

Оценивание состояния посевов и почвенной среды по данным дистанционного зондирования

Assessment of plantings and soil medium state according to remote sensing data

Ключевые слова: дистанционное зондирование – remote sensing; параметры отражения – reflection parameters; состояние посевов – crop state; почвенная среда – soil environment; математические модели – mathematical models; информативность – informativity.

Впервые рассматриваются теоретические основы оценивания состояния посевов и почвенной среды по данным спутникового дистанционного зондирования. Предварительно оценивается информативность оптических каналов по отношению к каждому оцениваемому параметру состояния, на базе которой синтезируется оптимальная структура мультиспектральной зондирующей станции. Основой для формирования оценок являются математические модели мультиспектральных измерений и динамики оцениваемых параметров состояний растений и почвенной среды.

The theoretical foundations for state evaluation of plantings and the soil medium according to spaceborne remote sensing data are described for the first time ever. A preliminary assessment for optical channel data content is given for each evaluated state parameter. The results of this assessment are then used to synthesize the optimum structure of a multispectral sensing station. These assessments are based on the math model framework for multispectral measurement and the evaluated parameter dynamics for plantings and the soil medium.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее актуальных направлений использования спутниковых данных дистанционного зондирования (ДДЗ) является мониторинг состояния посевов и почвенного покрова. Эта информация позволит успешно решать такие важнейшие народнохозяйственные задачи как прогнозирование конечного результата (урожая) сельскохозяйственных

МИХАЙЛЕНКО / MIKHAILENKO I.

Илья Михайлович

(ilya.mihailenko@yandex.ru)

доктор технических наук.

ГНУ Агрофизический НИИ Россельхозакадемии, заместитель директора по научной работе.

г. Санкт-Петербург

культур, обнаружение чрезвычайных ситуаций на полях, оценивание плодородия и степени деградации почв, учет, инвентаризацию и классификацию сельхозугодий с одновременным формированием специальных крупномасштабных сельскохозяйственных планов и карт. В оперативном плане типичными задачами являются: обеспечение текущего контроля состояния посевов сельскохозяйственных культур; предварительное прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур; мониторинг темпов уборки урожая одновременно по территориям крупных регионов; определение емкости пастбищ различных типов и продуктивности сенокосов. Все это позволяет реализовать эффективное управление отраслью АПК на районном, региональном и федеральном уровнях.

В настоящее время стало привычным решение большинства вышеуказанных задач на основе специальных технологий дешифрирования снимков, получаемых систематическими повторными съемками, которые обеспечивают наблюдение за динамикой развития сельскохозяйственных культур и прогнозирование урожайности. Используя при дешифрировании различия в спектральных яркостях растительности в течение вегетационного периода и индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), можно по тону изображения полей судить об их агротехническом состоянии. Существенным недостатком таких методов можно считать то, что дешифрирование физических элементов ландшафта идет путем распознавания изучаемых объектов по фототону, цвету, геометрическим размерам и другим особенностям изображения. При этом значительное число природных процессов не находит прямого отображения на снимках. Поэтому для дешифровки и адекватного анализа космического снимка и, тем более, составления прогнозов и рекомендаций требуются

высококвалифицированные специалисты, имеющиеся далеко не в каждом хозяйстве. Использование других индексов и оптических показателей (критериев) не меняет сути дела, так как здесь просто используются другие комбинации спектральных каналов без изменения методической основы. В результате в настоящее время сложилась ситуация, когда при высоком уровне космической техники мы не имеем эффективных автоматизированных систем обработки данных дистанционного зондирования и достоверной информации о состоянии посевов и почвенного покрова.

Основной причиной такого положения является отсутствие обоснованного научного подхода к данной проблеме. Так сам термин «дешифровка» космических снимков не является строго научным и не отвечает смыслу решаемых задач. Это отмечали ряд авторов, характеризуя исходную информационную ситуацию как косвенное наблюдение или измерение состояния земной поверхности, когда вместо конкретных параметров состояния посевов и почвенного покрова мы располагаем только некоторыми связанными с ними оптическими показателями отражения. Однако и для такого подхода не были поставлены и решены задачи получения достоверной информации о состоянии посевов и почвенного покрова.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАДАЧ ОЦЕНИВАНИЯ

Современная информационная теория характеризует задачу восстановления информации о состоянии системы по косвенным наблюдениям, как оптимальное оценивание. Причем для случая восстановления континуальной информации это оптимальное оценивание параметров состояния, в случае конечного счетного множества состояний, как оптимальную классификацию, иногда рассматриваемую как распознавание образов.

