

Современные проблемы оптимального планирования подспутниковой съёмки окружающей среды

О.И. Смоктий, Г.А. Гусейнов

*Санкт-Петербургский Институт Информатики и Автоматизации
199178 Санкт-Петербург, 14-ая линия В.О., д.39
E-mail: soi@iias.spb.su, spiiran@iias.spb.su*

В работе рассмотрены вопросы информационного эталонирования подспутниковой съёмки Земли и оптимального планирования дистанционных измерений для адекватной оценки влияния различных факторов, в т.ч. и параметров съёмки на точность идентификации состояний экосистем и природных процессов.

1. Обсуждается проблема использования алгоритмов планирования съёмки для эффективного навигационного позиционирования информативных тест – участков в задачах выявления, прогноза и контроля состояния природных систем и экологически напряженных ситуаций.

2. Рассмотрены возможности использования имеющейся информационно-алгоритмической базы оптимального планирования аэрокосмической съёмки системы «атмосфера–подстилающая поверхность».

3. Приводится иллюстративный материал по конкретным задачам вычисления спектров планов при восстановлении индикатрис атмосферного рассеяния, демонстрирующий на имитируемых кривых информативности характерные трансформации и сжатия спектрально-радиационных образов экосистем.

4. Интерпретируется общая оптимизационная задача планирования разновысотных измерений вертикального профиля функции яркости, трансформируемой в атмосфере.

Введение

В научной литературе достаточное внимание уделено методическим и теоретическим вопросам оптимального планирования измерений и выбора информативных метрик в рамках рассматриваемых задач дистанционного зондирования природных ресурсов [1-3]. В частности, много работ посвящено планированию дистанционных измерений по оценке параметров атмосферы [4-7]. Работы этого направления пережили бум своей популярности в 70-80-х годах прошлого столетия. Не случайно в этот же период получили развитие подспутниковые эксперименты по «эталонированию» редуцируемых дистанционных данных на специально оборудованных полигонах. Очевидно – это были разные подходы к решению одной задачи получения системы адекватного сопоставления, интерпретации и планирования дистанционной съёмки. Однако общим ограничением для подспутниковых экспериментов по эталонированию дистанционных данных, как впрочем и для реализации их оптимального планирования, являлась проблема координатной привязки регистрируемых характеристик для моделирования адекватных связей с параметрами экосистем и природных процессов.

В настоящий период развития спутниковых информационных технологий в принципе снимается проблема координатной привязки. Однако это не снимает в целом проблемы «эталонирования» спутниковых данных и требует на уровне новых возможностей более активного возобновления и переосмысления в вопросах использования наработанных модулей оптимального планирования для выработки альтернативных подходов. Во-первых, обратной стороной появления навигационных технологии явилась ложная успокоенность по поводу адекватности координатных связей дистанционно регистрируемых параметров. Наличие координатной привязки изображения вводит в заблуждение неискушенных по поводу заведомой устойчивости координатных связей пространственных картин распределений оптических характеристик. Между тем, как известно, инвариантными являются лишь функционалы от этих распределений [8-10]. И значит, еще более усиливается необходимость привлечения адекватных моделей, позволяющих более точно реализовывать оптимальные планы координатного

позиционирования по трассе съемки для контроля развития природного процесса или параметров состояния экосистемы [11, 12].

Во-вторых, как раз в этой связи особую специфику приобретает подспутниковое «эталонирование», но уже не просто тест-участков, произвольно выбираемых как ранее для спектрально-энергетической и пространственно-частотной калибровки, но на основе результатов имитации в пространстве условий съемки прогнозируемых критических состояний с их характерными параметрами. Так например, в результате такого моделирования выбираются характерные параметры состояния из спектра деградации экосистемы [13]. Таким образом, подспутниковое «эталонирование» должно носить интерактивный характер для выработки требований к организации «эталонов» на основе моделирования прогнозируемых параметров критических состояний. Иными словами, сегодня для эффективного использования навигационных технологий имитация оптимальных планов и подспутниковое «эталонирование» приобретают смысл интерактивных элементов законченного цикла в рамках алгоритмов поиска не только информативных условий съемки (углов, высот, параметров освещения), но и информативного распределения тест-участков с критическим состоянием прогнозируемого процесса [14, 15].

Рассмотрение альтернатив и новых требований

В рамках обозначенных выше проблем рассмотрим модули оптимального планирования, используемые для решения ряда известных задач дистанционного зондирования.

