

УДК 528.77

|V. V. КИРИЧУК|

**ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДА СРЕДНЕЙ  
КВАДРАТИЧЕСКОЙ КОЛЛОКАЦИИ  
ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

**Предпосылки применения статистического аспекта метода средней квадратической коллокации для обработки аэрокосмических снимков.**

Любое телевизионное или фотографическое изображение участков земной поверхности при аэрокосмической съемке в произвольном спектральном диапазоне представляет собой физическое поле \*.

\* В наших рассуждениях о физических полях мы исходим из следующего положения: «Каждое физическое явление, происходящее в пространстве и времени, образует физическое поле» [5, с. 122].

Оцифрованное тем или иным способом с помощью той или иной шкалы оптических плотностей изображение является численной реализацией двухмерного случайного процесса, в основе которого лежит суперпозиция множества разнородных факторов, задающих различные по своей природе, но тесно взаимодействующие друг с другом реальные физические процессы.

Согласно этому телевизионное или фотографическое изображение участков земной поверхности в произвольном спектральном диапазоне есть «плохо организованная система» [4, с. 6].

Требования к математической модели плохо организованной системы — всесторонний анализ поведения системы с широким применением статистических исследований; полнота модели в смысле адекватного описания системы; простота и эффективность реализации модели на ЭВМ.

**Некоторые задачи обработки данных дистанционного зондирования Земли и их реализация с помощью метода средней квадратической коллокации.**

### 1. Сжатие информации

В качестве математической модели результата определения оптической плотности в узлах исходной разграфки изображения участка земной поверхности на аэрокосмическом теле- или фотоснимке примем модель,ложенную в основу метода средней квадратической коллокации [6],

$$l' = At + s' + n, \quad (1)$$

где  $l'$  —  $q$ -мерный вектор значений оптической плотности в узлах исходной разграфки снимка;  $At$  — детерминированная систематическая составляющая вектора  $l'$  — тренд;  $s'$  — случайные флуктуации оптической плотности изображения участка земной поверхности на снимке, обусловленные суммарным эффектом множества второстепенных факторов, формирующих изображение и не учитываемых трендом  $At$ ;  $n$  — случайные погрешности собственно оценки оптической плотности в узлах исходной разграфки снимка по той или иной шкале оптических плотностей.

Решение уравнения (1) под условием минимизации квадратичной формы

$$[(s+n)^T(s+n)] = \min \quad (2)$$

приводит к оценкам [6]:

а)  $m$ -мерного вектора параметров ( $m < q$ ), определяющих детерминированную составляющую вектора  $l'$  в виде

$$t = (A^T \bar{C}^{-1} A)^{-1} A^T \bar{C}^{-1} l', \quad (3)$$

б)  $p$ -мерного вектора случайных флуктуаций оптической плотности  $s$  ( $p \neq q$ ) как в узлах исходной разграфки изображения участка земной поверхности на снимке, так и в узлах вновь

задаваемой разграфки с требуемой степенью разреженности (либо в любой произвольно заданной системе точек) в виде

$$s = C_{ss'} \bar{C}^{-1} (l' - At). \quad (4)$$

В случае, если детерминированная составляющая вектора  $l'$  равна 0 или если есть основания для априорного выделения тренда  $At$  из исходной информации, то уравнение (1) трансформируется к виду

$$x = s' + n \quad (5)$$

в соответствующим решением под условием (2)

$$s = C_{ss'} \bar{C}^{-1} x, \quad (6)$$

где  $x = (l' - At)$  —  $q$ -мерный вектор остаточных уклонений оптических плотностей в узлах исходной разграфки снимка после выделения тренда  $At$ ;  $A$  — известная здесь и ранее матрица перехода размера  $(q \times m)$ \*.

