

Методика и предварительные результаты совместной обработки данных гиперспектрального и радиолокационного зондирования посевов сельскохозяйственных культур

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

¹*Институт космических исследований РАН*

E-mail: victor_egorov@mail.ru

²*Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН*

E-mail: kalinin@ipmnet.ru

³*Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН*

E-mail: irodionov@reagent-rdc.ru

Рассматриваются вопросы совместной обработки данных авиационного гиперспектрального и радиолокационного зондирования полей озимой пшеницы, а также данных измерений *in situ*. Дается описание полуэмпирических моделей коэффициента спектральной яркости (КСЯ) и удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) для указанной культуры. Проводится сравнение результатов, предсказанных на основе предложенных моделей, и данных наземных измерений КСЯ и УЭПР. Для оценки текущих значений индекса листовой поверхности (LAI) и параметров модели УЭПР озимой пшеницы используется формализм фильтрации Калмана.

Ключевые слова: гиперспектрометр, радар с синтезированной апертурой, коэффициент спектральной яркости, удельная эффективная площадь рассеяния, индекса листовой поверхности, фильтр Калмана.

Введение

Проблемы обработки данных гиперспектрального (ГС) и радиолокационного (РЛ) дистанционного зондирования (ДЗ) природных и природно-антропогенных объектов земной поверхности, каковыми, в частности, являются поля сельскохозяйственных угодий, по-прежнему, остаются актуальными и далеки от окончательного решения. Для повышения эффективности оценки состояния сельскохозяйственных культур по данным ДЗ требуется привлечение независимых измерений интенсивности восходящего от этих культур излучения в различных спектральных диапазонах. Поэтому большой интерес представляет проблема одновременного зондирования объектов в оптическом и радио диапазонах и их совместная обработка. Однако такие совместные съемки проводились лишь в единичных случаях. В частности, имеется уникальный эксперимент на полигоне Barton Bendish (Англия) [1, 2], в котором проведены авиационные ГС- и РЛ-измерения, сопровождаемые наземными наблюдениями (*in situ*). Отметим, что эффективность такой обработки во многом зависит от того, насколько правильно выбраны модели [3-5], связывающие измеряемые значения спектральной плотности яркости или коэффициента спектральной яркости (КСЯ) и удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) зондируемых объектов (в нашем случае – посевов озимой пшеницы) с параметрами их состояния или, иначе, с предметно-специфическими характеристиками (ПСХ). Кроме того, крайне важной проблемой в процедуре совместной обработки значений КСЯ и УЭПР представляется задача обеспечения близости результатов, получаемых по этим двум типам данных в ходе решения обратной задачи. В работе эта проблема решается с помощью алгоритма фильтрации Калмана [6].

Целью настоящей работы является описание методики совместной обработки данных авиационного гиперспектрального и радиолокационного зондирования и измерений *in situ*,

полученных в эксперименте, а также демонстрация некоторых результатов такой обработки на примере оценки значений листового индекса посевов озимой пшеницы.

Выбор модели УЭПР

В литературе описано несколько моделей УЭПР растительности [3, 7-9]. Здесь целесообразно остановиться на сравнительно простой версии, предложенной в статье [4], которая, однако, требует дополнительной параметризации, по тем или иным причинам не конкретизированной в указанной работе. Кроме того, авторы этой работы утверждают (и, наверное, справедливо), что к изменению состояния растительного покрова наиболее чувствительны электромагнитные волны мм- и см-диапазонов. Действительно, для более длинных волн, например, дециметрового диапазона, растительный полог оказывается практически прозрачным, и потому изменение его параметров, например, L , слабо сказывается на величине УЭПР. Поскольку в эксперименте Barton Bendish использовался радар с синтезированной апертурой (РСА) E-SAR с длинами волн 3,12 см (X-диапазон), 5,3 см (C-диапазон) и 23.0 см, то далее, в основном, рассматривались два первых, а данные дециметрового диапазона привлекались лишь для коррекции модели УЭПР см-диапазона. Съемка полей озимой пшеницы, как уже было сказано выше, проводилась с высоты 3000 м, размер пиксела радиолокационного изображения составлял 4 м x 2 м.

Для модельного описания процесса рассеяния радиоволн пологом пшеницы использовалось модифицированное выражение для УЭПР, приведенное в [4], которое имеет следующий вид:

$$\sigma^0 = 10 \log \left[aL^\nu (1 - e^{-bL}) + Se^{-bL} \right] \quad (1)$$

где a - множитель, характеризующий рассеяние волн в растительном пологе, т.е. он представляет собой УЭПР собственно растительности; b - множитель, ответственный за затухание волн в растительности; $\nu = 0$ или 1 - коэффициент, определяемый типом растительности, (например, для кукурузы и сорго эта величина может быть принята равной 0, а для пшеницы и ячменя равной 1); S - УЭПР почвы.