Общая постановка и решение задач планирования измерений пространственно-угловых распределений интенсивности излучения, отраженного поверхностью Земли и рассеянного атмосферой, заключается в оптимизации функционала построенного на базисных векторах функции отклика в виде оцениваемой (обычно полиномиальной) регрессии, представляющей решение уравнения переноса излучения.

Таким образом, решение уравнения переноса может быть выражено отрезками рядов, представляющие регрессию,

$$f(x) = \sum_n C_n \cdot P_n(x), \quad x = \cos(\gamma), \quad \gamma \in (0, 2\pi), \quad n = 0, 1, \dots$$

в частности, для атмосферных задач - рядами Фурье по полиномам Лежандра

$$P_n(x) = \frac{1}{n!} \cdot \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n, \quad x \in (-1, 1), \quad n = 0, 1, \dots$$

или в случае учета азимутальных гармоник используется представление согласно формуле сложения шаровых функций

$$P_n(x) = P_n(\eta) \cdot P_n(\xi) + 2 \cdot \sum_{m=1}^n \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \cdot P_n^m(\eta) \cdot P_n^m(\xi) \cdot \cos(m \cdot \phi)$$

с присоединенными многочленами Лежандра

$$P_n^m(x) = (x^2 - 1)^{m/2} \cdot \frac{d^m}{dx^m} P_n(x), \quad x \in (-1, 1), \quad n = 0, 1, \dots \quad m = 0, 1$$

Спектр плана в точках $x_j^* \in (-1, 1), j = 1, 2, \dots, N$ или в углах (η, ξ, ϕ) ищется согласно алгоритму

$$\{x_j\}^T = \underset{x}{\text{Arg sup}} D[P_n(x)]$$

где $D[P_n]$ - функционал от многочлена Лежандра, соответствующий в данном случае

D - критерию оптимальности, т.е. определителю дисперсионной матрицы, оптимизируемой в точках оптимального плана. Очевидно, элементы матрицы Фишера $F = P \cdot P^T$ для этого случая строятся на базисных векторах регрессии, т.е. полиномах $P = P_i(x_j)$. В результате мы получаем оптимальные распределения углов регистрации излучения $x_j^T \in (-1,1)$, зависящие фактически только от степени полиномов Лежандра, представляющих базисные функции регрессии, но, как известно, не от значений ее оцениваемых параметров.

На рисунке 1 иллюстрируется кривая оптимальности угловых измерений с информативными точками плана и плотностью распределения измерений. Очевидно информативное преимущество центра и краев. Между тем, часто необходимо использовать априорную информацию по всей области измерений, например, о распределении дисперсии.

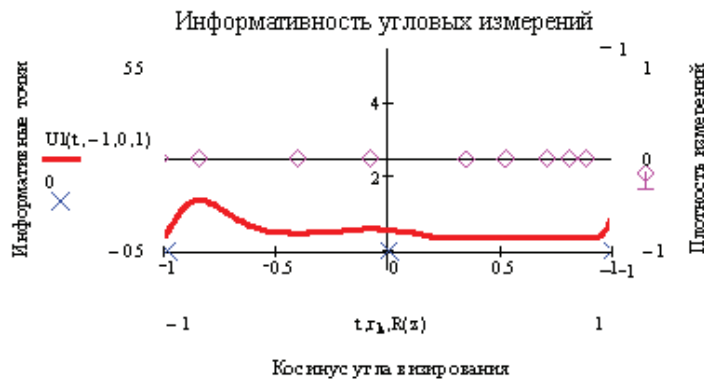


Рис. 1. Кривая информативности угловых измерений вычисленная по критерию D -оптимальности. Крестиками обозначены оптимально информативные точки согласно исходному плану D - критерию, ромбиками показано распределение информативных точек измерений, вычисленных по критерию MV -оптимальности

При поиске оптимальных точек спектра плана согласно критерию MV -оптимальности

$$\max_x d(x, \lambda) = \lambda(x) P^T (P \cdot P^T)^{-1} P$$

нам представляется возможность производить анализ информации о распределении дисперсии по всей области и на основе этого анализа учитывать априорную информацию с помощью вводимой функции эффективности плана $\lambda(x)$. На рисунке 2 показано изменение распределения информативности точек (углов) плана после введения экспоненциальной (с отрицательной степенью) функции эффективности.

