

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

УДК 528.813

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВХОДЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

©2000 г. В.Г.Бондур

Центральный научно-исследовательский институт "Комета", Москва

Тел.: (095) 277-42-31; e-mail: vgbondur@online.ru

Поступила в редакцию 05.04.2000 г.

Рассматриваются методы информационного моделирования полей электромагнитного излучения на входе дистанционной аэрокосмической аппаратуры. Для описания регистрируемых сигналов предложены статистический и структурный методы, а также метод, основанный на применении нечетких множеств. В качестве непроектируемых элементов моделируемых полей используются однородные природные объекты, морфологически однородные образования и природные ситуации, свойства которых стабильны при определенных условиях наблюдения. Приводятся примеры применения предложенных методов для создания пространственных спектральных моделей, позволяющих обобщить информацию о пространственно-частотных характеристиках различных объектов процессов и явлений, наблюдаемых аэрокосмическими системами.

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные сигналы, регистрируемые дистанционной аппаратурой, установленной на аэрокосмических носителях, обусловлены собственным, отраженным и рассеянным излучением наблюдаемых объектов и фонов [1-6]. Процесс формирования полей этих сигналов чрезвычайно сложен и зависит от многих факторов, таких как метеорологические условия, физико-химические свойства объектов наблюдения, условия освещения, характеристики среды распространения, а также особенности систем наблюдения и аппаратуры дистанционного зондирования [7-10].

Информацию о полях регистрируемого электромагнитного излучения целесообразно представлять в виде моделей, которые необходимы для разработки принципов построения и способов применения аэрокосмических систем, определения их оптимального состава, выбора наиболее подходящих методов, типов и информационных характеристик аппаратуры дистанционного зондирования, бортовых и наземных средств приема и передачи данных, методов, алгоритмов, программных и технических средств обработки информации, формирования баз данных по характеристикам наблюдаемых объектов и фонов [9-17].

Наличие достоверных исходных данных о характеристиках наблюдаемых объектов (целей), фонов и их сочетании (фоновой-целевой обстановке), представленных в виде моделей, позволяет выделять наиболее отличительные признаки для идентификации и распознавания интересующих исследователя процессов и явлений [9, 10, 13, 14, 16]. Важнейшая область применения таких исходных данных - имитационное моделирование аэро-

космических систем в целом, их отдельных элементов и подсистем, позволяющее заменить дорогостоящие натурные испытания испытаниями в компьютерном пространстве [9, 10, 16, 18, 19].

В данной работе рассматриваются различные методы моделирования полей электромагнитного излучения на входе бортовой аппаратуры аэрокосмических систем глобального и регионального наблюдения.

ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как известно, модели обладают свойствами и характеризуются соотношениями, которые подобны свойствам или соотношениям реальных объектов [18, 20-24]. Модель отражает объект в упрощенной абстрагированной форме и реализует это отображение в виде конкретной более или менее наглядной системы [23]. Отношения между моделями и объектами носят характер изоморфизма, гомоморфизма, аналогии, подобия, изоморфизма и т.п. [18, 19, 21-24].

В общем случае две системы объектов "O₁" и "O₂" называются моделями друг друга (или моделирующими друг друга), если некоторый гомоморфный образ O₁, и некоторый гомоморфный образ O₂ изоморфны между собой [25].

Как известно, *изоморфизм* устанавливает такое взаимно однозначное соответствие между наборами предикатов модели и оригинала, что соответствующие друг другу объекты обладают соответствующими свойствами и находятся в соответствующих соотношениях между собой внутри каждой системы. При этом соответствие (отношение)

между объектами выражает тождество их структуры [21, 22, 25-29].

Гомоморфизм, как и изоморфизм, сохраняет все определенные на исходной системе свойства и отношения, но в отличие от изоморфизма это отображение однозначно лишь в одну сторону: образы некоторых элементов “оригинала” в модели сливаются [19—21, 25-29].

Одна из главных проблем, стоящих перед исследователем, занимающимся моделированием, в том числе и полей сигналов на входе аэрокосмических систем ДЗ, - построение таких моделей, которые, с одной стороны, достаточно полно отображали бы реальные процессы и в этом смысле были сложными, а с другой - достаточно простыми, чтобы их можно было исследовать и получить результат в обозримое время [10, 21-26]. Основной проблемой при этом является обеспечение адекватности модели реальным процессам. Последнее достигается путем сопоставления результатов моделирования с результатами теоретических или натуральных исследований и устранения противоречивости результатов.

Для моделирования полей электромагнитного излучения, регистрируемых аэрокосмическими системами, могут использоваться математические (логико-математические, предметно-математические, статистические и др.) [8, 18, 20-23, 26-28], физические (например, методы аналогий, подобия) [19, 21-24] и полунатурные [19-23] методы.

Математические модели реальных систем, которые можно разделить на два класса: аналитические и имитационные, - это совокупность соотношений (формул, уравнений, неравенств, логических условий, операторов и т.д.), определяющих характеристики состояний системы (а через них и выходные параметры) в зависимости от параметров системы, входных данных, начальных условий и времени [8, 20, 21, 26, 27, 29]. Предметно-математические модели предполагают тождественность математического описания процессов в оригинале и модели, хотя эти процессы могут развиваться на совершенно различной основе, а логико-математические обеспечивают абстрактное описание с помощью символов и знаков [18, 20-23, 26, 29].

Методы математического моделирования используются для проведения вычислительных экспериментов, в которых имитируется поведение исследуемых объектов в различных условиях на ЭВМ [8, 18-22, 26-28]. Такие методы резко сокращают сроки научных исследований и технических разработок, а также уменьшают объемы натуральных испытаний при создании сложных систем [9-14].

Физические методы моделирования [19, 21-24, 26] отражают подобие между оригиналом и моделью с точки зрения не только их формы и геометрических соотношений, но и основных физичес-

ких процессов, происходящих в них. При физическом моделировании модели и оригиналы всегда имеют одну природу. Преимущество этого метода моделирования перед полунатурным заключается в том, что условия реализации процесса-модели могут значительно отличаться от условий, свойственных реальному процессу.

Полунатурное моделирование используется при отработке систем в целом для уточнения используемых технических принципов, получения объективных оценок для принятия решений о проведении натуральных испытаний и возможности перехода от одного этапа испытаний к последующему [19-23].

Ввиду сложности процессов формирования полей сигналов на входе бортовой аппаратуры применение физических и математических методов моделирования затруднено. Поэтому при разработке моделей этих процессов целесообразно применять информационный подход, основанный на многомодельном описании с помощью системы моделей, характеризующих их отдельные стороны [9, 10]: $M = \{M_j\}_{j=1}^J$, где j, J - индекс модели.

Такие модели строятся с использованием частных моделей, которые могут разрабатываться на основании методов математического и физического моделирования, а также результатов экспериментальных исследований, проводимых в натуральных условиях [10, 13-15, 30, 31, 40-43, 46, 71].