Полные значения оптических плотностей в узлах вновь задаваемой разграфки с требуемой степенью разреженности (либо в любой произвольно заданной системе точек) определяются с помощью уравнения

$$l = A_1 t + s, \quad (7)$$

где  $l$  —  $p$ -мерный вектор значений оптических плотностей в узлах новой разграфки, причем, поскольку речь идет о сжатии информации, то всегда будет иметь место неравенство  $p < q$  тем более справедливое, чем большая степень сжатия исходной информации должна быть достигнута в результате обработки в соответствии с алгоритмом (1) — (7);  $t$  —  $m$ -мерный (известный теперь) вектор параметров;  $A_1$  — известная матрица перехода, элементы которой вычисляются в соответствии со структурой вновь задаваемой разграфки;  $s$  —  $p$ -мерный вектор случайных флюктуаций оптической плотности, прогнозируемых в соответствии с (6) для узлов новой разграфки.

Как известно [6], отличительной особенностью метода средней квадратической коллокации по сравнению с другими методами сжатия информации при обработке данных дистанцион-

\* Если в качестве математической модели тренда выбран полином  $m$ -й степени, то

$$t = (a_1 a_2 \cdots a_m)^T,$$

$$A (q \times m) = \begin{pmatrix} 1 & v_1 & v_1^2 & \cdots & v_1^{m-1} \\ 1 & v_2 & v_2^2 & \cdots & v_2^{m-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & v_q & v_q^2 & \cdots & v_q^{m-1} \end{pmatrix},$$

где  $a_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) — коэффициенты полинома, определяемые в соответствии с (3), а  $v_i$  ( $i=1, 2, \dots, q$ ) — расстояния до узлов исходной разграфки от условно выбранного начала.

ного зондирования Земли является возможность выполнять на каждом этапе обработки оценку точности как промежуточных, так и окончательных результатов обработки информации.

Оценка точности выполняется согласно следующему алгоритму [6]:

$$E_{tt} = (A^T \bar{C}^{-1} A)^{-1}; \quad (8)$$

$$E_{ss} = C_{ss} - C_{ss'} \bar{C}^{-1} C_{s's} + HAE_{tt} A^T H^T; \quad (9)$$

$$E_{ll} = C_{ss} - C_{ss'} \bar{C}^{-1} C_{s's} + (HA - A_1) E_{tt} (A^T H^T - A_1^T); \quad (10)$$

$$H = C_{ss'} \bar{C}^{-1}; \quad (11)$$

$$\bar{C} = C_{s's} + C_{ll}; \quad (12)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{n^T \bar{R}^{-1} n}{q-m}}, \quad (13)$$

где  $E_{tt}$  — дисперсионно-ковариационная матрица вектора параметров  $t$ ;  $E_{ss}$  — дисперсионно-ковариационная матрица вектора случайных флюктуаций оптических плотностей  $s$  в узлах новой разграфки снимка;  $E_{ll}$  — дисперсионно-ковариационная матрица вектора полных значений оптических плотностей снимка в узлах новой разграфки с заданной степенью разреженности (либо в любой произвольно заданной системе точек);  $\sigma$  — стандарт (среднее квадратическое отклонение) единицы веса.

Если отождествить ошибки определения составляющих векторов  $t, s$  и  $l$  в соответствии с алгоритмом (1)–(7)\* с потерями информации при преобразовании исходного вектора оптических плотностей  $l'$  в вектор  $l$ , соответствующий новой разграфке изображения участка земной поверхности на аэрокосмическом теле- или фотоснимке с заданной степенью разреженности с помощью метода средней квадратической коллокации, то формулы (8)–(13) фактически дают возможность выполнить количественную оценку потерь информации, содержащейся в исходном оцифрованном аэрокосмическом снимке, при сжатии ее с помощью метода средней квадратической коллокации. При этом, благодаря оптимальности решения в смысле определения наиболее точных результатов из тех, которые могли бы быть получены на основании доступной исходной информации [6], потери информации при сжатии ее по методу средней квадратической коллокации минимальны по сравнению с потерями информации при сжатии ее любыми другими известными методами.

Последовательно применяя алгоритм сжатия информации (1)–(7) и алгоритм оценки точности результатов сжатия информации (8)–(13) к значениям оптических плотностей  $l'$

\* Квадраты этих ошибок являются диагональными элементами матриц  $E_{tt}, E_{ss}$  и  $E_{ll}$  соответственно.