На рис. 1 представлена концептуальная схема задач оценивания состояния посевов и почвенного покрова по информации спутниковой системы ДДЗ. Выделим основные особенности решаемых задач. Во-первых, мы имеем дело с замкнутой системой «приземный слой атмосферы – растительный покров – почвенный покров». Все эти составляющие системы должны рассматриваться как единый комплекс, чем собственно и будет достигаться достаточная точность и надежность оценивания. Во-вторых, мы имеем два принципиально различных режима оценивания, в пределах тестового полигона, где мы располагаем дополнительными наземными измерениями, и в пределах обслуживаемого региона, где мы можем располагать только информацией системы ДДЗ. Кроме того, мы предполагаем, что система ДДЗ оборудована многоканальной оптической системой (муль-

тиспектральной станцией – МСС), и мы должны выбрать наиболее эффективные для решения задач оценивания каналы (Беларусь).

На рис. 2 приведена информационно-алгоритмическая схема оценивания состояния посевов и почвенного покрова, имеющая универсальный характер как для тестового полигона, так и для обслуживаемого региона.

Из приведенной схемы видно, что оптимальное оценивание состояния посевов и почвенного покрова представляет собой специальные процедуры обработки апостериорной информации от космических средств ДДЗ и априорной информации, формируемой динамическими математическими моделями. При этом для функционирования самих моделей используются те же ДДЗ-измерения, выступающие как факторы, влияющие на состояния посевов и почвенной среды.

На рис. 3 выделены особенности процедуры оценивания в пределах тестового полигона. Здесь за счет сопоставительных наземных измерений и данных ДДЗ идентифицируются математические модели как измерителя ДДЗ, так и динамики состояния посевов и почвенной среды. Без наличия таких моделей реализация процедур оценивания невозможна ни в пределах тестового полигона, ни на территории обслуживаемого региона.

ВЫБОР СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ДДЗ

Выбор структуры системы ДДЗ связан с определением состава используемой спектральной информации, т.е. с выбором наиболее информативных каналов и волнового состава этих каналов. Здесь сразу же нужно учитывать наличие возможных технических ограничений, связанных с использованием конкретных спектрометрических приборных средств. В том случае, когда нам необходимо использовать уже эксплуатируемую техническую платформу и возможный набор каналов уже обозначен, нам остается исследовать их информативность относительно каждого измеряемого состояния. Результатом такого исследования станет «сортировка» каждого канала по каждому состоянию.

В тех случаях, когда мы планируем применение собственных технических средств, исследуется весь оптический спектр, предварительно разделенный на ограниченное число каналов. После чего анализируется информативность каждого из них относительно каждого измеряемого состояния. Завершается исследование закреплением наиболее информативных каналов за конкретным измеряемым состоянием. После выбора наиболее информативных каналов выполняются повторные измерительные эксперименты, число которых опре-