В соответствии с информационным подходом под комплексными моделями полей сигналов на входе дистанционной аппаратуры будем понимать систему взаимодействующих между собой элементов, которыми являются модели фоновой, целевой и фоново-целевой обстановок, модели классификации наблюдаемых ситуаций по каким-либо критериям (например, по степени схожести на наблюдаемые объекты), модельные реализации стохастических полей яркости, модели учета условий наблюдения, компактно отображающих внутренние и внешние признаки, характеризующие процессы формирования полей сигналов, обусловленных объектами и фонами, на входе конкретной бортовой аппаратуры конкретной системы наблюдения [9, 10]. При этом отображение будем считать компактным, если в многомерном пространстве можно выделить такую небольшую по объему односвязную область, что соответствующая случайная векторная величина попадает в нее с вероятностью, близкой к 1 [10, 32].

Выходными параметрами таких комплексных моделей служат многомерные поля признаков $L(x_i)$, адекватно описывающие исследуемые объекты с учетом специфики задач, стоящих перед конкретной аэрокосмической системой [9,10]. Для описания таких полей могут использоваться различные методы, основные из которых представлены ниже.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сигналы от различных объектов, регистрируемые аэрокосмической аппаратурой, представляют собой случайные поля вида $L(x_i/W)$ (x_i – вектор информативных признаков, моделируемых сигналов, W – комплекс условий наблюдения), зависящие от факторов внешней среды, свойств исследуемых объектов, характеристик средств наблюдения и т.д. [9, 10]. Формирование полей таких сигналов необходимо рассматривать как вероятностный процесс, наиболее общей и полной характеристикой для описания которого является многомерная условная плотность распределения вида [33-35]

$$P_f[L(x_i)/W^f], \quad (1)$$

где f – индекс принадлежности ($f = \phi$ – для фонового поля; $f = \psi$ для целевого поля; $f = \psi$ для фоново-целевого поля).

В качестве обобщенных признаков полей сигналов на входе дистанционной аппаратуры могут

использоваться множества энергетических (сигнальных) $\{\mathcal{E}_{i_s}\}_{i_s=1}^{I_s}$, пространственных $\{\Pi_{i_n}\}_{i_n=1}^{I_n}$, и динамических $\{V_{i_v}\}_{i_v=1}^{I_v}$, характеристик, где $i_s = 1 \dots I_s$, $i_n = 1 \dots I_n$, $i_v = 1 \dots I_v$ – индексы соответствующих классов признаков [10].

К комплексу условий W относятся: метеорологические параметры – Ξ ; условия освещения – $B_{\text{осв}}$; характеристики атмосферы – A ; физические свойства объектов наблюдения – O_O и фонов O_ϕ ; характеристики аппаратуры ДЗ – Λ и системы наблюдения U ; параметры наземных I_α и бортовых I_β технических средств обработки; параметры, применяемые при наземной ζ_α и бортовой ζ_β обработке информации; закономерности распределения наблюдаемых объектов в пределах исследуемых районов – N [9, 10].

Для фоновых, целевых и фоново-целевых обстановок многомерные условные плотности распределения векторов признаков соответственно принимают вид

$$P_\phi[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W^\phi(\Xi, B_{\text{осв}}, A, O_\phi, \Lambda, U, I_\alpha, I_\beta, \zeta_\alpha, \zeta_\beta)], \quad (2)$$

$$P_\psi[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W^\psi(\Xi, B_{\text{осв}}, O_O, A, N, \Lambda, U, I_\alpha, I_\beta, \zeta_\alpha, \zeta_\beta)], \quad (3)$$

$$P_{\psi\psi}[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W^{\psi\psi}(\Xi, B_{\text{осв}}, A, O_\phi, O_O, N, \Lambda, U, I_\alpha, I_\beta, \zeta_\alpha, \zeta_\beta)]. \quad (4)$$

Модели полей сигналов, разрабатываемые в таком статистическом виде, определяются как образы в многомерном пространстве признаков. При этом каждый элемент образов (т.е. точек пространства, принадлежащих множествам-образам) сопоставляется с конкретной реализацией модели – объектом, принадлежащим данному классу моделей.

Теоретически для определения плотностей вероятностей (2)-(4) необходимы ансамбли или множества реализаций, соответствующих наблюдаемым ситуациям

$$\{P_{q_f}^{q_f}[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W^f]\}_{q_f=1}^{Q_f}, \quad (5)$$

где q_f , Q_f – индексы групп соответствующих ситуаций, или по крайней мере, по одной реализации, определенной на бесконечном пространстве

$$P_f[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W^f]_\infty. \quad (6)$$

На практике обычно приходится иметь дело с выборочными плотностями распределения, полученными на ограниченных пространствах при фиксированных условиях W_0^f . Поэтому описание полей излучения, как правило, осуществляется с использованием многомерных условных выборочных плотностей распределений вида [10, 34]

$$\hat{P}_f[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W_0^f] \quad (7)$$

Целесообразность применения статистического подхода вызвана, с одной стороны, случайным характером регистрируемых полей электромагнитного излучения, с другой – его глубокой теоретической обоснованностью, а, с третьей – тем обстоятельством, что статистические методы широко используются при выделении и классификации различных объектов на фоне случайных помех в пространстве информативных признаков [10, 32, 36, 37, 68-70].

Сложность использования статистического метода моделирования обусловлена необходимостью получения большого объема данных для достоверной оценки вероятностных характеристик, а также трудностями, возникающими в результате восстановления распределений полей признаков для неустойчивых явлений и связанной с этим проблемой робастности [33, 35, 38]. Для преодоления этих трудностей можно использовать различные подходы, в том числе подход к описанию многомерных явлений и их свойств в виде сходящихся множеств, предложенный для моделирования сложных физических процессов [39].

Кроме того, следует отметить, что особенность статистического метода – описание характеристик, которые относятся к выборкам определенных протяженностей и носят в известной степени усредненный характер. Поэтому на основании

статистических моделей достаточно сложно восстанавливать конкретные реализации исследуемых полей сигналов. В связи с этим важен выбор определенных зон (элементов) полей признаков $L(x_i)$, для которых моделируемые свойства имели бы устойчивый характер при изменении факторов условий.

При моделировании фоновых и фоново-целевых обстановок все наблюдаемые фоновые образования можно разделить на фоновые поля различных типов [9, 10]:

- однородные природные объекты, характеризующиеся устойчивостью форм электромагнитных спектров $B(\lambda)$ к изменению условий наблюдения [1, 10, 13, 17, 36, 40-43, 71]:

$$F^0 \{ \Phi[B(\lambda)] = \text{const} \}; \quad (8)$$

- морфологически однородные образования (МОО), характеризующиеся стабильностью текстурных свойств, в частности форм двумерных пространственных спектров $S(v_x, v_y)$ [9, 10, 13-15, 48, 49, 68]:

$$F^{MO} \{ \Phi[S(v_x, v_y)] = \text{const} \}; \quad (9)$$

- фоновые ситуации s_q , свойства которых x_i^c (например, степень сходства с объектами наблюдения) устойчивы при фиксированных условиях наблюдения W_{m_q} , состоящие из множества различных морфологически однородных образований, которые в свою очередь могут являться объединением нескольких однородных природных объектов [9, 10].

$$s_q(x_i^c) = \left\{ \left[F_k^{MO} = \bigcup_{l_\phi=1}^{L_\phi} F_{l_\phi}^0 \right]_{k=1}^{K_q} / W_{m_q} \right\}_{q=1}^{Q_\phi}, \quad (10)$$

$q = 1, 2, \dots, Q_\phi$ – индекс фоновых ситуаций; $k = 1, 2, \dots, K_q$ – индекс МОО; $l_\phi = 1, 2, \dots, L_\phi$ – индекс однородных природных объектов; m_q – индекс конкретных условий наблюдения для q -й ситуации.