Для определения величин a и S , были проведены соответствующие расчеты по формулам, приведенным в работах [4, 8, 9]. При этом, из-за отсутствия экспериментальных и модельных данных об УЭПР верхнего слоя растительного покрова, делалось допущение о его непрерывности, которое является не вполне справедливым. Поэтому значения a подвергались процедуре коррекции, путем подгонки величин УЭПР, рассчитанных по формуле (1), к экспериментальным значениям с помощью метода наименьших квадратов. В результате были получены следующие соотношения:

$$a = 0.013, S = 0.01 \text{ – для X-диапазона,}$$

$$a = 0.015, S = 0.03 \text{ – для C-диапазона.}$$

Для расчета погонного показателя затухания $b = k\alpha$ использовалось предположение о том, что показатель поглощения α прямо пропорционален тангенсу угла потерь $tg\delta$ и частоте зондирующего сигнала f или обратно пропорционален длине волны λ [10]. Таким образом, $\alpha = tg\delta/\lambda$. Для абсолютной привязки значения b , т.е. определения масштабного коэффициента k , пришлось воспользоваться данными эксперимента, описанного в работе [4]. В результате было найдено, что $k = 0,0078$. Величина $tg\delta$ определялась исходя из приведенной в [1] модельной зависимости.

По аналогии с предыдущим разделом для модели КСЯ проведем сравнение значений УЭПР для посевов озимой пшеницы, полученных в ходе экспериментальной самолетной радиолокационной съемки и по модельной зависимости – формула (1). На рис. 2 приведены графики модельной зависимости УЭПР для X и C диапазонов (сплошные линии) от величины листового индекса L с нанесенными на рисунке данными экспериментальных значений (черные и белые квадратики).

Модифицированная модель УЭПР (1) в целом удовлетворительно описывает зависимость σ^0 от величины листового индекса и других параметров [5].

Из графика на рис. 2 видно, что зависимость УЭПР от L также имеет вид, близкий к линейному, что, по-видимому, связано с использованием достаточно узкого интервала изменений L . Как показывает практика измерений *in situ*, характер зависимости σ^0 от L достаточно сложный [4]. При малых значениях L (от 0 до 2) зависимость УЭПР от этого параметра имеет вид линейной функции. При средних величинах L (от 2 до 4) наблюдается заметное снижение скорости роста σ^0 с увеличением листового индекса и, наконец, при $L > 5$ рост величины σ^0 практически прекращается.

Методика итерационной коррекции моделей

Как уже было сказано во Введении, одним из необходимых условий корректной тематической обработки обоих типов данных ДЗ (гиперспектральных и радиолокационных) является близость результатов обращения рассматриваемых моделей. Однако уже первые оценки L , полученные по данным КСЯ и УЭПР по одним и тем же полям озимой пшеницы как результат обращения двух типов моделей, показали, что их значения сильно различаются.

Очевидно, что параметры исходной модели (1) должны быть подвергнуты тщательной коррекции, для того, чтобы минимизировать выявившуюся «невязку» результатов. Рассмотрим вначале процедуру коррекции, основанную на привлечении попиксельных данных о L , рассчитанных по результатам гиперспектрального зондирования полей озимой пшеницы.

Алгоритм коррекции, использующий гиперспектральные данные

Одной из причин невязки явилась «бедность» статистики дистанционных наблюдений пшеницы (всего семь полей) и использование средних по полю значений L , полученных при наземных измерениях. В связи с этим возникает задача повышения достоверности модели УЭПР за счет привлечения дополнительных значений L , получаемых в виде оценок по данным дистанционных наблюдений. Изложение методики коррекции указанных моделей целесообразно начать с уточнения зависимости УЭПР от величины L путем использования попиксельных оценок листового индекса, найденных по данным гиперспектральных измерений.

Методика коррекции модели УЭПР, подробное описание которой приводится в [11], состоит в следующем. На основе данных гиперспектральной съемки полей пшеницы вычисляются значения различных спектральных индексов (NDVI, MTVI2 и др.)

$$NDVI = (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670}), \quad (2)$$

$$MTVI2 = \frac{1.5[1.2(R_{800} - R_{550}) - 2.5(R_{670} - R_{550})]}{\sqrt{(2R_{800} + 1)^2 - (6R_{800} - 5\sqrt{R_{670}}) - 0.5}}, \quad (3)$$

где R_{800} , R_{670} и R_{550} - соответственно, значения КСЯ для длин волн 800, 670 и 550 нм.

