

Применение многочастичного фильтра Калмана и модели растительности PROSAIL к обработке данных гиперспектрального дистанционного зондирования

Б.М. Балтер¹, В.В. Егоров¹, А.П. Калинин², И.П. Родионова³, М.В. Стальная¹

¹Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mail:victor_egorov@mail.ru

²Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН
119526 Москва, пр-кт Вернадского 101, корп. 1

³Институт химической физики им. Н.Н.Семенова РАН
119991 Москва, ул.Косыгина, 4

Исследуются возможности использования многочастичного фильтра Калмана (МФК) в процедурах параметризации и адаптации модели спектра растительности PROSAIL применительно к дистанционному гиперспектральному зондированию посевов зерновых культур, а также для оценки величины листового индекса (LAI). Показано, что для работы с моделью PROSAIL, позволяющей рассчитывать спектр восходящего от посева излучения в диапазоне 0.4-2.5 мкм как функцию 18 параметров: размеров и ориентации листьев, структуры растительного слоя, почвы и условий освещения растительного полога МФК может обходиться без ее производных, т.е. функционировать в нелинейном векторном режиме. При этом в расчетах реально используются 1-4 подгоняемых параметра модели, остальные фиксируются. В результате средняя точность предсказания спектра посевов зерновых культур (озимая пшеница) составила 2%, а абсолютная точность определения величины листового индекса – 0.2.

Ключевые слова: многочастичный фильтр Калмана, модель PROSAIL, гиперспектрометр, дистанционное зондирование, зерновая культура, рассеяние, разрешение, листовой индекс.

Введение

Широкое внедрение гиперспектрального дистанционного зондирования (ГДЗ) в практику сдерживается отсутствием эффективных методов обработки получаемых данных. В свою очередь, корректность обработки данных ГДЗ напрямую зависит от качества моделей связи значений спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) или спектральных коэффициентов яркости (СКЯ) с параметрами зондируемого объекта и, в частности, с параметрами растительных ценозов. Модели, предлагаемые в работах [1-3], представляются сегодня достаточно грубыми, не обеспечивающими достаточной точности решения прямых и обратных задач дистанционного зондирования (ДЗ) Земли. Аналогичная ситуация наблюдается и в СВЧ-диапазоне.

В последние годы были разработаны новые, хотя и более сложные модели расчета СПЭЯ (СКЯ) (<http://teledetection.ipgp.jussieu.fr/prosail/>) и удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) [4], обеспечивающие повышенную точность решения прямых и обратных задач ДЗ. Внедрение этих моделей, в частности, модели PROSAIL (<http://teledetection.ipgp.jussieu.fr/prosail/>) в практику ДЗ растительности предполагает проведение исследований по ее параметризации и адаптации к условиям зондируемой территории и к самому объекту, что и явилось одной из целей настоящей работы. Для этого необходимо было получение адекватного экспериментального материала – результата съемок посевов сельскохозяйственных культур на тестовом полигоне как дистанционных, так и *in situ*. Такие съемки проводились в период с 1997 г. по 2003 г. в ходе эксперимента

SHAC на полигоне Barton Bendish в юго-восточной части Англии авторами работы [2], материалы которого и были нами использованы. Для тестирования адаптированной модели PROSAIL были выполнены также работы по решению обратных задач ДЗ – определению величины индекса листовой поверхности (LAI) для полей озимой пшеницы, расположенных на указанном полигоне. Для выполнения процедур параметризации и адаптации модели PROSAIL, а также оценки LAI по данным гиперспектральной съемки был использован алгоритм МФК, описанный в [5].

Итак, целью работы является отработка методики решения прямых и обратных задач ГДЗ посевов зерновых культур (озимая пшеница) с использованием модели PROSAIL и многочастичного фильтра Калмана.

