов М.Т. Проблемы совмещения данных спутниковых оптических и СВЧ сканеров для их комплексного анализа// Исследование Земли из космоса, 2001. № 2. С. 45-54*
6. *Ермаков Д.М., Смирнов М.Т. Натурные исследования взволнованной морской поверхности совместными оптическими и СВЧ-радиометрическими методами// Радиотехника и электроника, 2004. №4, С. 431 – 438*
7. *Лучинин А.Г. Об интерпретации спектров аэрофотографий морской поверхности// Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1984. Т. 20. № 3. С. 331-334.*