Затем в соответствии с графиками и аналитическим выражением, приведенным в [12], описывающими связь этих индексов с величинами L , производится оценка последнего для каждого пиксела выбранного поля. После этого каждая попиксельная оценка L соотносится со значением УЭПР для того же пиксела радиолокационного изображения X - и C -диапазонов. Полученные величины σ^0 наносятся на график зависимости УЭПР от L , аналогичный приведенному на рис. 1.

В соответствии с изложенными выше методическими указаниями были рассчитаны массивы точек σ^0 для двух частотных диапазонов (X и C), на которые наносились функции линейной регрессии и линии, ограничивающие пределы стандартного отклонения. Анализ Разброс значений УЭПР относительно регрессионной прямой оказался значительно больше, чем на рис. 1, в связи с тем, что они

относятся к данным для всех полей озимой пшеницы, а не семи, как было ранее. Ясно, что условия развития озимой пшеницы на разных полях могли сильно отличаться друг от друга из-за возможных изменений рельефа, пространственных вариаций влажности почвы и используемой агротехники. Указанный разброс привел также к значительному уменьшению коэффициентов детерминации.

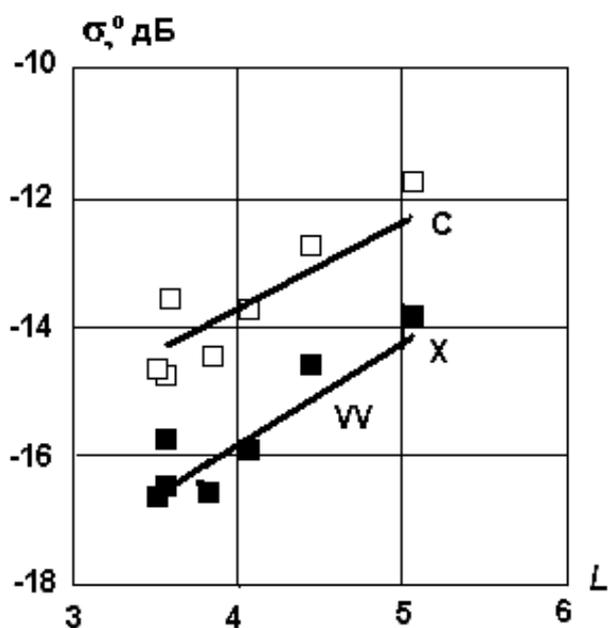


Рис. 1. Зависимость величины УЭПР от листового индекса L . Сплошные линии – результат расчета по модели, квадратики – экспериментальные значения. C и X – диапазоны длин волн. VV – вертикальная поляризация на передачу и прием

Причины снижения достоверности модели (1) относительно измерительных данных, помимо их неоднородности, следующие:

- коэффициенты модели связи ГС- и РЛ-наблюдений с состоянием растительного покрова (L) мало известны и зависят от многих факторов;
- прямые измерения L недостаточно репрезентативны для использования в связке с ГС- и РЛ-данными из-за редкой пространственной выборки и сдвига во времени моментов съемки;

Итак, можно констатировать, что привлечение дополнительных попиксельных оценок L по данным ГС-измерений не приводит к повышению достоверности модели УЭПР. Необходимо использовать всю имеющуюся информацию о связи L с величинами КСЯ и УЭПР, которая, кроме данных X и C -диапазонов, содержится в данных 23 см-диапазона и других поляризацій, полученных при РЛ-зондировании полей пшеницы.

Алгоритм коррекции модели УЭПР с привлечением измерительных данных по всем частотам и поляризациям

Сказанное выше указывает на необходимость изменения исходных параметров моделей для минимизации «невязки» оценок L , получаемых по данным гиперспектральной и радиолокационной съемки. С этой целью была разработана методика коррекции моделей КСЯ и УЭПР, основанная на процедуре взаимной привязки данных гиперспектрометра и радара с синтезированной апертурой (РСА) и использовании формализма фильтрации Калмана [6]. Эта методика была апробирована на примере уточнения модели УЭПР [11].

При вычислении невязки полагалось, что оценки L , получаемые по модели КСЯ, близки к истинным значениям этого параметра. Это косвенно подтверждается вычислениями значений L по вегетационному индексу MTVI2, рассчитываемому по данным авиационных гиперспектральных измерений для каждого пиксела на изображении полей. Число таких попиксельных оценок велико (несколько сотен по каждому полю озимой пшеницы).