Требования введения функции эффективности плана, получаемой из априорной информации, оправданы, например, при необходимости более детальных измерений в определенных углах, где точность измерения невысока: высокая дисперсия из-за сильных осцилляций в точках обрезания ряда, резкие перепады индикатрисы рассеяния для конкретной модели атмосферы.

Рассмотрим спектры плана при аппроксимации атмосферной индикатрисы рассеяния излучения полиномами Лежандра. Как известно оптимальное распределение точек плана для оценки параметров

регрессии будет совпадать с распределением нулей полинома Лежандра соответственно старшей степени многочлена, представляющего регрессию.

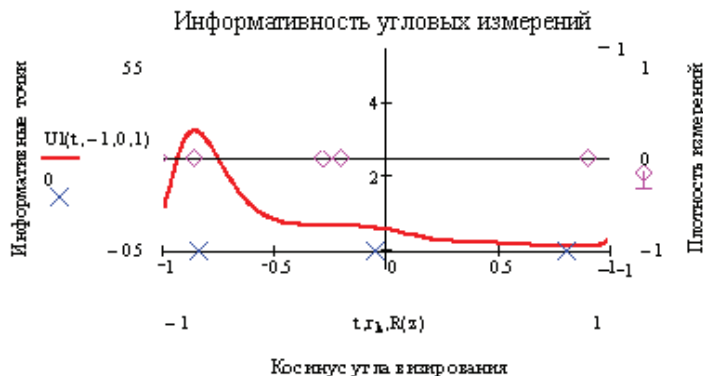


Рис. 2. Перераспределение информативности и плотности измерений по всей области измерений, соответственно введенной экспоненциальной (с отрицательной степенью) функции эффективности. Крестиками обозначены оптимально информативные точки согласно исходному плану D – критерию, ромбиками показано распределение информативных точек измерений, вычисленных по критерию MV -оптимальности

На рисунке 3 кривые иллюстрируют распределения информативности согласно MV -критерию оптимального плана для разных степеней полиномов Лежандра, соответствующих различным членам приближения регрессионного ряда. Эти распределения можно рассматривать как исходные при решении задачи поиска наилучшего приближения атмосферной индикатрисы рассеяния полиномами Лежандра. Причем задача параметризации индикатрисы и поиска оптимального плана распределения точек измерения (вычисления) решается как последовательные процедуры единого цикла. В качестве аппроксимируемой индикатрисы принимается модель Хенни-Гринштейна.

$$\chi(\gamma, l) = \frac{1 - l^2}{(1 - 2 \cdot l \cdot \cos(\gamma) + l^2)^{3/2}},$$

где $l \in (0,1)$ - параметр вытянутости атмосферной индикатрисы рассеяния, $\cos(\gamma)$ - косинус угла рассеяния в сферических координатах.

Решение задачи регуляризации с помощью множителей Лагранжа использует более общий метод, чем метод наименьших квадратов. В работе [6] рассматривается решение обратной задачи ДЗ методом регуляризации некорректной задачи по Тихонову. Поиск наилучшей аппроксимации индикатрисы χ регрессионными рядами полиномов Лежандра в рамках регуляризации некорректной задачи формально реализуется посредством оптимизации функционала

$$U = (\chi - \Lambda F)^T (\chi - \Lambda F) + \lambda \cdot (F - F_0)^T (F - F_0)$$

и приводит к решению линейной задачи

$$F(\lambda) = (\Lambda^T \Lambda + \lambda \cdot I)^{-1} (\Lambda \chi + F_0)$$

для поиска оптимального значения параметра Лагранжа λ , минимизирующего ошибку аппроксимации $|\chi - \Lambda \cdot F(\lambda)|$, где χ - индикатриса Хеньи-Гринштейна, F - искомая функция индикатрисы, представленная регрессионным рядом полиномов Лежандра. Λ - матрица преобразования (усреднения), F_0 - пробная функция.