Используемые экспериментальные материалы

Самолетная съемка сельскохозяйственного полигона Barton Bendish проводилась в июне-июле 2000 г. в ясную солнечную погоду с помощью гиперспектрометра НуМар (Австралия) и радара с синтезированной апертурой E-SAR (Германия) [2] с высоты 3000м, поэтому влияние атмосферы на полученные результаты не учитывалось. Кроме того, было получено изображение территории полигона с ИСЗ Landsat за 30 июня 2000 г.

Гиперспектрометр НуМар (Австралия) имел следующие основные характеристики: разрешение – 4.4 м x 4.4 м., число спектральных каналов – 126, в диапазоне 0.4 – 2.5 мкм, отношение мощности полезного сигнала к мощности шума > 100, угловое поле зрения прибора $\pm 15^0$ относительно надира.

Радиолокатор E-SAR работал на трех длинах волн – 23.0 см, 5.3 см и 3.12 см с использованием двух основных и одной перекрестной поляризации. Углы визирования от 20^0 до 70^0 , линейное разрешение на поверхности 2 м.

Синхронно и квазисинхронно с самолетными съемками на восьми полях посевов озимой пшеницы проводились измерения *in situ* таких параметров растений, как индекс листовой поверхности (LAI), влажность почвы, влажность листьев, ориентация листьев (a_LIDF – угол наклона листа и b_LIDF – параметр, характеризующий двугорбость распределения наклона листьев). Значения указанных параметров усреднялись в пределах каждого из восьми полей.

Методика исследования

Данная работа является продолжением исследований по совместной обработке данных гиперспектрального и радиолокационного дистанционного зондирования [3]. Для соединения этих разнотипных данных применялся фильтр Калмана, с помощью которого оба типа данных подгонялись под единую модель объекта (зерновые культуры, основными параметрами модели которых были индекс площади листьев LAI и влажность почвы). Ниже фильтр Калмана используется для параметризации и адаптации модели связи наблюдаемых гиперспектральных данных с параметрами состояния посева озимой пшеницы, а также для оценки некоторых параметров растительности и почвы.

Многочастичный фильтр Калмана

МФК, разработанный в последние годы [5], является эффективным инструментом обработки временных рядов данных, представляющих собой нелинейные и/или нестационарные процессы. Известно, что эффективность функционирования фильтра Калмана сильно зависит от качества «статической» модели, описывающей связь наблюдений с оцениваемыми параметрами. В классическом (в том числе расширенном) фильтре Калмана [6] такая модель должна быть линеаризуема. Для этого ее следует задавать в виде формул, от которых можно брать производные. Однако современные, наиболее точные модели связи наблюдений с оцениваемыми параметрами растительности обычно имеют неаналитический вид: это алгоритмы и программы, каковой и является модель PROSAIL. Для того чтобы работать с такой моделью в работе используется многочастичный фильтр Калмана, который обходится без производных (рис. 1).

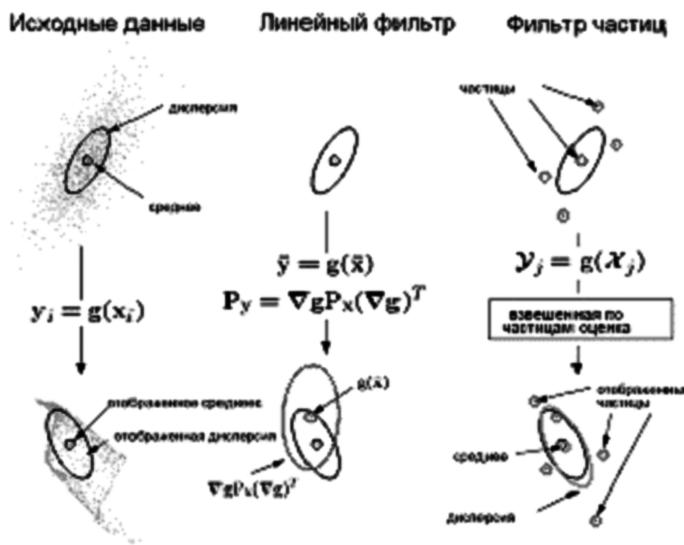


Рис. 1. Схемы преобразований данных классическим (линейным) и многочастичным фильтрами.