Для решения задачи минимизации невязки гиперспектральной и радиолокационной оценок L был разработан и апробирован дуальный фильтр Калмана для двух приборов. Использование дуального фильтра Калмана для обучения коэффициентам модели УЭПР проводилось в несколько последовательных этапов. На первом из них осуществлялось обучение модели по данным прямых (*in situ*) измерений значений индекса листовой поверхности L для двух X - и C -диапазонов РСА и вертикальной поляризации, т.е. XVV и CVV . Величина невязки при этом оказалось довольно большой, что явно неприемлемо с точки зрения признания оцененных на этом этапе коэффициентов (a и S) модели (1) достоверными. Несмотря на то, что невязка по S имела тенденцию к снижению, ее

абсолютная величина оставалась большой. Кроме того, невязка по параметру a не уменьшалась с увеличением числа итераций и продолжала оставаться значительной.

Следующим шагом минимизации невязки было использование коррекции модели УЭПР (РСА) путем уточнения коэффициентов a , b и S за счет увеличением числа оценок L по значениям вегетационного индекса MTVI2, полученным из данных авиационного гиперспектрального зондирования одного из выбранных полей озимой пшеницы. При этом значения УЭПР определялись для тех же пикселей, по которым вычислялись вегетационные индексы MTVI2.

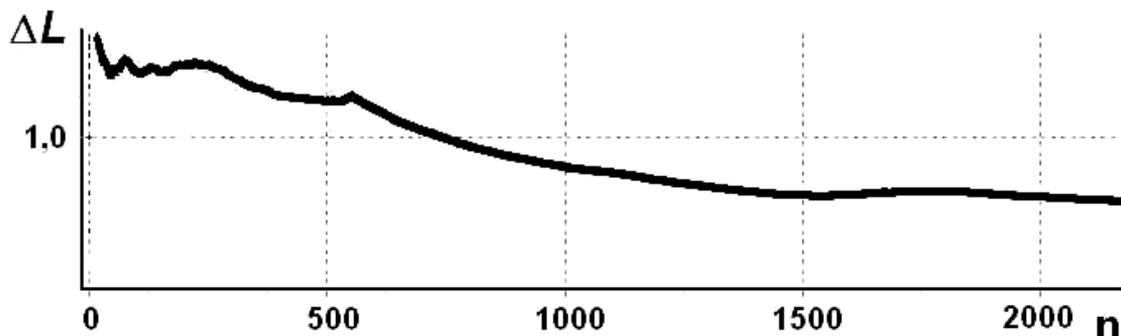


Рис. 2. Средняя невязка ΔL оценок L , полученных по данным ГС- и РСА-зондирования. Обучение коэффициентам модели РСА по ГС-оценкам L . Все диапазоны (X , C , L) и обе поляризации. Все поля озимой пшеницы

Из результатов этого шага следует, что обучение модели УЭПР коэффициентам a и b на основе ГС-оценок L по вегетационным индексам недостаточно точно (относительно малое сближение кривых невязки предсказания и наблюдения).

Далее проводилось обучение модели УЭПР относительно коэффициента затухания b для трех диапазонов волн РСА (X , C и 23-см). Поляризация на прием и передачу вертикальная. Для этих коэффициентов b достигалось устойчивое значение, мало зависящее от параметров обработки и соответствующее теории.

Наконец, оценивались величины L по ГС-измерениям и по данным РСА, а также изучался ход невязки ΔL оценок L между предсказанием и измерениями, полученных по радарным и гиперспектральным данным. Оценки значений L по данным РСА получены после обучения модели УЭПР относительно шести ее коэффициентов на основе гиперспектральных данных о листовом индексе. Видно, что, несмотря на сходимость невязки (кривая 3) наблюдений и предсказаний на вертикальной XVV и горизонтальной XHH поляризациях, в целом, оценки L по данным ГС и РСА сходятся плохо.

Что касается хода коэффициентов b для поляризации XVV и для XHH , то они не сходятся друг к другу при увеличении числа итераций n , хотя по теории должны примерно совпадать. Проблемы плохой сходимости возникли из-за того, что в отличие от обучения модели УЭПР по трем диапазонам длин волн обучение по данным двух поляризаций X – диапазона менее эффективно, из-за меньшей информативности поляризационных данных по сравнению со спектральными, а также из-за перехода ко всем полям, параметры состояния которых сильно варьировали.

На рис. 2 приведены зависимости средней невязки ΔL оценок L , полученных по данным гиперспектрального и радиолокационного зондирования от числа итерационных циклов фильтра Калмана n .