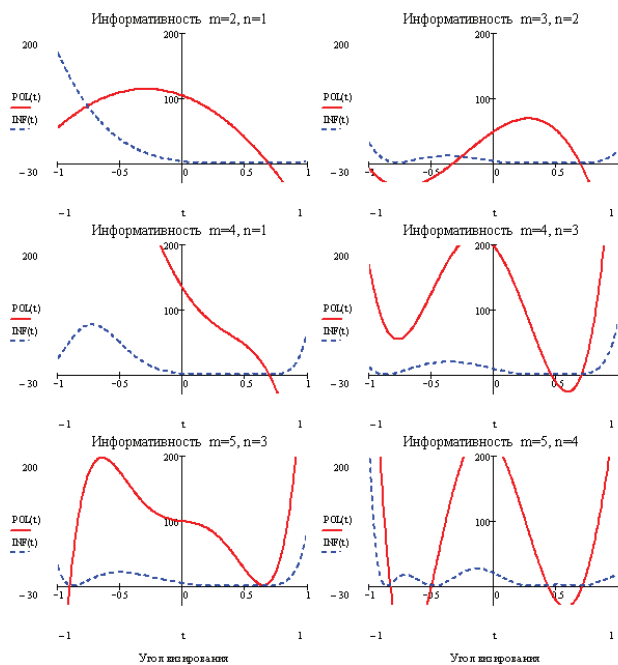


Рис. 3. Кривые распределения информативности (пунктирная кривая) согласно MV-критерию оптимального плана для полиномов Лежандра разных степеней, соответствующих различным членам приближения регрессионного ряда (сплошная кривая). Пары значения m и n , надписанные над кривыми относятся к степеням полиномов представляющих регрессионную модель

На рисунке 4 показаны составляющие регрессию полиномы и точки спектра плана в нулях аппроксимирующего многочлена Лежандра.

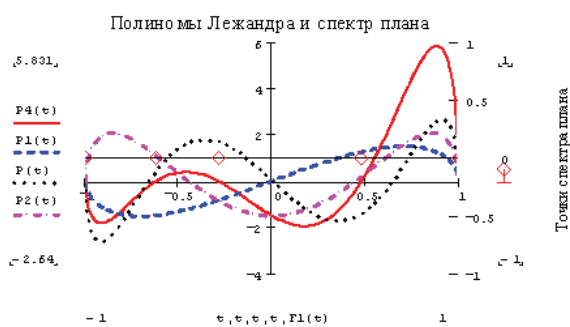


Рис.4. Составляющие регрессию полиномы и точки спектра плана в нулях аппроксимирующего многочлена Лежандра

В литературе в задачах по моделированию атмосферных параметров для получения приемлемых приближений решения уравнения переноса излучения в атмосфере используют трехчленную индикатрису, т.е. приближение отрезком 3 первых членов ряда Фурье по полиномам Лежандра.

На рисунке 5 иллюстрируются трехчленная функция аппроксимации индикатрисы, а также индикатриса Хеньи-Гринштейна и пробная функция в качестве входного параметра при регуляризации.

Выходным параметром является оптимально оцененная функция аппроксимации индикатрисы, восстановленная в два этапа: обращения оператора приборного осреднения с оптимизацией по параметру регуляризации расхождения моделируемой аппроксимации с индикатрисой Хеньи-Гринштейна.

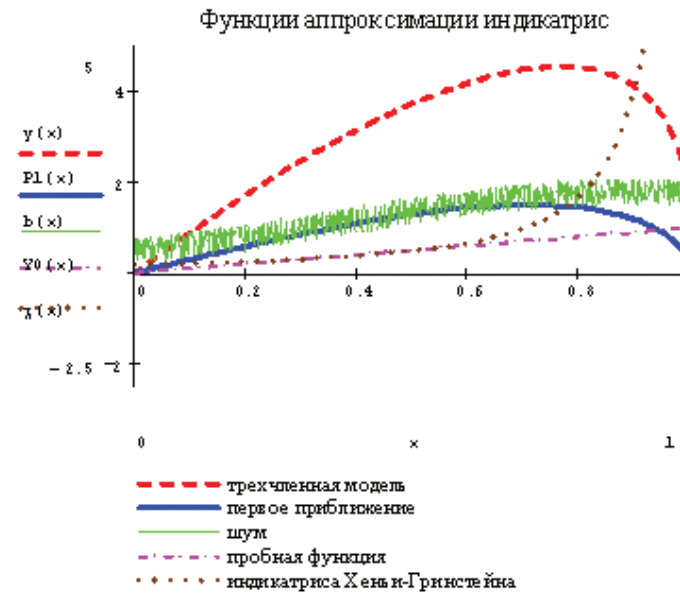


Рис. 5. Входные функции: трехчленная функция аппроксимации индикатрисы, а также индикатриса Хеньи-Гринштейна и пробная функция в качестве входного параметра при регуляризации

На рисунке 6 показаны кривые регуляризованного решения - выходные функции аппроксимации и обращения. На рисунке 7 демонстрируется так называемый спектр регуляризации невязки или - зависимость невязки от параметра регуляризации, которую мы получаем в результате решения линейного уравнения, используя рассмотренный выше оператор обращения, а затем - эту зависимость, собственно, для регуляризации посредством оптимизации по параметру Лагранжа. На рисунке 8 показано представление индикатрисы Хеньи-Гринштейна в сферических координатах.