Здесь ∇ - оператор набла, P_x и P_y , соответственно, ковариационные матрицы x и y ,
 T – знак транспонирования

На рис. 1 в левой вертикальной колонке дан пример нелинейного преобразования гауссового двумерного распределения исходных данных, показанных «облаком» точек, (x_i – i -ых параметров состояния растительности в y_i – значение спектральной яркости) в распределение наблюдаемых значений яркости y_i . Видно (в нижней части колонки), что в результате такого преобразования характер распределения меняется и, естественно, далек от исходного, хотя и здесь можно ввести свои понятия среднего и дисперсии (среднеквадратичного отклонения). В средней колонке показана процедура применения линейного фильтра Калмана для оценки параметра x (среднее значение) по средним значениям наблюдений y , которые по-прежнему связаны друг с другом нелинейной зависимостью. Нетрудно заметить, что линейный фильтр дает совершенно иное распределение на своем выходе чем, то, которое имеет место в левой колонке. И, наконец, в правой колонке приведен пример применения МФК к процедуре оценки исходного параметра x_j . Несмотря на сохранение нелинейной связи $y_j = g(x_j)$ между x_j и y_j , характер распределения последнего качественно не меняется и остается близким к гауссовому.

Параметризация и адаптация модели PROSAIL

На основе данных дистанционного зондирования проводилась подгонка параметров модели PROSAIL с целью получения расчетных спектров, близких измеряемым *in situ*. Критерием качества подгонки являлся минимум невязки указанных спектров. Для реализации этой процедуры нами использовался алгоритм МФК [5], с помощью которого гиперспектральные и радарные данные подгоняются под единую модель объекта, описываемую набором параметров растительности. При этом в отличие от работы [3] здесь фильтр Калмана работает с гиперспектральными данными, а радарные данные служат начальным приближением. Конечная цель – чтобы оба типа данных работали «в тандеме».

Использованный вариант модели PROSAIL рассчитывает спектр растительности в диапазоне 0.4-2.5 мкм как функцию большого числа (до 18) параметров листа, растительного слоя, почвы и освещения (см. таблицу).

Таблица. Структура и параметры модели PROSAIL

<i>Параметры модели листа (PROSPECT)</i>	<i>Параметры модели растительного полога (SAIL)</i>	<i>Параметры почвы</i>
N-число слоев структуры C _{ab} -содержание хлорофилла C _c -содержание целлюлозы C _p -содержание белка	θ _s -зенитный угол солнца θ _v -зенитный угол визирования Φ- фазовый угол (солнце-объект-сенсор) Спектр прямого освещения Спектр диффузного освещения Q-параметр hot-spot a_LIDF-угол наклона листа b_LIDF-двугорбость наклона LAI-индекс площади листьев	Тип почвы W _s - влажность

С помощью фильтра Калмана реально подгонялись не более четырех параметров, а для остальных параметров фиксировались правдоподобные значения.

Оценка параметров посевов озимой пшеницы (индекс листовой поверхности, влажность почвы) по данным гиперспектральной съемки осуществлялась двумя методами:

1. на основе использования алгоритма МФК и параметризованной и адаптированной по методике изложенной в программе PROSAIL (<http://teledetection.ipgp.jussieu.fr/prosail/>);
2. по спектральному индексу MTVI2 [3, 7].

Первый из названных методов соответствует реализации байесовского правила с получением квазиоптимальной оценки искомого параметра.