Кривая невязки значений L , определенных по данным ГС и РСА сходится к удовлетворительному значению ($\sim 0,5$). Эти результаты получены после обучения модели (1) относительно двадцати одного коэффициента модели УЭПР по ГС-оценкам L и последующего решения обратных задач по данным ГС и РСА.

При привлечении всего материала наблюдений РСА, наконец, получено согласие оценок L по данным ГС и РСА. Коэффициенты обученной модели сходятся к своим устойчивым значениям и имеют физически осмысленные величины.

Выводы

1. Показана возможность связать данные ГС и РСА через модели наблюдений, основанные на их зависимости от значений листового индекса L .

2. Используемые в работе модели качественно верно характеризуют зависимость УЭПР от значений L , параметров поглощения излучения в растительном пологе и отражательных свойств верхнего яруса растительности и почвы.

3. Подход с использованием фильтра Калмана позволяет обучиться по данным наблюдений тем коэффициентам модели, априорная информация о которых недостаточно точна.

4. В качестве начального приближения в режиме обучения вместо ограниченного числа (семь) наземных измерений листового индекса были использованы оценки L , объемом в несколько тысяч. Эти оценки были получены по результатам расчета вегетационных индексов (MTVI2, NDVI) с использованием данных гиперспектрального зондирования полей пшеницы и модели связи этих индексов со значениями L .

5. Разработанный метод коррекции моделей УЭПР работает только при достаточной размерности вектора наблюдений (все используемые диапазоны и поляризации РСА).

6. Следующий этап – «обратная итерация»: использование полученных по данным РСА результатов для обучения модели ГС. Такая итерационная процедура и есть предлагаемый инструмент совместной обработки данных дистанционных гиперспектральных и радиолокационных измерений.

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

Литература

1. Saich 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).

2. Lewis P. Three-dimensional plant modelling for remote sensing simulation studies using the Botanical Plant Modelling System // Agronomie: Agriculture and Environment. 1999 V.19, No.3-4. P.185-210.

3. Ulaby F.T., Allen G.T., Eger G. III., Kanemasu E. Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index // Rem. Sens. of Env. 1984. V.14. P. 113-133.

4. Балтер Б.М., Егоров В.В., Калинин А.П. и др. Модели коэффициента спектральной яркости и удельной эффективной площади рассеяния посевов зерновых культур: выбор и адаптация к данным эксперимента. Препринт №888. М.: ИПМ РАН. 2008. 17 с.

5. Нильсон Т, Кууск А. Приближенные аналитические формулы для расчета коэффициентов спектральной яркости сельскохозяйственной растительности // Исслед. Земли из космоса. 1984. № 5. С. 76-83.

6. Балтер Б.М., Егоров В.В., Калинин А.П. и др. Исследование применимости фильтра Калмана для обработки данных гиперспектрального и радиолокационного аэрокосмического зондирования Земли. Препринт № 844. М.: ИПМех РАН. 2007. 16 с.

7. 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.

8. Ulaby F.T., Sarabandi K., McDonald K. et al. Michigan microwave canopy model // Int. J. Remote Sensing. 1990. V.11. № 7. P. 1223-1253.

9. Karam M.A., Fung A.K., Lang R.H., Chauhan N.S. A microwave scattering model for layered vegetation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1992. V.30. № 4. P. 767-784.
10. Noon D.A. Stepped-Frequency Radar Design and Signal Processing Enhances Ground Penetrating Radar Performance // A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) of The University of Queensland, 1996. 181 pp.
11. Балтер Б.М., Егоров В.В., Калинин А.П. и др. Принципы совместной обработки данных гиперспектрального и радиолокационного зондирования сельскохозяйственных угодий. Препринт – 2152 ИКИ РАН, 2009. 27 с.
12. 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.

Methods and preliminary results of coprocessing hyperspectral and radar data for agriculture seeds

B.M. Balter¹, V.V. Egorov¹, A.P. Kalinin², I.P. Rodionova³, M.V. Stalnaya¹

¹ Space Research Institute RAS

² A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS

³ N.Semenov Institute of Chemical Physics RAS

The problems of coprocessing aviation hyperspectral and radar data as well as *in situ* measurements for winter wheat are considered. The semi-empirical models for spectral reflectance coefficient (SRC) and differential cross-sections (DCS) of winter wheat are given. The comparison of results predicted for proposed CSR and DCS models and *in situ* data are carried out. Kalman filter formalism for the assessment of the leaf area index (LAI) current values and DCS model parameters of winter wheat are used.

Keywords: hyperspectrometer, synthetic aperture radar, spectral reflectance coefficient, differential cross-sections, leaf area index, Kalman filter.