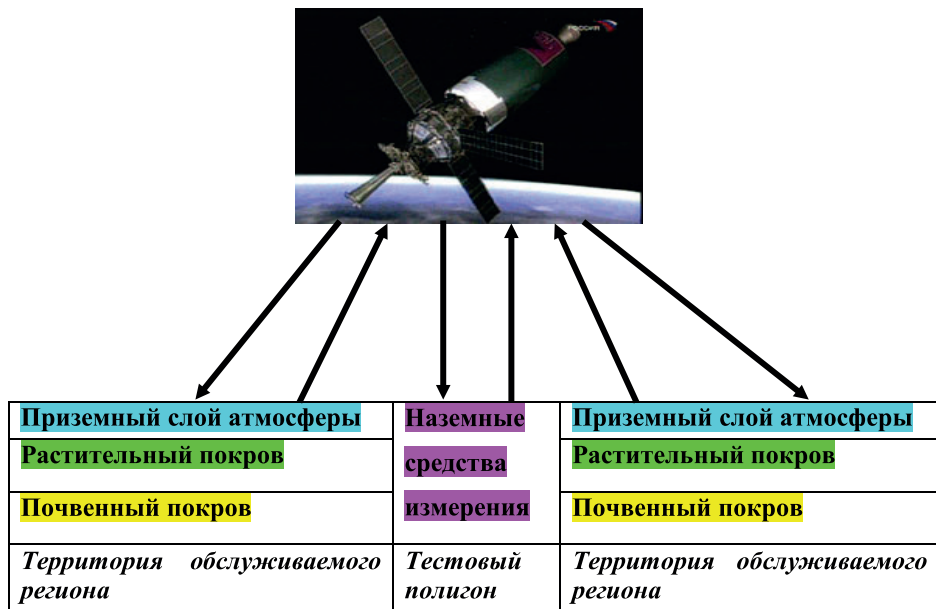


Рис.1. Концептуальная схема оценивания состояния посевов и почвенного покрова



Рис. 2. Информационно-алгоритмическая схема оценивания состояния посевов

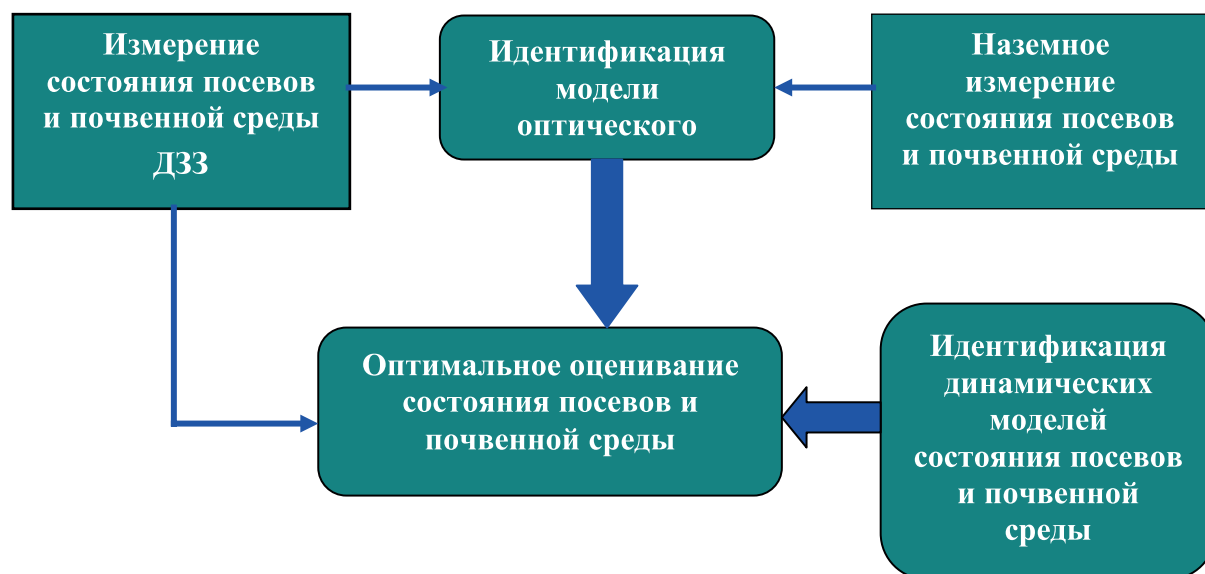


Рис. 3. Особенности задач оценивания на тестовых полигонах

деляется требованиями точности и надежности получаемых оценок состояния. Таким образом, центральным местом выбора структуры измерительной системы ДДЗ является анализ информативности спектрального диапазона (канала).

Выбор метода исследования информативности используемого канала и длин волн внутри него во многом определяется способом дальнейшей обработки информации при получении оценок состояния. Для этого нам необходимо проанализировать информационную ситуацию, в которой в реальных условиях будет производиться эта обработка. Изначально следует иметь в виду, что вся априорная информация о состоянии системы «почва – растения – приземный слой атмосферы» содержится в динамических моделях параметров состояния, счетных состояний – в моделях смены фаз (структур) и наступления других подобных случайных событий. Для облегчения дальнейших рассуждений введем следующие обозначения и определения:

X – вектор параметров состояния посевов, компонентами которого являются: плотность биомассы на единицу площади, кг/м²; влажность биомассы, %; доля товарной части, % и др. подобные величины;

G – вектор параметров состояния почвенной среды, компонентами которого являются: плотность, кг/м³; влагосодержание, кг/м³; содержание гумуса, %, содержание элементов питания, мг/кг;