К фоновым ситуациям можно отнести также однородные зоны, устойчивые, например, к изменению метеорологических факторов, выделяемых в результате климатического районирования [4, 10, 44-47].

Таким ситуациям будут соответствовать многомерные условные выборочные плотности распределений признаков для фоновых и фоново-целевых обстановок при фиксированных комплексах условий W_{m_q}

$$\mathcal{F}_\phi^{S_q} [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_q}^\phi, x_i^c], \quad (11)$$

$$\mathcal{F}_{\phi u}^{S_q} [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_q}^{\phi u}, x_i^c], \quad (12)$$

где x_i^c – вектор признаков (свойств) фоновых ситуаций для их классификации.

С учетом того, что фоновые ситуации состоят из ограниченного набора МОО, распределения (11) и (12) можно представить в виде взвешенных (по вероятности наблюдения) сумм выборочных плотностей распределений признаков для наблюдаемых МОО ($P_f^{F_k^{MO}}$)

$$\mathcal{F}_\phi^{S_q} [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_q}^\phi, x_i^c] = \sum_{k=1}^{K_q} \mathcal{F}_\phi^{F_k^{MO}} [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_q}^\phi, x_i^c] P(F_k^{MO} / W_{m_q}^\phi), \quad (13)$$

$$\mathcal{F}_{\phi u}^{S_q} [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_q}^{\phi u}, x_i^c] = \sum_{k=1}^{K_q} \mathcal{F}_{\phi u}^{F_k^{MO}} [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_q}^{\phi u}, x_i^c] P(F_k^{MO} / W_{m_q}^{\phi u}), \quad (14)$$

где $P(F_k^{MO} / W_{m_q}^f)$ – вероятность наблюдения k -го МОО при комплексе условий $W_{m_q}^f$

Региональные модели фоновых и фоново-целевых обстановок (с учетом наличия в исследуемых регионах различных фоновых ситуаций) могут быть представлены либо в виде взвешенных (по вероятностям наличия этих ситуаций) сумм выборочных плотностей распределений, призна-

ков для фоновых ситуаций ($\hat{P}_f^{S_q}$)

$$\hat{P}_\phi^P [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_p}^\phi] = \sum_{q=1}^Q \hat{P}_\phi^{S_q} [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_q}^\phi] P(W_{m_q}^\phi / W_{m_p}^\phi) P_q, \quad (15)$$

$$\hat{P}_{\phi u}^P [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_p}^{\phi u}] = \sum_{q=1}^Q \hat{P}_{\phi u}^{S_q} [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_q}^{\phi u}] P(W_{m_q}^{\phi u} / W_{m_p}^{\phi u}) P_q, \quad (16)$$

либо в виде множеств этих распределений

$$\hat{P}_\phi^P [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_p}^\phi] = \left\{ \hat{P}_\phi^{S_q} [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_q}^\phi], W_{m_q}^\phi \in W_{m_p}^\phi \right\}_{q=1}^Q, \quad (17)$$

$$\hat{P}_{\phi u}^P [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_p}^{\phi u}] = \left\{ \hat{P}_{\phi u}^{S_q} [L(\mathcal{E}, \Pi, V) / W_{m_q}^{\phi u}], W_{m_q}^{\phi u} \in W_{m_p}^{\phi u} \right\}_{q=1}^Q, \quad (18)$$

где $W_{m_p}^\phi$ и $W_{m_p}^{\phi u}$ – наборы условий в заданном районе для фоновой и фоново-целевой обстановок

соответственно; $P(W_{m_q}^\Phi/W_{m_p}^\Phi)$ и $P(W_{m_q}^{\Phi\Pi}/W_{m_p}^{\Phi\Pi})$ – вероятности реализаций условий $W_{m_q}^\Phi$ и $W_{m_p}^{\Phi\Pi}$ в условиях $W_{m_p}^\Phi$ и $W_{m_q}^{\Phi\Pi}$, характерных для соответствующего района; P_q – априорная вероятность наличия q -ой ситуации в данном районе; Q – общее количество ситуаций.

Поля сигналов для каждой из ситуаций, наблюдаемых в исследуемом регионе S_q^p , могут представляться в виде взвешенных сумм плотностей распределения информативных признаков МОО, из которых состоят эти ситуации:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{\Phi}^{S_q^p}[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W_{m_p}] &= \\ &= \sum_{k=1}^{k_q} \hat{P}_{\Phi}^{F_k^{MO}} [L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W_{m_q}^\Phi, \mathbf{x}_i^c] \times \\ &\times P(F_k^{MO}/W_{m_q}^\Phi)P(W_{m_q}^\Phi/W_{m_p}^\Phi), \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \hat{P}_{\Phi\Pi}^{S_q^p}[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W_{m_p}] &= \\ &= \sum_{k=1}^{k_q} \hat{P}_{\Phi\Pi}^{F_k^{MO}} [L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W_{m_q}^{\Phi\Pi}, \mathbf{x}_i^c] \times \\ &\times P(F_k^{MO}/W_{m_q}^{\Phi\Pi})P(W_{m_q}^{\Phi\Pi}/W_{m_p}^{\Phi\Pi}). \end{aligned} \quad (20)$$

Такие региональные модели могут формироваться, например, из климатически однородных районов или ситуаций, схожих с объектами наблюдения [10, 44–46].

Если в пределах поля обзора $\Sigma_{об}$ аппаратуры ДЗ наблюдается несколько регионов, поля сигналов для которых описываются распределениями (15)–(20), то модели фоновой и фоново-целевой обстановок могут представляться либо в виде множеств условных выборочных плотностей распределения информативных признаков, свойственных этим регионам

$$\begin{aligned} \hat{P}_{\Phi}^{\Sigma_{об}}[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W_{m_{\Sigma}}^\Phi] &= \\ &= \left\{ \hat{P}_{\Phi}^{P_j}[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W_{m_{\Sigma_j}}^\Phi] \right\}_{j=1}^J, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \hat{P}_{\Phi\Pi}^{\Sigma_{об}}[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W_{m_{\Sigma}}^{\Phi\Pi}] &= \\ &= \left\{ \hat{P}_{\Phi\Pi}^{P_j}[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W_{m_{\Sigma_j}}^{\Phi\Pi}] \right\}_{j=1}^J, \end{aligned} \quad (22)$$

где J – общее число регионов в пределах поля обзора, либо в виде их взвешенной суммы вида

$$\begin{aligned} \hat{P}_{\Phi}^{\Sigma_{об}}[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W_{m_{\Sigma}}^\Phi] &= \\ &= \sum_{j=1}^J \hat{P}_{\Phi}^{P_j}[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W_{m_{\Sigma_j}}^\Phi] P_j(W_{m_{\Sigma}}^\Phi), \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \hat{P}_{\Phi\Pi}^{\Sigma_{об}}[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W_{m_{\Sigma}}^{\Phi\Pi}] &= \\ &= \sum_{j=1}^J \hat{P}_{\Phi\Pi}^{P_j}[L(\mathcal{E}, \Pi, V)/W_{m_{\Sigma_j}}^{\Phi\Pi}] P_j(W_{m_{\Sigma}}^{\Phi\Pi}), \end{aligned} \quad (24)$$

где $P_j(W_{m_{\Sigma}})$ – статистический вес условий наблюдения, соответствующий j -му региону.