исходной разграфке снимка и к их значениям  $l$  в узлах последовательных новых разграфок, соответствующих последовательному возрастанию требуемой степени разреженности информации; можно таким образом достичь любой разумной степени «упаковки» — сжатия исходной информации, содержащейся в оцифрованном теле- или фото-аэрокосмическом снимке участка земной поверхности в произвольном спектральном диапазоне.

В заключение отметим, что решение задачи сжатия информации с помощью метода средней квадратической коллокации по формулам (1)–(13) имеет смысл лишь в том случае, если априори известны матрицы  $C_{ss}$ ,  $C_{s's'}$ ,  $C_{s's}$ ,  $C_{s's'}$ .\*. Эти матрицы по выполняемым ими функциям называются проективными и являются базовыми в методе средней квадратической коллокации. Элементы их находятся с помощью ковариационных функций, определение вида и основных параметров которых осуществляется по общим правилам [6] с учетом, естественно, особенностей исходной информации, заданной в виде оцифрованного по той или иной шкале оптических плотностей аэрокосмического теле- или фотоснимка.

## 2. Распознавание образов

В обосновании статистического аспекта метода средней квадратической коллокации лежит представление о сигнальной (случайной) составляющей изучаемого физического процесса как о реализации некоторого случайного процесса во времени или в конечномерном или бесконечномерном пространстве, структурные свойства которого связаны с природой и структурой самого физического процесса. Поэтому базовыми функциями — функциями ядра (kernel-functions) [6] в Гильбертовом пространстве — в теории метода средней квадратической коллокации являются ковариационные функции, ибо именно они определяют точную математическую структуру случайного процесса, в основе которого лежит объективно существующий реальный физический процесс, посредством закона распространения ковариаций. В решаемой нами задаче под сигнальной (случайной) составляющей физического процесса следует понимать случайные флуктуации оптической плотности в узлах исходной разграфки изображения участка земной поверхности на аэрокосмическом теле- или фотоснимке. Поэтому для корректного применения метода средней квадратической коллокации при сжатии информации о дистанционном зондировании участка земной поверхности необходимо априори знать ковариационную функцию оптических плотностей, соответствующего оцифрованного по той или иной шкале оптической плотности аэрокосмического теле- или фотоснимка.

В этом заключается как недостаток (трудоемкость предварительного статистического анализа поля оптических плотно-

\* Матрица  $C_{ss'}$  — дисперсионная матрица погрешностей оцифровки изображения участка земной поверхности на аэрокосмическом теле- или фотоснимке по той или иной шкале оптических плотностей, как правило, известна, ибо всегда есть априорная информация о погрешностях оцифровки.

стей данного снимка, конечной целью которого является определение вида и основных параметров ковариационной функции), так и преимущество (возможность объединения в рамках одного алгоритма решений задач сжатия информации и распознавания образов) метода средней квадратической коллокации по сравнению с другими известными методами сжатия информации при обработке данных дистанционного зондирования.

Это объясняется тем, что главный этап предварительного статистического анализа поля оптических плотностей аэрокосмического теле- или фотоизображения земной поверхности, а именно районирование изображения на участки стационарные по дисперсии, позволяет установить, с тем или иным наперед заданным уровнем вероятности, статистические структуры изображения, неоднородные в статистическом отношении. Эти структуры, как правило, затем уверенно отождествляются с соответствующими классами объектов земной поверхности и надежно интерпретируются с точки зрения аномальности появления в данном месте и в данное время в связи с особенностями сопутствующих физических явлений и процессов. Таким образом, на этапе предварительного статистического анализа поля оптических плотностей изображения земной поверхности на аэрокосмическом оцифрованном фото- или телеснимке, предшествующем сжатию содержащейся в нем информации с помощью метода средней квадратической коллокации до заданного уровня компактности, одновременно с задачей отыскания вида и основных параметров базовой ковариационной функции решается задача распознавания на снимке образов различных классов объектов земной поверхности.

3. Интерпретация структурных образований поля оптических плотностей телевизионного или фотографического изображения.