Y – вектор, компонентами которого являются

показатели отражения на заданном спектральном участке (канале);

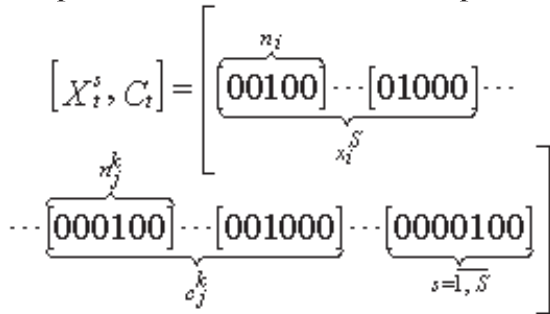
S – вектор счетных состояний посева или почвенной среды, отражающий структурные превращения (фенофазы), чрезвычайные ситуации (болезни, нарушения и повреждения), рассматриваемые как случайные события.

Введем в рассмотрение частные функции правдоподобия, которыми являются условные функции плотности вероятностей j -го сигнала отражения в k -м канале (спектральном поддиапазоне) относительно i -го состояния $\omega(c_j^k|x_i)$ и s -го счетного состояния $\omega(S^k|s_i)$.

Прежде чем перейти к построению оценок информативности и алгоритмов обработки экспериментальной информации, приведем эту задачу к единой алгоритмической основе. Для этого разобьем область существования каждого из компонента вектора состояний x_i на малые интервалы Δx_i , число которых для каждого состояния будет составлять $n_i = 1, N_i$. Таким же образом поступим и с показателями отражения c_j^k , область существования которых разобьем на $n_j^k = 1, N_j^k$ интервалов.

Попадания состояний и показателей отражения в отдельные интервалы будут записываться в базу данных (БД) числом 1, а отсутствие – числом 0. Это позволяет, обрабатывая БД, получать требуемые условные и безусловные частоты, принимаемые в качестве оценок распределения вероятностей, а на их основе строить оценки информативности каналов.

Вся бинарная информация о состоянии, структурах и показателях отражения должна заноситься в БД посредством специального кодирования



где $t = \overline{1, T}$ – номера записей в БД, которые могут совпадать с моментами времени.

Бинарные векторы, отражающие всю информацию, на примере состояния посевов удобно записывать в свернутом виде, например

$$[X_t^s, C_t] = [1, 8, 23, 50, 67, 95, 150],$$

где общее число позиций в векторе равно максимальному числу позиций, занимаемых единицами в бинарных векторах, а номера в списке обозначают места единиц в бинарных векторах.

В результате обработки БД вычисляются предварительные статистические характеристики: безусловные частоты n_j^k -х градаций параметров отражения

$$f(n_j^k) = \frac{T(n_j^k)}{T}, \quad (1)$$

безусловные частоты n_i -х градаций состояний

$$f(n_i) = \frac{T(n_i)}{T}, \quad (2)$$

условные частоты появления n_j^k -х градаций параметров отражения относительно каждой n_i -й градации состояния

$$f(n_j^k | n_i) = \frac{T(n_j^k | n_i)}{T(n_i)}, \quad (3)$$

условные частоты появления n_j^k -х градаций параметров отражения относительно каждой l -й структуры

$$f(n_j^k | n_l) = \frac{T(n_j^k | n_l)}{T_s}, \quad (4)$$

безусловные частоты появления каждой l -й структуры

$$f_s = \frac{T_s}{T}. \quad (5)$$

В выражениях для расчетов частот приняты обозначения: T – общее число записей в БД, используемой для решения конкретной задачи; $T(n_i)$ – число случаев попадания состояний в соответствующий интервал; $T(n_j^k | n_i)$ – число случаев попадания выбранного параметра отражения в соответствующий интервал, при условии, что состояние находилось в заданном интервале; $T(n_j^k | s)$ – число случаев попадания выбранного параметра отражения в соответствующий интервал для заданной структуры; T_s – число случаев, когда система находилась в одном из выбранных структурных состояний.