Каждая из плотностей распределения $\hat{P}_{\Phi}^{P_j}$ и $\hat{P}_{\Phi\Pi}^{P_j}$ в выражениях (21)–(24) описывается аналогично распределениям (15)–(20), только при этом в случае описаний вида (23), (24) с использованием взвешенных сумм (19), (20) учитываются вероятности появления различных МОО в пределах поля обзора

$$P[F_{k,j}^{MO}/W_{m_p,j}, F_{k_1j_1}^{MO}, F_{k_2j_2}^{MO}, \dots, F_{k_sj_n}^{MO}], \quad (25)$$

где $j = 1, 2, \dots, J$ – номер климатически однородного региона; $W_{m_p,j}$ – фиксированный комплекс условий при наблюдении j -го района; F_{k,j_n}^{MO} – реализация в j_n -м регионе k_s -го морфологически однородного образования.

Аналогичным образом производится генерализация наблюдаемых полей сигналов для более крупных зон (континенты, полушария, земной шар в целом и т.п.)

Формой представления статистических моделей полей сигналов на входе дистанционной аппаратуры являются многомерные плотности распределения, их конечномерные представления (двумерные, трехмерные и т.д.), одномерные распределения (см. рисунок) и массивы статистических параметров (математические ожидания, дисперсии, коэффициенты эксцесса, асимметрии и т.п.), характеризующие функции распределения полей энергетических, пространственных и динамических признаков.

С использованием статистического метода разработаны модели фоновых, целевых и фоново-целевых полей, наблюдаемых различными аэрокосмическими системами, и обоснованы принципы формирования баз данных по характеристикам различных объектов, явлений и процессов в атмосфере, океане, на суше и в околоземном космическом пространстве [9, 10, 14–16].

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ
СПЕКТРАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

Одна из важных областей применения статистических методов моделирования полей сигналов на входе аппаратуры ДЗ – описание закономерностей распределения пространственно-частотных характеристик наблюдаемых объектов и фонов. Это обусловлено тем, что регистрируемые аэрокосмическими системами поля излучения испытывают сильные пространственно-временные изменения, связанные с : пространственными и временными градиентами температуры, отражательной и излучательной способности, содержанием оптически активных компонент атмосферы; характеристиками облачности, поверхности океана и суши; положением и пространственной структурой объектов наблюдения и т.п., которые носят, как правило, случайный характер. При этом пространственные неоднородности поля излучения Земли как планеты можно разделить на [1, 2, 10,44-47]:

- неоднородности планетарного масштаба, имеющие размеры от тысяч до десятков тысяч километров;

- неоднородности среднего масштаба, обусловленные макрополями облачности, циклонами, фронтальными зонами, внутритропическими зонами конвергенции, флуктуациями температуры, влажности, оптически активных компонент атмосферы, имеющие размеры от нескольких десятков до тысяч километров;

- неоднородности малого масштаба, обусловленные изменением пространственной структуры поверхности, перепадами яркости облаков и подстилающей поверхности, различных слоев облачности, сочетаниями объектов различной ориентации, температурой, излучательными и отражательными характеристиками, имеющие размеры от десятков метров до десятков километров;

- микромасштабные неоднородности, обусловленные изменением пространственной структуры поверхности, имеющие размеры от единиц сантиметров до десятков метров.

Наиболее приемлемая характеристика для исследования таких случайных пространственных неоднородностей – дву- и одномерные энергетические пространственно-частотные спектры $S'(v_x, v_y)$, где $v_x = 1/x, v_y = 1/y$ - пространственные частоты [10, 13-15,48-55,68].

Пространственные спектры (ПС) играют особую роль для описания пространственной структуры взволнованной поверхности морей и океанов, а также различных явлений, вызывающих изменения этой структуры: внутренних волн, вихревых движений различных масштабов, полей течений, нефтяных загрязнений, антропогенных воздействий и т.п. [10, 13, 14, 48-51]. Это связано с тем, что энергетические спектры, с одной стороны, обеспечивают полное статистическое опи-

сание случайных процессов при нормальных законах распределения, а с другой - характеризуют физические особенности морского волнения, описывая распределение энергии по волновым числам или пространственным частотам [10, 50-55].

Эффективный способ получения двумерных ПС различных объектов, процессов и явлений в океане, атмосфере и на суше - метод дистанционной пространственно-частотной спектрометрии [10,13,14,16,49].

Для обобщения информации об энергетических спектрах необходимо создание пространственных спектральных моделей (ПСМ) фонов, целей и фоновых-целевых обстановок. Такие модели могут строиться в виде многомерных условных выборочных плотностей распределения типа (7), описывающих фоновые, целевые и фоновые-целевые поля, в которых в качестве энергетических характеристик могут использоваться информативные признаки ПС x_i^S

$$\hat{P}_f\{[S'(v_x, v_y) \Rightarrow \{x_i^S\}_{i=1}^I, \Pi(x_i^{\Pi})], \quad (26)$$

$$\mathbf{V}[x_i^S = x_i^S(t), x_i^{\Pi} = x_i^{\Pi}(t)]/W_0^f\},$$

где x_i^{Π} – информативные признаки пространственных характеристик; $\mathbf{V}[x_i^S = x_i^S(t), x_i^{\Pi} = x_i^{\Pi}(t)]$ – динамические признаки, описывающие изменение во времени информативных признаков двумерных ПС и пространственных характеристик.

В качестве информативных признаков двумерных ПС можно использовать [10]:

1. Характеристики формы:

$A = l_1/l_2$, отношение аспекта, где l_1 и l_2 - длины максимальной и минимальной сторон прямоугольника, описываемого вокруг фигуры спектра; $\Phi = s/P_i$ параметр формы; $T = 4\pi s/P_i$ отношение толщины, где s - площадь, а P - периметр фигуры спектра [56]; Θ - ориентация максимальной вытянутости ПС относительно выбранного направления.

2. Топологические свойства, простейшие из которых, например, параметр связности L , который принимает следующие значения: 1 - для односвязных и 0 - для многосвязных фигур, а также число Эйлера $E = C - H$, где C – число связных компонент, H – число дыр [57].