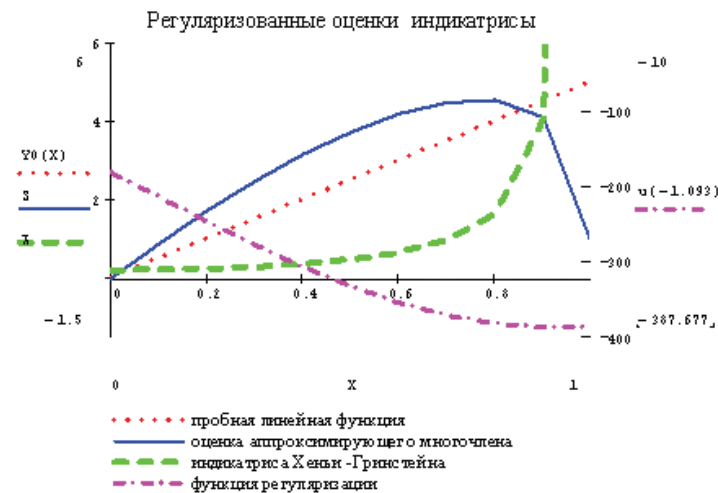


Рис. 6. Кривые регуляризованного решения - выходные функций аппроксимации и обращения

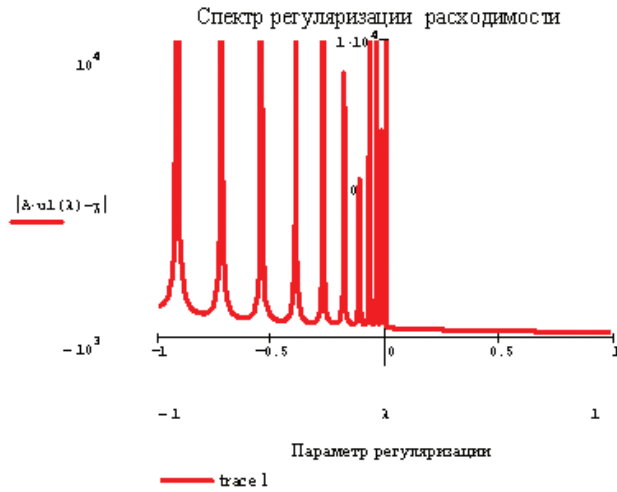


Рис. 7. Спектр регуляризации расходимости или – зависимость расходимости от параметра регуляризации

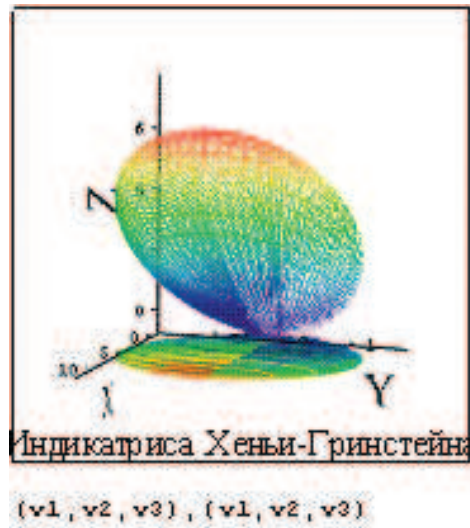


Рис. 8. Индикатриса Хенни-Гринштейна. Представление в сферических координатах

В результате процедур оптимизации - определяется функция плотности наиболее информативных точек (углов) измерения, в которых оцениваются базисные вектора функции отклика, параметры которой подлежат оценке по этим точкам, т.е. при сжатии.