На основании этих статистических характеристик возможно построение оценок вероятностных распределений и любых показателей информативности измерительных каналов. При этом необходимо отметить, что выбранный показатель информативности должен обеспечить всему измерительному комплексу свойства избирательности по отношению и к измеряемым состояниям системы «почва – растения – атмосфера», и к распознаваемым счетным состояниям (структурным изменениям). С точки зрения байесовского подхода измерение должно максимально увеличивать наши апостериорные знания по отношению к априорной информации. Таким требованиям удовлетворяет следующий показатель информативности для отдельного j -го спектрального диапазона k -го канала относительно i -го состояния

$$e(c_j^k | i) = \left| \frac{[f(n_j^k | n_i) f(n_i) - f(n_j^k | n_{i+1}) f(n_{i+1})] - [f(n_i) - f(n_{i+1})]}{\sum_{n_{i+1}}^{N_i} f(n_j^k | n_{i+1}) f(n_{i+1})} \right| 100\% \quad (6)$$

и для отдельного j -го спектрального диапазона k -го канала для $(s+1)$ -го относительно s -го счетного состояния:

$$e(c_j^k | s) = \left| \frac{[f(n_j^k | s) f_s - f(n_j^k | s+1) f_{s+1}] - [f_s - f_{s+1}]}{\sum_{s+1}^S f(n_j^k | s+1) f_{s+1}} \right| 100\% \quad (7)$$

ГЕОИНФОРМАТИКА

Для неинформативных спектральных диапазонов показатели (6), (7) равны нулю и возрастают по мере их информативности. По этим локальным показателям строятся следующие интегральные оценки информативности: отдельного k -го канала по отношению к i -му состоянию системы почва – растения

$$E(k, i) = \sum_{j=1}^{J_k} e(c_j^k | i), \quad (8)$$

отдельного k -го канала по отношению ко всем распознаваемым счетным состояниям

$$E(k, S) = \sum_{j=1}^{J_k} \sum_{s=1}^S e(c_j^k | S). \quad (9)$$

Для удобства использования конкретных спектральных диапазонов и каналов в алгоритмах оценивания состояний системы «почва – растения – атмосфера» и распознавания счетных состояний все показатели информативности (6–9) ранжируются по своей величине отдельно для каждого канала, и в состав измерительной системы включаются каналы, обладающие максимальной информативностью. В результате такого отбора из полного вектора оптических сигналов Y формируются три комбинированных подвектора: Y_X – измерения состояния посевов; Y_G – измерения состояния почвенной среды; Y_S – измерения счетных состояний. При этом эти подвекторы могут иметь общие компоненты, так как многие показатели отражения одновременно связаны с состоянием и почвы, и растений.

При использовании существующей измерительной платформы анализ информативности измерительных комплексов для отдельных элементов системы «почва – растение – атмосфера» непосредственно сопрягается с моделями самих измерений. Так для почвенной среды вполне применимы линейные модели следующего вида

$$Y_G = HG + E, \quad (10)$$

где Y_G – реально используемый вектор оптических показателей состояния почвенной среды, компонентами которого являются параметры отражения на различных оптических диапазонах, G – вектор измеряемых состояний почвенной среды; H – матрица параметров, оцениваемых по экспериментальным данным; E – вектор случайных ошибок измерения оптических показателей, с нулевым математическим ожиданием и матрицей ковариаций R .

Для модели измерения (10) условная совместная плотность вероятности вектора оптических показателей относительно измеряемых состояний (условная функция правдоподобия) имеет следующий вид

$$f(Y|G, H) = (2\pi)^{-1} |R|^{-1/2} \exp\{-(Y - H^T G)^T R^{-1} (Y - H^T G)\}. \quad (11)$$

Большинство параметров состояния почвенной среды являются независимыми и их априорные плотности распределения определяются следующим образом

$$f(g_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{(g_i - m_{g_i})^2}{\sigma_i^2}\right), \quad (12)$$

$i=1, 2, 3, \dots, I$ – индексы компонентов и общая размерность вектора параметров состояния почвенной среды G .