3. Энергетические и структурно-зональные свойства

- распределение энергии в определенных зонах ПС (в полярных координатах):

$$g(\Delta r, \Delta \varphi) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{r_1}^{r_2} r S(r, \varphi) dr, \quad (27)$$

где $\Delta r = r_2 - r_1$ - приращение в радиальном направлении; $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ – приращение в азимутальном направлении;

-распределения энергии в радиальном направлении в пределах $\Delta r = r_2 - r_1$

$$g(\Delta\varphi) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_0^{r_{\max}} rS(r, \varphi) dr, \quad (28)$$

где r_{\max} – максимальное значение радиуса спектра;

-распределение энергии в пределах кольцевой зоны шириной Δr

$$g(\Delta r) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{r_1}^{r_2} rS(r, \varphi) dr; \quad (29)$$

- параметр наклона a для степенной аппроксимации одномерного ПС $S(v) \approx v^{-a}$;

- контрасты спектров для фиксированной пространственной частоты v_0

$$K = -10 \lg S(v_0) / \bar{S}_{mn}^0(v_0), \quad (30)$$

где $S_{mn}(v_0)$ - текущее значение спектров поверхности и исследуемого явления, $\bar{S}_{mn}^0(v_0)$ - среднее значение для исследуемой выборки ПС;

4. Моменты инерции:

$$I_{mn} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (v_x - v_{x0})^m (v_y - v_{y0})^n S(v_x, v_y) dv_x dv_y, \quad (31)$$

где $v_{x0} = \frac{I_{10}^{(j)}}{I_{00}^{(j)}}$, $v_{y0} = \frac{I_{01}^{(j)}}{I_{00}^{(j)}}$ – координаты центра тяжести фигуры; I_{00} - момент инерции нулевого порядка, равный площади фигуры; $I_{10}^{(j)}$, $I_{01}^{(j)}$ – моменты первого порядка, являющиеся статистическими моментами инерции двумерных ПС относительно координатных осей, определяемые из соотношения

$$I_{mn}^{(j)} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v_x^m v_y^n S(v_x, v_y) dv_x dv_y. \quad (32)$$

В качестве пространственных признаков различных природных образований используются: поперечные L_{nn}^n и продольные L_{np}^n размеры локальных элементов; расстояния между ними l_n , форма пятен Φ_n ; поперечные L_{nn}^0 и продольные L_{np}^0 размеры крупномасштабных областей; плотность пятен ρ_n в пределах областей; форма областей Σ_0 и др.

Построение ПСМ для различных видов исследуемых полей (фоновые ситуации, регионы, континенты и т.п.) производится по технологии, описанной выше.

Пространственные спектральные модели разрабатывались для различных явлений на поверхности

океана, облачных полей и объектов суши, а также для модели фона Земли как планеты [10, 16]. Так, например, разработаны двумерные ПСМ для следующих процессов и явлений на поверхности океана:

- однородной (без видимых проявлений пространственных неоднородностей) морской поверхности;

- сликовых полей, обусловленных воздействием на морское волнение течений и внутренних волн различного происхождения при различных скоростях ветра W_B , м/с: 0.5-2.0; 2.0-3.0; 3.5-4.5; 4.5-6.0; 7.0-9.0 м/с;

- нефтяных загрязнений;

- областей, подверженных антропогенным воздействиям, связанным со сбросом в прибрежные акватории промышленных, хозяйственных и бытовых вод и др.

В ПСМ однородной морской поверхности распределение таких информативных признаков, как отношения аспекта, толщины, параметр формы, ориентация, контраст, параметр наклона ПС $\{x_i\} \Rightarrow \{A, T, \Phi, \theta, K^{mn}, a^{mn}\}$, подчиняются нормальному закону [10, 48]

$$p(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} x_i^2\right),$$

где σ^2 – дисперсия.

В то же время для таких явлений, как сликовые поля, нефтяные загрязнения, зоны антропогенных воздействий (например, связанных со сбросами сточных вод и т.п.), признаки ПС — контрасты и параметры наклона ПС $\{x_i\} \Rightarrow \{K^{cn}, K^n, K^a, a^{cn}, a^n, a^a\}$, подчиняются γ -распределению [10]

$$p(x_i) = \frac{a(ax_i)^{b-1}}{\Gamma(b)} \exp(-ax_i),$$

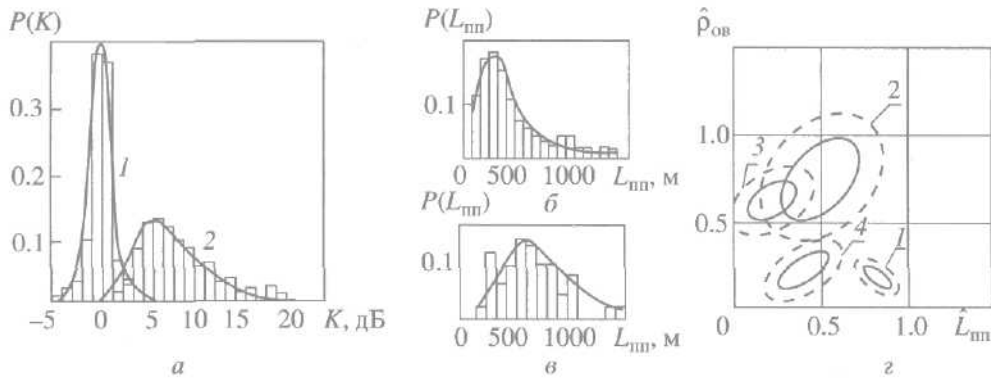
где $b = \gamma/6$; $a = \gamma_1/4$; γ_1, γ_2 - коэффициенты эксцесса и асимметрии соответственно.

На рисунке в качестве примеров представлены конечномерные представления ПСМ различных явлений на поверхности океана:

- гистограммы и аппроксимирующие их функции распределений контрастов спектров морской поверхности (1) и сликового поля (2) для пространственной частоты $v_0 = 0.25 \text{ см}^{-1}$ (рисунок, а);

- гистограммы и аппроксимирующие плотности распределения поперечных размеров сликов L_{nn} для скоростей ветра 2-3 (б) и 7-9 (в) м/с;

- двумерные сечения по уровням σ и 2σ (где σ - среднеквадратическое отклонение) в пространстве признаков относительная плотность пятен $\hat{\rho}_{on}$ (сликов) - относительный поперечный размер этих пятен (сликов) (\hat{L}_{mn}) (г) для однородной морской поверхности (1) и сликовых



Конечномерные представления пространственной спектральной модели морской поверхности и сликовых полей: *a* – гистограммы и аппроксимирующие их плотности распределений контрастов спектров морской поверхности (1) и сликового поля (2) для пространственной частоты $\nu = 0.25 \text{ см}^{-1}$ (длина волны 4 см); *б, в* – гистограммы и аппроксимирующие их плотности распределений поперечных размеров сликов $L_{\text{шп}}$ для скоростей ветра 2–3 (*б*) и 7–9 (*в*) м/с; *з* – двумерные представления многомерных пространственных спектральных моделей по уровням σ (сплошные линии) и 2σ (пунктир) в пространстве признаков: относительная плотность пятен “выглаживания” (сликов) $\hat{\rho}_{\text{ов}}$ и относительный поперечный размер пятен $L_{\text{шп}}$ для однородной морской поверхности (1) и сликовых полей при скоростях ветра 0.5–2.0 (2); 4.5–6.0 (3); 7.0–9.0 м/с (4).

полей при скоростях ветра 0.5-2.0 (2), 4.5-6.0 (3) и 7.0-9.0 (4) м/с.

Аналогичные модели разработаны применительно к описанию пространственных спектров различных образований на суше и в атмосфере [10,16].

СТРУКТУРНЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как уже отмечалось, при моделировании полей сигналов на входе аппаратуры дистанционного зондирования множество наблюдаемых объектов можно представить в виде набора определенных образом расположенных образований различных типов (фоновых ситуаций, морфологически однородных образований, однородных природных объектов), каждый из которых может быть использован в качестве производного элемента для моделирования всего фоново-целевого поля [10, 58]. Описание взаимного расположения таких произвольных элементов в пределах сложных многокомпонентных полей с помощью статистического метода осуществить невозможно.

Для решения подобной задачи можно использовать структурные методы, позволяющие формализовать взаимное расположение элементарных ячеек (производных элементов) в пределах всего исследуемого поля [58, 59].

Если описание характеристик производных элементов сложного поля осуществляется с использованием статистического метода, то метод моделирования всего поля можно назвать структурно-статистическим.

Другой способ описания сложных многокомпонентных полей — структурно-лингвистический метод, при использовании которого проводится

аналогия между структурой моделируемого поля и синтаксисом языка, а также используется аппарат математической лингвистики [10, 58-60, 62]. В соответствии с этим методом производится разбиение областей изменений значений информативных признаков x_i ($i = 1, \dots, n$), характеризующих производные элементы, на интервалы $(\Delta x_i)_j$, где $j = 1, \dots, J$ – номера интервалов. Это позволяет выделить исходные символы, из которых формируется “алфавит” для грамматического описания. Описание поля сигналов можно произвести с использованием контекстно-свободных грамматик [10, 59, 61, 62] в виде

$$G = (V_N, V_T, P_n, O_n), \tag{33}$$

где V_N - множество нетерминальных символов (промежуточных элементов грамматического описания - предложений, слов), обозначающих производные элементы фоново-целевого поля, и подмножество вспомогательных символов, используемых при формировании грамматики; V_T - множество терминальных символов (неделимых элементов грамматического описания – букв), описывающих дискретные значения $(\Delta x_i)_j$ на которые разбиваются диапазоны изменения $[x_{i \min}, x_{i \max}]$ информативных признаков производных элементов фоново-целевого поля; P_n - множество правил вывода терминальных символов из нетерминальных; $O_n \in V_N$ - начальный символ (в нашем случае рассматриваемая фоново-целевая обстановка).

При моделировании полей сигналов на основании структурно-лингвистического метода каждому производному элементу, например МОО, присваивается символ, соответствующий типу фоновой (фоново-целевой) ситуации, к которому он

принадлежит. Каждому информативному признаку x_i присваивается символ из множества V_T , соответствующий диапазону $(\Delta x_i)_i$, в который попадает его значение. Затем производится формирование множества P_n , включающего в себя правила выбора типа [10,62]:

1) для первого уровня иерархии, моделирующего взаимное положение производных элементов, $O_n \rightarrow A_i, i \in [1, N]$, где $A_i \rightarrow F_k^{H3}$ – номер производного элемента типа F_k^{H3} (например, МОО) в пределах моделируемого поля; $k = [1, \kappa]$ – индекс группы производных элементов;

2) для второго уровня иерархии, описывающего характеристики производных элементов $F_k^{H3} \rightarrow d_1 k_1, k_1 \rightarrow d_2 k_2, \dots, k_j \rightarrow d_{j+1} k_{j+1}, k_{j-2} \rightarrow d_{j-1} k_{j-1}$, где $d_j \in V_T$ – терминальные символы, соответствующие диапазону, в который попадает значение i -го признака; k_j – нетерминальный символ, обозначающий часть грамматического описания, оставшуюся после формирования символов;

3) СЛЕВА (F_j^{H3}, F_r^{H3});

4) НАД (F_j^{H3}, F_r^{H3});

5) ВНУТРИ (F_j^{H3}, F_r^{H3}), где $j, r = [1, k], j \neq r$.

В результате реализации перечисленных правил образуется множество нетерминальных символов $V_N = \{k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_{j-2}, A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_N\}$ и множество терминальных символов $V_T = \{F_1^{H3}, F_2^{H3}, \dots, F_i^{H3}, \dots, F_k^{H3}, d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_k\}$.

Восстановление грамматик можно производить с использованием подхода, позволяющего на основе эвристических правил при данных производных элементах F_r^{H3} и правилах вывода P_n построить грамматику, являющуюся аппроксимацией заданного множества грамматических описаний [34].

Для выявления различий между формируемыми грамматиками, а также степени принадлежности грамматического описания какого-либо поля одной из ранее сформированных грамматик можно применить методика, основанную на использовании межклассовых расстояний [10, 33, 34]. С этой целью определяется минимум расстояния $d^*(X, G_r)$ между сформированным грамматическим описанием X и $G_r = [1, k_r]$, где k_r – количество грамматик как наименьшее число преобразований, требуемых для вывода формируемого грамматического описания из математических описаний $J_r^t, t = [1, T_r]$, где $(T_r$ – количество грамматических описаний), составляющих грамматику G_r . Под преобразованиями в нашем случае подразумеваются процедуры над символами: заме-

ны, сдвига на одну позицию вправо или влево, изъятия или добавления.

Предложенные структурные методы могут быть использованы при моделировании пространственно-неоднородных полей яркости фона Земли, описании пространственной структуры неоднородной морской поверхности и т.п. [9,10,16,62].

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ СИГНАЛОВ НА ВХОДЕ ДИСТАНЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ

Использование статистических и структурно-статистических методов для моделирования полей сигналов на входе дистанционной аппаратуры требует наличия больших объемов априорной информации о характеристиках объектов и фонов, которая удовлетворяла бы аксиоматике теории вероятностей. В связи с этим при моделировании редких явлений, отличающихся минимальным объемом или практическим отсутствием априорных данных, возникают определенные трудности. Для моделирования подобных явлений может быть использован метод, основанный на применении теории нечетких множеств, введенных в работах [60, 64].

Основные проблемы теории нечетких множеств – параметризация семейства определений (конъюнкции, дизъюнкции, отрицания и импликации), а также измерение степени принадлежности и классификации в нечетких категориях [60, 63-65].

Нечетким подмножеством G_i , множества U_i , называется множество упорядоченных пар $G_i = [\mu_{G_i}(x_i), x_i]$, где $x_i \in U_i$, $\mu_{G_i}(x_i)$ – функция принадлежности нечеткого подмножества G_i отображающего множество U_i в единичный отрезок $[0, 1]$ [60, 63-65].

Функция принадлежности $\mu_{G_i}(x_i)$, роль которой близка к роли функции плотности вероятности в математической статистике, — основное понятие теории нечетких множеств [63-67]. При этом следует отметить, что для функции принадлежности условие нормировки $\int_{-\infty}^{\infty} \mu(x_i) dx_i = 1$, а также свойство неубывания на отрезке $[0, 1]$ не являются обязательными [66].

При моделировании с использованием нечетко-множественного подхода некоторое стандартное высказывание A , описывающее конкретную реализацию поля сигналов, можно представить в виде конъюнкции элементарных высказываний A_1, \dots, A_n (где n – число информативных признаков), описывающих свойства этой реализации $A = \bigcup_{i=1}^n A_i$.

Каждое свойство записывается в форме $A_i: x_i$ есть G_i , где x_i – информативный признак, прини-

мающий значения на универсальном множестве U_i , а G_i – нечетное подмножество множества U_i , являющегося областью определений признака x_i .