Полученные результаты и их обсуждение

Чувствительность модели PROSAIL к вариациям ее параметров и качество подгонки

Для оценки чувствительности модели к изменению параметров листьев и растительного полога посева озимой пшеницы были проведены расчеты СКЯ, в которых одна часть параметров фиксировалась, принимая наиболее вероятные значения из априорных данных, а другая варьировалась. Результаты расчетов приведены на рис. 2 и 3. Параметр a_LIDF, изменяющийся от - 0.9 до + 0.9, характеризует структуру распределения угловой вертикальной ориентации листьев растений. Большим значениям параметра соответствует

ориентация листьев близкая к горизонтальной, меньшим – более вертикальная. При этом в области средних значений этого параметра в распределении происходит возникновение дополнительного экстремума, соответствующего углу ориентации в 70^0 . Другой параметр – b_{LIDF} характеризует степень двугорбости распределения угла наклона листьев. Здесь большему значению параметра соответствует распределение, в котором дополнительный экстремум в области 70^0 выражен в минимальной степени.

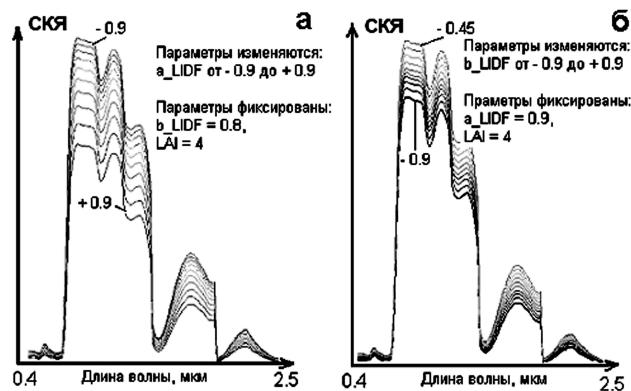


Рис. 2. Влияние параметров распределения угла наклона листьев: а – при изменении угла наклона листа от горизонтального к практически вертикальному; б – при изменении структуры распределения, от обладающего сильно выраженным дополнительным экстремумом $b_{LIDF} = -0.9$ к распределению с минимальным экстремумом в области 70^0

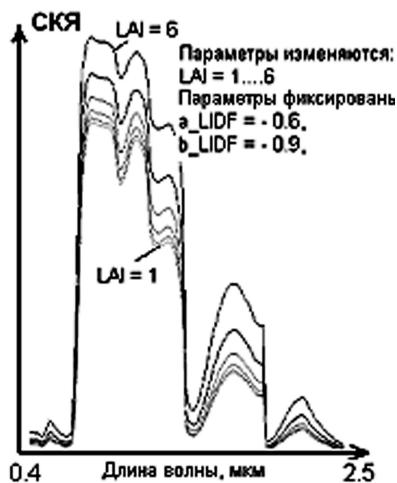


Рис. 3. Влияние параметров растительного полога (LAI) на величину СКЯ

На рис. 4 даны графики измеренных значений СКЯ для участков нетронутого посева и посева, на котором имелась колея от прошедшего транспорта. Эти графики, в свою очередь, характеризуют чувствительность спектра, восходящего от посева излучения к нарушению его геометрической структуры и, возможно, к изменению отражательных свойств листьев растений за счет их увядания.

Из графиков, приведенных на рис. 2 видно, что характер распределения наклона листьев (рис. 2а) сильно влияет на величину СКЯ. Как и следовало ожидать, растения с пологой ориентацией листьев обладают большим рассеянием световых волн, чем те, что имеют вертикальное распределение. Поведение же графиков при изменении параметра b_{LIDF} (рис. 2б) – немонотонно из-за возникновения эффекта “hot spot” на листьях, ориентация которых соответствует области дополнительного экстремума.



Рис. 4. Демонстрация степени чувствительности спектра растительного полога к нарушению его геометрической структуры. Различие в величинах LAI составляет около 0.5 в пересчете на пиксель размером 4 x 4 м²

Оценки LAI, содержания воды в листе и других параметров растительности при фиксированных характеристиках почвы

На первом этапе состояние почвы фиксировалось и фильтром Калмана подгонялись LAI, влажность листа и средний угол ориентации листа – по отдельности и в разных комбинациях (рис. 5). Анализ результатов подгонки позволяет сделать вывод, что точностные характеристики оценок параметров посева зависят от набора подгоняемых параметров. Истинное поле значений параметров нам было неизвестно. Наиболее адекватной интегральной характеристикой точности в этих условиях может служить средняя точность предсказания спектра. В частности, для достижения точности оценки LAI порядка 0.5 требуемая точность подгонки спектра должна быть не хуже 2%. Как показали результаты анализа такая точность в наиболее успешных случаях подгонки была достигнута.