Апостериорная (после измерения) совместная плотность распределения параметров состояния почвенной среды

$$f(G | Y_G, H) = \frac{f(Y_G | G, H) \cdot \prod_{i=1}^I f(g_i)}{I(g, w)},$$

$$I(G) = \int_{\Omega_G} f(Y_G | G, H) \cdot \prod_{i=1}^I f(g_i) dg_i. \quad (13)$$

Критерий информативности измерений, показывающий насколько оптически измерения увеличивают апостериорную информацию состояний, по сравнению с априорной информацией

$$I(Y_G | G, H) = \int_{\Omega_G} \left[\frac{f(G | Y, H) - \prod_{i=1}^I f(g_i)}{\prod_{i=1}^I f(g_i)} \right] dg_i * 100\%. \quad (14)$$

ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ И ПОЧВЕННОЙ СРЕДЫ

Оценка измеряемого состояния почвенной среды для модели (10) определяется следующим образом [4]

$$\hat{G}(t) = M_G(t) + [HR^{-1}H^T + R^{-1}J^{-1}HR^{-1}[Y_G(t) - H^T \hat{G}(t)]] \quad (15)$$

где $M_G(t)$ – вектор математических ожиданий состояния.

Для получения искомым оценок (15) возможно несколько способов задания математического ожидания состояния $M_G(t)$:

- 1) вычисление по модели динамики измеряемого состояния;
- 2) задание постоянного среднего значения;
- 3) использование асимптотической оценки

$$\widehat{G}(t) = [R^{-1/2} H^T]^{-1} R^{-1/2} Y_G(t) \quad (16)$$

Методику оценки информативности оптических каналов ДДЗ для посевов рассмотрим на примере многолетних трав, состояние которых описывается динамической моделью [5],

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1i} \\ \dot{x}_{2i} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t)_{1i} \\ x(t)_{2i} \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \\ f_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_1(t) \\ \zeta_2(t) \end{bmatrix} \\ t \in (0, T), x_{1i}(0) &= x_{1i,0}, x_{2i}(0) = x_{2i,0}, \end{aligned} \quad (17)$$

дополняемой моделью измерения

$$\begin{aligned} y_{1i}(t) &= p_1 e^{-p_2(x_1(t) + x_2(t))} + \varepsilon_1(t), \\ y_{2i}(t) &= p_3 e^{-p_4 x_2(t)} + \varepsilon_2(t). \end{aligned} \quad (18)$$

где: x_{1M}, x_{2M} – сухая и сырая надземная масса растений, кг на заданной площади; f_1 – среднесуточная температура воздушной среды, °C; f_2 – среднесуточный уровень радиации, Вт/(м²·час.); f_3 – среднесуточный уровень осадков, мм; $f_4=t$ (сут.), косвенно учитывающее влияние влагосодержания почвы; $\zeta_1(t), \zeta_2(t)$ – случайные помехи в модели, имеющие нулевое среднее и дисперсии d_1, d_2 ; y_{1M} – оптический показатель, полученный по первому каналу измерения (в видеодиапазоне); y_{2M} – оптический показатель, полученный по второму каналу измерения (в инфракрасном диапазоне); p_1-p_4 – параметры оптической системы измерений, оцениваемые по экспериментальным данным; $\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t)$ – случайные помехи в модели зондирующего измерителя, имеющие нулевое среднее и дисперсии σ_1^2, σ_2^2 .

Модели (17)–(18) могут быть представлены в векторно-матричной форме

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + CF(t) + \xi(t), \\ Y_x &= \Phi(X) + E(t), \\ \Phi(X) &= \begin{bmatrix} p_1 e^{-p_2(x_1(t) + x_2(t))} \\ p_3 e^{-p_4 x_2(t)} \end{bmatrix}, \\ X(0) &= X_0, \\ M[E(t)] &= 0, \text{cov}[E(t)] = \Sigma, \\ M[\xi(t)] &= 0, \text{cov}[\xi(t)] = D. \end{aligned} \quad (19)$$

Наличие моделей (19) позволяет одновременно использовать априорную информацию об измеряемом состоянии, формируемую динамической моделью, и апостериорную информацию измерителей. Такое комплексирование достигается в динамических системах, называемыми оптимальными фильтрами [6]

$$\begin{aligned} \dot{\widehat{X}} &= A\widehat{X} + CF(t) + R(t) \frac{\partial \Phi^T(\widehat{X})}{\partial \widehat{X}} \Sigma^{-1} (Y_x(t) - \Phi(\widehat{X})) \\ \dot{R} &= D + R(t)A^T + AR(t) - R(t) \frac{\partial \Phi^T(\widehat{X})}{\partial \widehat{X}} \Sigma^{-1} \frac{\partial \Phi(\widehat{X})}{\partial \widehat{X}} P(t) \\ \widehat{X}(0) &= M[X_0], R(0) = \text{cov}[X_0], \\ \Sigma &= \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \\ \sigma_1 \sigma_2 & \sigma_2^2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (20)$$