Непосредственное отношение к корректному определению вида и основных параметров ковариационных функций, используемых в различных практических приложениях метода средней квадратической коллокации, имеет понятие термина «тренд поля» и способы его выделения. Неадекватное основным закономерностям изучаемого физического процесса выделение детерминированной составляющей тренда поля из реализации соответствующего случайного процесса приводит к смещенным оценкам случайной (сигнальной) составляющей, ибо последняя представляет собой разность исходной информации и выделенной на ее основе тем или иным способом трендовой составляющей. В свою очередь, смещенностъ полученной таким образом случайной составляющей исходной информации приводит к смещенным оценкам основных параметров базовой ковариационной функции метода средней квадратической коллокации, а следовательно, и к смещенным оценкам параметров в решаемых с его помощью задачах.

Сказанное полностью относится и к задачам обработки данных дистанционного зондирования Земли с помощью метода средней квадратической коллокации.

Таким образом, вопросы выделения детерминированной составляющей вектора значений оптических плотностей в узлах исходной разграфки изображения участка земной поверхности на аэрокосмическом теле- или фотоснимке требуют в каждом отдельном случае исследований, конкретно привязанных к типу и природе различных по физической сущности объектов земной поверхности, отраженных на этом снимке.

Из известных трех классов методов выделения трендовых составляющих физических полей — модельные, формально-математические и статистические [3], на наш взгляд, наиболее предпочтителен при обработке данных дистанционного зондирования Земли класс статистических методов, в частности относящийся к этому классу метод, реализованный в работах [1, 2]\*. Это мнение основывается, во-первых, на том, что статистические методы выделения тренда вообще наилучшим образом учитывают объективно существующие в природе многочисленные причинно-следственные связи между отдельными элементами системы в процессе их непрерывного развития и обеспечивают получение случайной составляющей, действительно являющейся отражением совокупного эффекта второстепенных косвенных факторов на развитие системы, а не проявлением белого шума, аппаратурной точности и т. п.; во-вторых, на том, что статистический метод, предложенный в [3], органично вписывается в рамки метода средней квадратической коллокации на стадии предварительного статистического анализа поля оптических плотностей в узлах исходной разграфки.

Как показано в [1, 2], определяемая в рамках этого метода иерархическая последовательность трендовых составляющих исходной информации является отражением объективно существующей иерархии физических структур, порождающих в совокупности изучаемое физическое поле (процесс). Это обстоятельство позволяет надеяться, что указанный метод выделения тренда даст возможность решать задачи интерпретации структурных образований физического поля оптических плотностей теле- или фотоизображений земной поверхности на аэрокосмических снимках наряду с задачами сжатия информации и распознавания образов в рамках одного и того же метода средней квадратической коллокации.

Применение метода средней квадратической коллокации для обработки данных дистанционного зондирования Земли имеет большую перспективу при решении, по крайней мере, задач сжатия информации, распознавания образов и интерпретации структурных образований на изображениях земной поверхности в виде оцифрованных аэрокосмических теле- и фотоснимков.

В то же время нельзя рассчитывать на его производственное применение в ближайшие сроки, ибо, учитывая комплексность

\* В основе упомянутого метода лежит понятие иерархической последовательности трендовых составляющих изучаемого физического поля [1—3].

информации, содержащейся на теле- и фотоизображениях земной поверхности, необходимо предварительно выполнить поисковые исследовательские работы для решения многих вопросов, касающихся создания эффективной технологии внедрения метода в производство.

1. Евсеева Э. М., Киричук В. В., Графов Е. Б. Современные вертикальные движения земной поверхности Восточной Европы и активные глубинные структуры // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1986. Вып. 43. С. 25—31.
2. Евсеева Э. М., Киричук В. В. Статистический анализ поля современных вертикальных движений Карпато-Балканского региона и активные глубинные структуры. К., 1986. С. 20. Рукопись деп. в УкрНИИТИ, № 256—Ук86.
3. Евсеева Э. М., Киричук В. В. О методах выделения трендовой составляющей поля скоростей СВДЗК // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1986. Вып. 44. С. 41—48.
4. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. М., 1978.
5. Мазмашвили А. И. Способ наименьших квадратов. М., 1968.
6. Moritz H. Least-squares collocation // Véröff. Dtsch. Geod. Kommis. Bayer. A Kad. Wiss. 1973. NA 75. S. 90.

Статья поступила в редакцию 12. 03. 87