При более общей постановке оптимизации измерений вертикального (по τ) профиля функции яркости можно использовать принцип максимума [16]:

$$\max_{f(\tau)} J = \int_0^t \{L[f(\tau, \eta), \rho(\tau, \eta), x] + \lambda \cdot [T(\rho, \rho, f)]\} \cdot d\tau,$$

$$\frac{\partial H}{\partial f} = 0, \quad H = L[f, \rho, x] + \lambda \cdot [-\alpha \cdot \rho + A \cdot \rho + F_0]$$

$$\begin{aligned} \bullet \\ \dot{\rho} &= -\alpha \cdot \rho + A \cdot \rho + F_0 \\ \rho(0) &= \rho_0, \quad \rho(\tau_0) = \rho_\tau \end{aligned}$$

где H - функция Гамильтона, λ - параметр Лагранжа, ρ - функция яркости, $\dot{\rho}$ - ее производная по τ ; F_0 - функция внешних источников излучения; в третьем ряду - дифференциальное уравнение (система уравнений) переноса излучения с коэффициентом поглощения α и матрицей рассеяния A ; в четвертом - граничные условия для функции яркости $\rho(\tau)$ на дне и на верхней границе атмосферы; функция управления $f(\tau, \eta)$ - в данном случае аппроксимационная, может быть представлена в Лагранжиане $L[\cdot]$ в виде квадратичной формы $f^T D f$. И если ищется оптимальная функция управления $f(\tau, \eta)$ в смысле *точности аппроксимации* по квадратичной метрике функции $\rho(\tau, \eta)$, подчиняющейся ограничению уравнения переноса с соответствующими граничными условиями, то оптимизируемый функционал включает также квадратичную форму $\rho^T C \rho$. Из условий экстремума для сопряженной задачи получаем

$$-\frac{\partial H}{\partial \rho} = \lambda(\alpha \cdot I - A) - \rho^T \cdot C,$$

$$L[f, \rho, x] = f^T \cdot D \cdot f + \rho^T \cdot C \cdot \rho$$

где I - единичная матрица. Выбор матрицы D определяет оптимизируемый функционал. Если $D = M^{-1}$, то мы имеем квадратичную форму $f^T M^{-1} f$, аналогичную той, что используется в задачах оптимального планирования по MV -критерию (см. выше), т.е. для задач *оптимальной экстраполяции*, и условие для сопряженной задачи упрощается до

$$-\frac{\partial H}{\partial \rho} = \lambda(\alpha \cdot I - A) = 0,$$

Очевидно, если характеристические корни $(\alpha \cdot I - A) = 0$ вещественны и отрицательны, то данная система будет *устойчивой*, а сопряженная ей система

$$\bullet \\ \dot{\rho} = -\alpha \cdot \rho + A \cdot \rho + F$$

- неустойчивой, т.к. характеристические корни $(-\alpha \cdot I + A + F) = 0$ - положительны, и наоборот [16].

Искомое решение оптимального управления $f^*(\tau)$ получаем из системы

$$\frac{\partial H}{\partial f} = \frac{\partial}{\partial f} [(\rho - f)^T \cdot Q \cdot (\rho - f)] = 0$$

$$\bullet \\ \rho = \frac{\partial H}{\partial \lambda} = -\alpha \cdot \rho + A \cdot \rho + F_0$$

$$\bullet \\ \lambda = \frac{\partial H}{\partial \rho} = \lambda(\alpha \cdot I - A) - \frac{\partial}{\partial f} [(\rho - f)^T \cdot Q \cdot (\rho - f)],$$

$$\rho(0) = \rho_0, \quad \rho(\tau_0) = \rho_\tau$$

В зависимости от постановки задачи квадратичные формы $(\rho - f)^T \cdot Q \cdot (\rho - f)$ могут быть заменены на $(\rho - Df)^T Q(\rho - Df)$ или $(\rho - Df)^T (\rho - Df)$. Напомним, что вместо этой квадратичной формы может быть использован также функционал, соответствующий критерию *MV-оптимальности* $f^T M^{-1} f$, где $M = f \cdot f^T$.

Основные результаты работы

развитием возможностей навигационных технологий приобретает новое качество взаимодействие имитации оптимальных планов и динамического подспутникового эталонирования дистанционных измерений (съемки) в рамках задач поиска не только информативных условий съемки (углов, высот, параметров освещения), но и информативного распределения тест-участков с критическим состоянием прогнозируемого процесса.