При использовании моделей (19) и фильтра (20) алгоритм оценки информативности имеет следующий вид:

Шаг 0. Задаются значения: матриц параметров динамической модели A, C ; матрица ковариаций ошибок идентификации D , вектора начальных условий X_0 ; интервал времени наблюдения $t \in (t_1, t_2)$, а также программа изменения внешних климатических возмущений $F(t)$ и измеренные значения состояния ($m_1(t), m_2(t)$), используемые при идентификации динамической модели и объединенные в вектор $M(t)$.

Шаг 1. Для всех начальных условий, заданных в п.0, решается система (10) и формируется векторный массив априорной информации о состоянии $X(t)$.

Шаг 2. Для полученного вектора $X(t)$ и измерений $Y_X(t)$ формируют массив априорных совместных плотностей вероятностей состояния

ГЕОИНФОРМАТИКА

$$f(X|A, C, D, t) = (2\pi)^{-1} |D|^{-1/2} \exp\{-(M(t) - X(t))^T D^{-1} (M(t) - X(t))\}.$$

Шаг 3. Для вектора измеренных оптических показателей и реального состояния биомассы формируют массив совместных плотностей распределения этих показателей

$$f(Y_X|M, t) = (2\pi)^{-1} |\Sigma|^{-1/2} \exp\{-(Y_X(t) - \Phi(t))^T \Sigma^{-1} (Y_X(t) - \Phi(t))\}.$$

Шаг 4. Вычисляют нормировочный интеграл для модели

$$I(Y_X|X) = \int_{\Omega_X} f(Y_X|X, t) \cdot f(X|A, C, D, t) dX.$$

Шаг 5. По измеренным значениям оптических показателей формируют массив апостериорной совместной плотности распределения состояния

$$f(X|Y_X) = \frac{f(Y_X(t)|X(t)) \cdot f(X|A, C, D, t)}{I(Y_X|X)}.$$

Шаг 6. Вычисляют критерий информативности измерений

$$I(Y_X|X) = \int_{\Omega_X} \left[\frac{f(X(t)|Y_X(t)) - f(X|A, C, D, t)}{f(X|A, C, D, t)} \right] dX * 100\%.$$

Шаг 7. Для заданных начальных условий и измерений оптических показателей $Y(t)$ решается система (11) для оптимального фильтра и формируют массив апостериорных ошибок фильтрации $E(t) = \tilde{X}(t) - M(t)$, по которому оценивают апостериорную матрицу ковариаций, характеризующую качество измерений.

$$K(t) = \frac{1}{t_2 - t_1} \sum_{t=t_1}^{t_2-1} [E(t)E^T(t)].$$

Данный алгоритм применим и для других культур и состояний, которые могут описываться своими моделями вида (17), (18).

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ТЕСТОВОГО ПОЛИГОНА

Процедуры оценивания состояния почвенной среды (15), (16) и посевов (20) одинаковы в

пределах тестового полигона и обслуживаемого региона. Тогда уместен вопрос: каким же образом используется дополнительная информация на тестовых полигонах, где наряду с данными ДДЗ, производятся и наземные измерения состояния посевов и почвенной среды? Согласно схеме на рис. 3 эта информация используется для идентификации моделей измерений, вида (10) – для почвенной среды и вида (18) – для посевов, а также динамических моделей состояния вида (17).

Обозначая измеренные наземными измерителями значения состояния посевов

$$Z_X = X + \vartheta, \tag{21}$$

и почвенной среды

$$Z_G = G + \theta, \tag{22}$$

а также объединяя все параметры моделей измерения в вектор H , а параметры динамических моделей в вектор P , определим следующие идентификационные процедуры:

– для моделей измерений

$$\hat{H} = \arg \min_H [(Z_G - HG)^T g_G (Z_G - HG)], \tag{23}$$

– для динамических моделей состояния

$$\hat{P} = \arg \min_{P \in (A, C)} [(Z_X - (AX + CF))^T g_X (Z_X - (AX + CF))], \tag{24}$$

где g_G, g_X – весовые матрицы, посредством которых регулируются соотношения ошибок идентификации.