Рис. 5. Результаты подгонки расчетного спектра (по модели PROSAIL) к спектру измеренному in situ

На последующем этапе в отсутствие данных об истинном поле влажности почвы ее значения приближенно оценивались по ее картографическому рисунку влажности, в том числе путем сравнения его с космическими снимками высокого разрешения после уборки урожая. С помощью алгоритма МФК путем подгонки модельных спектров к спектрам, измеренным с помощью самолетного гиперспектрометра НуМар, были построены поля значений LAI посевов озимой пшеницы, которые сравнивались с аналогичными полями, полученными по измерениям *in situ* (см. рис. 6).

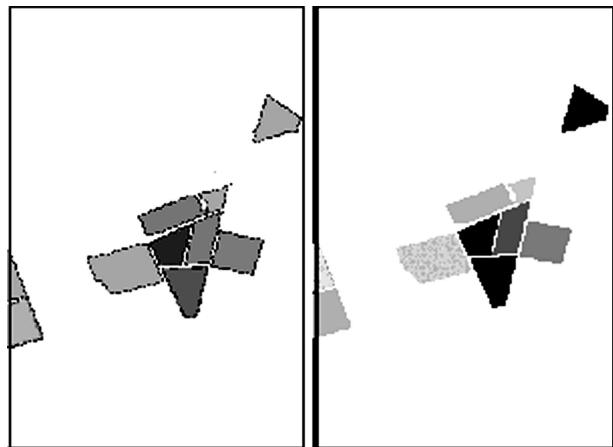


Рис. 6. Сравнение результатов оценки LAI, полученных по гиперспектральным данным (а), с результатами полевых измерений (б)

Анализ результатов, показанных на рис. 6а и 6б по 7 полям показал, что абсолютная невязка значений LAI, вычисленных по гиперспектральным данным и по полевым измерениям, составляет в среднем по всем полям величину 0.2, что является достаточно хорошим результатом.

Сравнение результатов восстановления поля LAI фильтром Калмана и расчета по спектральным индексам

На рис. 7 приводится сравнение карт LAI, полученных по гиперспектральным данным с помощью фильтра Калмана и традиционным способом – по так называемым спектральным индексам. В нашем случае использовались спектральный индекс MTVI2 и методика оценки по нему поля LAI [3, 7].

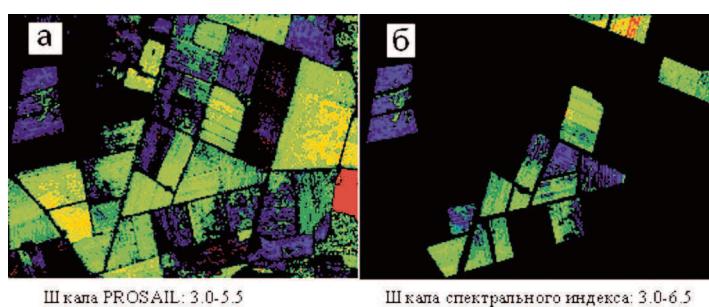


Рис. 7. Результаты сравнения оценки LAI с помощью МФК и модели PROSAIL (а) с оценкой, полученной по спектральным индексам (б)

Как уже отмечалось выше абсолютная невязка значений LAI, вычисленных с помощью МФК и модели PROSAIL и показанная на рис.7а составляет в среднем по всем полям величину 0.2. Проведенные аналогичные оценки по спектральным индексам (рис.7б) дали значение порядка 0.5. Так что, очевидно, что алгоритм оптимальной оценки, реализуемый фильтром Калмана, обеспечивает более высокую точность, чем тот, что использует методику расчета LAI по спектральному индексу. Это связано с тем, что при вычислении LAI в первом случае фильтром Калмана используется информация, извлекаемая из всего спектра регистрируемого гиперспектрометром, в то время как во втором случае принимается во внимание информация лишь трех спектральных каналов [3]