В таком многоцелевом (как минимум двухцелевом) представлении важен выбор критерия оптимального планирования дистанционной съемки. Так например, для оптимального позиционирования распределения тест-участков (маршрута) с критическим состоянием имитируемого процесса наиболее приемлем *MV-критерий* с возможностью анализа распределения дисперсий по всей области измерения, в то время как критерий *D-оптимальности* ограничивается анализом выбранной совокупности измерений и может быть использован при выборе оптимальных распределений плотности в заданных точках (условиях) съемки, например информативных углов измерений яркости при восстановлении атмосферной индикатрисы рассеяния

При постановке поиска оптимальных планов в рамках общей оптимизационной задачи с использованием принципа максимума в качестве оптимизируемого функционала может выбираться один из этих квадратичных критериев, а также (и/или) квадратичный критерий невязки коэффициента яркости, являющегося решением уравнения переноса в атмосфере, и его аппроксимирующей функции (ряда), являющейся, собственно, искомой оптимальной функцией управления. Чувствительность невязки, определяющей точность аппроксимация, к заданным ограничениям, очевидно, выражена параметрами Лагранжа. С другой стороны, устойчивость системы ограничений, заданных уравнением переноса для оптимизируемой задачи, зависит от характеристических (собственных) значений матрицы рассеяния. Таким образом, выбирая с помощью выбранных весовых коэффициентов заданную линейную комбинацию параметров Лагранжа и собственных значений матрицы рассеяния, мы можем вычислить оптимальную искомую функцию требуемого свойства (точности аппроксимации и устойчивости системы).

Литература

1. *Кондратьев К.Я., Григорьев Ал. А., Покровский О.М.* Информационное содержание данных космической индикации параметров среды // Л.: ЛГУ, 1975. 145 с.
2. *Успенский А.Б.* Обратные задачи математической физики – анализ и планирование экспериментов // В сб. трудов "Математические методы планирования эксперимента". Новосибирск: Наука, 1981. С.199-242.
3. *Савиных В.П., Смоктий О.И., Гусейнов Г.А.* Информативность и оптимальное планирование оптического аэрокосмического мониторинга Земли // М.: МИИГАиК, 1990. 19 с.//ДЕП. В ОНИПР ЦНИИГАиК 22.02.90, №;418-гд.90.
4. *Козодеров В. В.* Информационно-динамические аспекты описания природных явлений // Исследование Земли из космоса, 2001. № 5. С.27-43.
5. *Зуев В.Е., Кабанов М.В.* Перенос оптических сигналов в земной атмосфере // М.: Советское радио, 1977. 368 с.
6. *Исимуру А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах // М.:Мир,1981. 317 с.

7. *Смоктый О.И.* Моделирование полей излучения в задачах космической спектрофотометрии // Л.: Наука, 1986. 348 с.
8. *Головкин В.А., Козодеров В.В.* Радиационный баланс: Новые применения к изучению стихийных бедствий из космоса // Исследование Земли из космоса, 2000. № 1. С.26-41.
9. *Виленкин Н.Я.* Специальные функции и теория представления групп // М.: Наука, 1965. 588 с.
10. *Панюшев Д.И., Тхабисимов Д.К., Усиков Д.А., Чеботарев Н.Г.* Математические основы построения систем инвариантных признаков в задаче распознавания образов // Математические методы исследования природных ресурсов Земли из космоса. М.: Наука, 1984. 176 с.
11. *Смоктый О.И., Гусейнов Г.А.* Информационные инварианты и калибровка спектрального зондирования природной среды из космоса // Труды VIII СПб. Междун. Конференции. «РИ-2002», С.387-394.
12. *Huseynov G.A., Smokty O.I.* Informational Calibration Models of Time-Space Optical Fields for Degrading Forest Ecosystems // -31_ISRSE Symposium, St.-Peterburg, 2005.
13. *Гусейнов Г.А., Егоров В.В., Садыков.* Метрики информационной калибровки при трансформации оптических образов экосистем // Исследование Земли из космоса, 2006. № 2. С. 1–14.
14. *Смоктый О.И., Гусейнов Г.А.* Синтез инвариантной меры информативности для операторов переноса излучения с зеркальной симметрией // Труды СПИИРАН. Вып. 2. СПб: СПИИРАН, 2004.
15. *Гусейнов Г.А., Смоктый О.И.* Информационные свойства спектральных коэффициентов и индексов для калибровки аэрокосмических снимков // Труды СПИИРАН. Вып. 2. СПб: СПИИРАН, 2004.
16. *Интрилигатор М.* Математические методы оптимизации и экономическая теория // М.: Прогресс, 1975. 606 с.