Ввиду того, что идентификация (23), (24) может выполняться только в пределах тестового полигона, то именно здесь и достигается наивысшая точность оценивания состояния посевов и почвенной среды. За пределами тестового полигона, где параметры всех моделей естественно будут отличаться от истинных значений, точность оценивания будет ниже, чем в пределах тестового полигона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реализации всех процедур оптимального оценивания состояния посевов и почвенной среды на основе космических и авиационных средств ДДЗ и создания на их основе реальной автоматизированной системы космического мониторинга

необходимо выполнить следующие этапы исследования и разработки:

1. Исходя из цели и смысла решаемых народнохозяйственных задач установить перечень параметров состояния посевов заданных культур; перечень оцениваемых счетных состояний, таких как фенологические фазы, болезни, вредители, различного рода нарушения и повреждения; перечень параметров состояния почвенной среды.

2. Для случая свободного выбора структуры оптических измерителей ДДЗ осуществить анализ информативности всех возможных каналов оптического спектра, отобрать наиболее информативные по отношению ко всем оцениваемым состояниям.

3. Произвести группировку наиболее информативных оптических каналов на три подвектора измерений, для посевов, почвенной среды и счетных состояний.

4. Для выбранных наиболее информативных векторов измерений выбрать модели процессов измерений.

5. На основании одновременно проведенных наземных измерений и ДДЗ провести идентификацию всех выбранных математических моделей, оценить эффективность идентификации, и в случае необходимости ее повторить, или сделать ее постоянно повторяемой процедурой.

6. По полученным или получаемым в результате идентификации параметрам математических моделей и текущей информации ДДЗ сформировать текущие или прогнозные оценки состояний посевов, почвенной среды и счетных состояний.

Литература

1. Михайленко, И.М. Управление системами точного земледелия / И.М. Михайленко. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005. – 234 с.
2. Рачулик, В.И. Отражательные свойства растительного покрова / В.И. Рачулик, М.В. Ситникова. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 287 с.
3. Крищенко, В.П. Ближняя инфракрасная спектроскопия / В.П. Крищенко. – М.: АО "Интерагротех", 1997. – 638 с.
4. Пытьев, Ю.П. Математические методы моделирования измерительных и вычислительных систем / Ю.П. Пытьев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 400 с.
5. Михайленко, И.М. Прогнозирование состояния травостоя системы управления качеством кормов для молочного скота / И.М. Михайленко, А.Е. Курашвили // Вестник Россельхозакадемии. – 2008. – №2. – С. 10–12.
6. Казаков, И.Е. Методы оптимизации стохастических систем / И.Е. Казаков, Гладков Д.И.. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
7. Михайленко, И.М. Математическое моделирование системы "почва – растение – атмосфера" на примере многолетних трав / И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин, Т.Н. Данилова // Доклады Россельхозакадемии. – 2009. – № 4. – С. 61–64.
8. Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS / С.А. Барталев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из

космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среде и объектам. Т. II. – М.: GRANP-Полиграф, 2005. – С. 228–236.

9. Оценка структуры пашни данных дистанционного зондирования спектрорадиометра MODIS / И.А. Нейштадт [и др.] // Материалы Третьей Российской открытой конференции: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Москва, 2005. – С. 235.

10. Барталев, С.А. Классификация некоторых видов сельскохозяйственных культур на юге России по спутниковым данным MODIS / С.А. Барталев, Е.А. Лупян, И.А. Нейштадт // Исследование Земли из космоса. – 2006. – №3. – С. 68–75.

11. Разработка методов мониторинга пахотных земель России по данным спутниковых наблюдений радиометром MODIS / И.А. Нейштадт [и др.] // Материалы Четвертой Всероссийской открытой конференции: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Москва, 2006. – С. 222.

12. Опыт использования и перспективы развития системы спутникового мониторинга сельскохозяйственных земель МСХ РФ / Ю.М. Акаткин [и др.] // Материалы Четвертой Всероссийской открытой конференции: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Москва, 2006. – С. 3.

13. Якушев, В.П. Концептуальные основы организации сети полигонов сельскохозяйственной территории России / В.П. Якушев, И.Б. Усков, И.М. Михайленко. – СПб.: Агрофизический научно-исследовательский институт, 2010. – 80 с.

14. Soil Monitoring Using Remote-Sensed Data / N.I. Murashko [et al.] // Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering. – 2007. – Vol. 52(3).