При этом элементарное высказывание A_i – индуцирует распределение возможностей [63, 65] x_i , есть $G_i \rightarrow x_{ossx_i} = G_i$.

Например, “параметр формы двумерного пространственного спектра Φ очень мал: $\rightarrow x_{oss\Phi} =$ очень мал”. Высказывание “очень мал” представляет собой нечеткое подмножество множества U_i , на котором определены параметры формы пространственных спектров данной реализации модели.

Прямое произведение нечетких множеств G_1, \dots, G_n на множестве $U = U_1 \times \dots \times U_n$ определяется условием

$$\mu_G(U) = \mu_{G_1}(U_1) \wedge \dots \wedge \mu_{G_n}(U_n). \quad (34)$$

Для точки $U = (U_1, \dots, U_n)$ из множества U стандартное высказывание A можно записать в следующем виде: x есть G , где x – n -мерная переменная (x_1, \dots, x_n)

Тогда x есть $G \rightarrow x_{oss} (x_1, \dots, x_n) = G_1 \times \dots \times G_n$

Выбор функции принадлежности $\mu(x_i)$ – одна из главных и наиболее сложных проблем в теории нечетких множеств. Применительно к каждой конкретной задаче функция принадлежности определяется совокупностью оценочных шкал, факторами разработчика и потребителя, субъективными ценностями исходов и возможностью проявления различных обстоятельств, определяющих эти исходы [63-65].

Для практических целей моделирования полей сигналов на входе аппаратуры ДЗ можно использовать метод формирования функций принадлежности, при котором их вид задается аксиоматически, а параметры оцениваются экспертом.

Возможны различные варианты представления функций принадлежности: например, в виде функции Резникова [61], в виде нормального распределения [60]; в виде S-образных функций [66,67].

Нечеткое множество, характеризуемое функцией принадлежности $\mu(x_i)$, интегрируется как нечеткий интервал вида $\geq \tilde{\beta}$, который характеризуется функцией принадлежности $\mu'(x_i) = 1 - \mu(x_i)$.

Нечеткий интервал вида $[\beta_1, \beta_2]$ характеризуется функциями принадлежности $\mu_1(x_i)$ и $1 - \mu_2(x_i)$, где μ_i , возможно, отличается от μ_2 .

В случае, когда $\mu_1 = \gamma_2$ и $\gamma_1 - \alpha_1 = \alpha_2 - \gamma_2$, нечеткий интервал $[\beta_1, \beta_2]$ сводится к нечеткому числу $\tilde{\gamma}$ с терм-множеством “около”, или “близко”, к γ [62,63].

Следует отметить, что использование перечисленных видов функций принадлежности дает практически одинаковые результаты, так как соответствующим подбором параметров можно добиться их удовлетворительного (с точностью 10-15%) совпадения [62, 66, 67].

Таким образом, моделирование с использованием теории нечетких множеств заключается в задании функции принадлежности для всех информативных признаков моделируемой реализации полей сигналов. Параметры функций принадлежности определяются на основании характеристик реализаций, близких к ним по физическому смыслу, которые моделируются другими методами, а также путем экспертных оценок [10,60, 62].

В отличие от статистического метод моделирования, основанный на применении теории нечетких множеств, позволяет:

- исследовать детерминированные, частично детерминированные и неопределенные явления;
- анализировать одиночные события;
- представлять неопределенность не в виде количественного закона распределения случайной величины, а в виде качественной шкалы, задаваемой функцией принадлежности;
- анализировать события, не имеющие точных количественных списаний.

Недостатками метода моделирования, основанного на теории нечетких множеств, являются меньшая (по сравнению со статистическим методом) точность и определенная степень субъективизма при построении экспертом оценочных шкал, используемых для формирования функции принадлежности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные статистические, структурные и нечетко-множественные методы моделирования полей электромагнитных сигналов на входе аппаратуры ДЗ – это основа информационного подхода к построению моделей полей излучения различных объектов, процессов и явлений, наблюдаемых аэрокосмическими системами. Такие методы могут успешно применяться для систематического накопления баз данных по характеристикам объектов окружающей среды, выбора методов дистанционного зондирования и разработки принципов построения сложных систем.

Разработанные методы моделирования полей входных сигналов могут с успехом применяться для имитационного моделирования и испытаний в компьютерном пространстве аэрокосмических систем в целом, а также их отдельных подсистем и элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кронберг П. Дистанционное излучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии М.: Мир, 1998. 343 с.
2. Дистанционное зондирование природных ресурсов из космоса // ТИИЭР. 1985. Т. 73. № 6. С. 1-223.
3. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. М.: МАИ, 1984. 560 с.

4. *Голицын Г.С.* Изменение климата в XX и XXI столетиях // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1986. Т. 22. № 12. С. 1235-1249.
5. *Кондратьев К.Я.* Глобальная экология и требования к данным наблюдений. СПб.: Наука, 1992. 98 с.
6. *Кондратьев К.Я.* Ключевые проблемы глобальной экологии. М.: ВИНТИ, 1990. 45 с.
7. *Зуев В.Е.* Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
8. *Марчук Г.И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М., 1982. 310 с.
9. *Бондур В.Г., Савин А.И.* Принципы моделирования полей сигналов на входе аппаратуры дистанционного зондирования аэрокосмических систем мониторинга окружающей среды // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 4. С. 24-33.
10. *Бондур В.Г.* Модели полей излучения для систем дистанционного зондирования: Курс лекций. М.: Моск. гос. ун-т геодезии и картографии, 1991. 389 с.
11. *Савин А.И.* Принципы построения космических систем глобального наблюдения // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 1. С. 40-47.
12. *Бондур В.Г., Савин А.И.* Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 6. С. 70-78.
13. *Бондур В.Г.* Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях // Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. 1995. № 1-2. С. 14—38.
14. *Бондур В.Г.* Мониторинг окружающей среды. Курс лекций. М.: Моск. гос. ун-т геодезии и картографии, 1993. 426 с.
15. *Bondur V.G.* Databases Related to characterization of Various Environmental Objects. Yoint U.S.-Russian Ecological / Environmental Seminar. Wash. D.C. May 15-19. 1995. 29 p.
16. *Бондур В.Г., Савин А.И.* Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // Оптика атмосферы и океана, 2000. № 1. С. 27.
17. *Смоктий О.И.* Моделирование полей излучения в задачах космической спектрометрии. Л.: Наука, 1986. 352 с.
18. Математическое обеспечение сложного эксперимента. Т. 3. Основы теории математического моделирования сложных радиотехнических систем / Под ред. Ляшко И.И. Киев: Наук, думка, 1984. 272 с.
19. *Баклашов Н.И., Белюнов А.Н., Солодихин Г.Н. и др.* Натурный эксперимент: Информационное обеспечение экспериментальных исследований. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.
20. *Самарский А.А.* Математическое моделирование и вычислительный эксперимент // Вестн. АН СССР. 1979. №5. С. 38-49.
21. *Харафас Д.И.* Системы и моделирование. М.: Мир, 1967. 312 с.
22. *Булленко Н.П.* Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968. 356 с.
23. *Штофф В.А.* Моделирование и философия. М.: Наука, 1966. 276 с.
24. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерностей в механике. М.: Наука, 1987. 430 с.
25. *Тихонов А.Н.* Математическая модель // БСЭ. Т. 15. М., 1974. С. 480.
26. *Глушков В.М.* Введение в кибернетику. Киев: Изд-во АН УССР, 1964. 390 с.
27. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем. Искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
28. *Гладкий В.С.* Вероятностные вычислительные модели. М.: Наука, 1973. 300 с.
29. Словарь по кибернетике / Под ред. Глушкова В.М. Киев: Сов. энциклопедия, 1979. 452 с.
30. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В.* Комплексная модель возмущений морской среды, вызванных заглубленным сбросом сточных вод // Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. Научные основы создания и применения аэрокосмических систем наблюдения Земли / Под ред. Бондура В.Г., Савина А.И. М.: Наука, 2000. 496 с.
31. *Бондур В.Г., Красоткин В.С., Прокофьева В.В.* Оптические модели газопылевых образований в атмосфере Земли // Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. Научные основы создания и применения аэрокосмических систем наблюдения Земли / Под ред. Бондура В.Г., Савина А.И. М.: Наука, 2000. 496 с.
32. *Красиков В.А., Хатунцева М.В., Штарьков Ю.М.* Параметрические методы распознавания природных образований по материалам многозональных съемок // Аэрокосмические исследования Земли. Обработка видеоинформации на ЭВМ. М.: Наука, 1978. С. 167-176.
33. *Кендалл М.Дж., Стюарт А.* Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 736 с.
34. *Кендалл М.Дж., Стюарт А.* Статистические выводы и связи. М.: Наука. 1973. 900 с.
35. *Тьюки Дж.* Анализ результатов наблюдений. М.: Мир, 1981. 696 с.
36. *Аржененко Н.И., Бондур В.Г.* Распознавание природных образований по результатам зондирования из космоса // Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. С. 208-217.
37. *Бондур В.Г., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. 2000. № 6.
38. *Хьюбер П.* Робастность в статистике. М.: Мир, 1984, 304 с.
39. *Мартин-Леф П.* Очерки по конструктивной математике. М.: Мир, 1978. 432 с.
40. *Попов О.И., Решетникова И.С., Федорова Е.О.* Самолетные измерения спектральной отражательной и излучательной способности облаков в инфракрасной области спектра // Тр. VII межведомств. совещ. по актинометрии и оптике атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. С. 335-338.
41. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков / Под ред. Кондратьева К.Я. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 232 с.
42. *Лобанова Г.И., Федорова Е.О.* Спектральная зависимость показателя рассеяния аэрозоля на высотах до 30 км в области 1.1-3.2 мкм // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 1. С. 29-33.