Выводы

1. Применение модели PROSAIL и многочастичного фильтра Калмана в процедурах обработки данных гиперспектрального авиационного зондирования посевов озимой пшеницы обеспечивает получение достаточно хорошего совпадения результатов оценки LAI с данными наземных измерений (0.2).
2. Восстанавливаемые с помощью МФК пространственные структуры полей LAI качественно примерно те же, что получаются по вегетационному индексу MTVI2, но точнее количественно.
3. Метод оценки параметров растительности по данным гиперспектральной съемки растительности требует ручной настройки фильтра Калмана.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского агентства по науке и инновациям.

Литература

1. Нильсон Т., Кууск А. Приближенные аналитические формулы для расчета коэффициентов спектральной яркости сельскохозяйственной растительности // Исслед. Земли из космоса. 1984. № 5. С. 76-83.
2. Saatchi P., Lewis P., Disney M., Thackrah G. Comparison of HyMap/E-SAR data with models for optical reflectance and microwave scattering from vegetation canopies // Proc. Int. Symp. Retrieval of Bio- and Geophysical parameters from SAR data for Land Applications. Sheffield Sept. 2001 (ESA SP-475, Jan. 2000).
3. Б.М.Балтер, В.В.Егоров, А.П.Калинин и др. Принципы совместной обработки данных гиперспектрального и радиолокационного зондирования сельскохозяйственных угодий. Препринт ИКИ РАН № 2152. 2009. 26 с.
4. Oh Yisok, Hong Jin-Young, Lee Sung-Hwa. A simple microwave backscattering model for vegetation canopies // J. of the Korea electromagnetic engineering soc. 2005. V. 5. № 4. P. 183-188.
5. S.J. Julier, J.K. Uhlmann. Unscented filtering and nonlinear estimation. // Proc. IEEE, 2004. V. 92. № 3. P. 401- 422.
6. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems// Trans. ASME Ser. D, 1960, vol. 8, P. 35-45.
7. Gilabert M.A., García-Haro F.J., Meliá J. A Mixture modeling approach to estimate vegetation parameters for heterogeneous canopies in remote sensing // Rem. Sens. of Env. 2000. V.72. P. 328-345.

Using multyparticle Kalman filter and PROSAIL vegetation model for remote hyperspectral sensing data processing

B.M. Balter¹, V.V. Egorov¹, A.P. Kalinin², I.P. Rodionova⁴, M.V. Stalnaya¹

¹*Space Research Institute PAS,
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str
E-mail:victor_egorov@mail.ru.*

²*A. Ishlinsky Institite for Problems in Mechanics RAS
119526 Moscow, 101 Vernadskogo prosp.*

³*N. Semenov Institute of Chemical Physics RAS
119991 Moscow, 4 Kosigina str.*

Using multyparticle Kalman filter for procedure of parameterization and adaptation PROSAIL vegetation model for remote hyperspectral sensing data processing of cereal crops seeds and estimation of leaf area index (LAI) is investigated. PROSAIL model which allows to calculate emitted seeds radiation in 0.4-2.5 μ range is function of 18 parameters (dimensions, leaf orientation, soil structure, intensity of illumination and so on). It was shown that multyparticle Kalman filter can do without that function derivatives (to operate in nonlinear vector mode). In such computation up to 4 fitting model parameters are used. As the results of such computations averaged prediction accuracy of cereal crops seeds spectra amounts to 2% and absolute LAI precision estimation is equal approximately 0.2.

Keywords: multyparticle Kalman filter, hyperspectrometer, remote sensing, cereal crops seeds, scattering, resolution, leaf area index.