43. *Веселов Д.П., Лобанова Г.И., Попов О.И., Федорова Е.О.* Спектральные и угловые характеристики отражательной способности ледяных и водяных облаков // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 1. С. 38-42.
44. *Кондратьев К.Я.* Глобальный климат. Л.: Наука, 1992. 359 с.
45. *Монин А.С.* Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеиздат, 1992. 248 с.
46. *Зуев В.Е., Комаров В.С.* Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 264 с.
47. Антропогенные изменения климата / Под ред. Будыко М.Н., Израэля Ю.А. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 406 с.
48. *Бондур В.Г., Воляк К.И.* Оптический пространственный спектральный анализ изображений морской поверхности. Исследование по гидрофизике // Тр. ФИАН СССР. М.: Наука, 1984. С. 63-78.
49. *Бондур В.Г.* Оперативная дистанционная оценка состояния границы раздела атмосфера-океан по пространственным спектрам изображений // Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987.
50. Физика океана. Т. II. Гидродинамика океана. М.: Наука, 1978. 455 с.
51. *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана, Л.: Гидрометеиздат, 1985. 376 с.
52. *Pirson W.J., Moskowitz L.* A proposed spectral form for fully developed Wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodsky // J. Geophys. Res. 1964. V. 69. №24. P. 5181-5190.
53. *Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E. et al.* Measurement of Windwave growth and swell decay during the joint North Sea wave project (JONSWAP) // Dtsch. Hydrogr. Z. 1973. № 12. P. 1-95.
54. *Mitsuyasu H.* Measurement of the high-frequency spectrum of ocean waves // J. of the Phys. Oceanol. 1977. V. 7. №6. P. 882-891.
55. *Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А.* Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 256 с.
56. *Дуда Р., Харт П.* Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 428 с.
57. *Энгелькинг Р.* Общая топология. М.: Мир, 1986. 752 с.
58. *Харалик Р.М.* Статистический и структурный подходы к описанию текстур // ТИИЭР. 1979. Т. 67. №5. С. 98-120.
59. *Фу К.* Структурные методы в распознавании образов. М.: Мир, 1977. 320 с.
60. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
61. *Резников А.П.* Методы принятия решений в условиях неопределенности. М.: Наука, 1976. 259 с.
62. *Бондур В.Г., Ефимов В.А.* Структурно-лингвистические и нечеткие методы моделирования полей излучения на входе дистанционной аппаратуры // Вопр. радиоэлектроники. 1983. № 6. С. 14.
63. *Zadeh L.A.* Fuzzi sets as a Basis for a Theory of Possibility // Fuzzi Sets and Systems. 1978. V. 1, 3. P. 28.
64. *Кофман А.* Введение в теорию нечетких множеств. М.: Радио и связь. 1982. 423 с.
65. Нечеткие множества и теория возможностей / Под ред. Ягера Р. М.: Радио и связь, 1986. 408 с.
66. *Алексеев А.В.* Интерпретация и определение функций принадлежности нечетких множеств // Методы и системы принятия решений. Рига: Рижский политехнический ин-т. 1979. С. 42-50.
67. *Борисов А.И., Алексеев А.В., Меркурьев Г.В. и др.* Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. М.: Радио и связь. 1989. 304 с.
68. *Аржененко Н.И., Бондур В.Г.* Классификация облачных форм по пространственным спектрам изображений // Оптика атмосферы. 1988. № 11. С. 38-15.
69. Методы, процедуры и средства аэрокосмической компьютерной радиотомографии приповерхностных областей Земли / Под ред. Нестерова С.В., Шамаева А.С., Шамаева С.И. М.: Научный мир, 1996. 271 с.
70. *Бондур В.Г., Кулаков В.В., Лобзенкова Н.П.* Алгоритмы классификации пространственных спектров изображений в оптико-цифровых системах обработки. Материалы 6-й Всесоюз. школы-семинара по обработке информации. Фрунзе, 1986. С 148-150.
71. *Чапурский Л.И.* Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400-2500 нм. Ч. I. Издательство Министерства обороны. М.: Прогресс, 1979. 368 с.

The Methods of the Emission Model Field which Be Formed on Enter of Airspace Remote Sensing System

V. G. Bondur

Central Research Institute "Kometa", Moscow

The methods of informational model of electromagnetic emission fields, which are formed on the entrance of airspace remote sensing apparatus, are considered. The statistical and structure method, which used for description detecting signals, as well as, method, which based on using of fuzzy sets, are offered. Uniform nature objects, morphological uniform constitutions and nature events, which have stable properties in determining observation conditions, are using as underivative elements of modeling fields. Offered method application examples, which use to making spatial spectral models to summarize information about spatial-frequency different object characteristics, process and phenomena, those are observed by airspace system, are presented.