

А. В. Жарков, зам. начальника науч.-техн. центра, e-mail: ajarkov@npomis.ru,
Научно-производственное объединение "Мобильные Информационные Системы"

Формирование классификационных признаков распознавания объектов при использовании лазерно-локационных средств их сканирования

Задачу эффективной селекции наземных объектов по результатам использования лазерно-локационного сканирования можно решить при условии достоверного выделения объекта на фоне сложного маскирующего рельефа. Результатом распознавания является идентификация (присвоение рассматриваемому объекту надлежащего и однозначного названия) или классификация (определение принадлежности объекта к заданному классу с оценкой его координат). Идентификация или классификация объектов проводится на основе априорного словаря признаков и алфавита разбиения их на классы.

В статье рассматривается задача формирования априорного алфавита классов на основе априорно составленного словаря признаков распознавания объектов по результатам воздушного лазерно-локационного сканирования.

Ключевые слова: лазерная локация, рельеф, словарь признаков, алфавит классов, распознавание, апостериорная вероятность, априорная вероятность, матрица выигрышей

Введение

Образцы инженерной техники и элементы поверхностного рельефа можно охарактеризовать набором признаков, каждый из которых может принимать непрерывное или дискретное значение, т. е. можно задать некоторое векторное пространство, координаты которого представляют собой пространство признаков. Разработка обобщенного алгоритма формирования пространства признаков, необходимого для надежного разделения классов образов, является одной из наиболее важных и трудоемких задач процесса создания системы с распознаванием.

Для решения задачи распознавания наземных объектов (НО) первоначально их нужно разбить на классы. На основе априорных данных об объектах следует описать на языке признаков каждый класс. Из всего перечня признаков надо выделить признаки, которые могут быть реально определены в соответствии с техническими возможностями средств наблюдения. При этом одни признаки имеют качественный характер, другие — количественный. Поэтому в описании классов должны содержаться сведения как о том, присущи или не присущи каждому классу те или иные признаки качественного характера, так и о возможных диапазонах или законах распределения значений признаков, имеющих количественные выражения для каждого класса.

При формировании рабочих алфавита и словаря признаков лазерно-локационного распознавания (ЛЛР) классов НО требуется разрешить противоречия между существующими принципами классификации НО, особенностями современных способов построения признаков пространств и возможностями лазерно-локационного комплекса по оценке информативных признаков объектов. При этом следует учесть, что принцип и детальность классификации в системе ЛЛР определяются требованиями к лазерно-локационному комплексу, которые, в свою очередь, зависят от того, какие решения формируются надсистемой — системой управления, либо оператором-дешифровщиком — по результатам распознавания.

Совокупности признаков, на языке которых проводятся как априорное описание классов НО, так и апостериорное описание распознаваемых НО, необходимые для распознавания в тех или иных алфавитах классов, образуют признаки пространства или, иначе, априорные словари признаков. Априорный словарь признаков включает признаки, относительно которых может быть получена априорная информация, необходимая для описания классов на языке этих признаков с учетом сформулированных принципов распознавания.

Информация, используемая для ЛЛР, содержится в совокупности сигналов, принимаемых лазерной системой. Однако чаще всего, чтобы

распознавать объект, используют определенные измеренные его признаки, которые сопоставляют в соответствии с алгоритмами распознавания (решающими правилами) с известными (эталонными) признаками, совокупность которых образует рабочий словарь признаков.

Для обеспечения требуемой детальности распознавания по ограниченному числу признаков необходимо использовать некоторую иерархическую схему классификации целей и определить в ней место синтезируемым алгоритмам ЛЛР класса НО, результаты которого используются для получения необходимой для принятия решений информации.

Задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом: в условиях априорного описания исходного множества объектов на языке априорного словаря признаков необходимо в пределах выделенных ресурсов определить оптимальный алфавит классов и оптимальный рабочий словарь признаков, которые при наилучшем решающем правиле обеспечивают наиболее эффективное использование решений, принимаемых по результатам распознавания объектов системой управления.

Формирование пространства признаков расознавания наземных объектов

В связи с тем, что высота носителя априори неизвестна и изменяется в некоторых пределах, пространство результатов измерений дальности до поверхности рельефа не может служить информативным признаком отдельных объектов. Поэтому в соответствии с методами распознавания при определении производных элементов и их отношений для конкретных наземных объектов инженерной техники используют отличительные признаки в приведенном к подстилающей поверхности пространстве, что позволяет резко сузить круг поиска отличительных признаков. На первый план выступают признаки, характеризующие продукт инженерного творчества человека. Так, например, конструкцию объектов инженерной техники можно представить набором простых геометрических форм, т. е. она будет иметь преимущественно прямые линии (края), прямые углы, а ее двумерное отображение на заданной высоте будет описываться конечным числом многоугольников.

Более информативные характеристики объектов инженерной техники можно получить из описания их формы, имеющей характерные признаки для каждого класса объектов (железнодорожный транспорт, самолеты на стоянке и т. д.). Например, горизонтальная проекция

объектов бронетанковой техники на высоте $h > 2,7$ м в первом приближении представляет собой прямоугольник с соотношением сторон 1,8:2,3, а железнодорожные четырехосные вагоны на высоте 2...4 м имеют соотношение сторон 4:6. Естественно, что такие признаки формы объектов, как протяженность, не всегда могут быть приняты за отличительный признак, поскольку в зависимости от условия встречи носителя с объектом и формы объекта, к примеру, воздушных линий электропередач, данный признак изменяется в очень больших пределах. Поэтому целесообразно использовать более информативные признаки наземных объектов.

В качестве таких признаков с учетом структуры отраженных полезных сигналов при лазерно-локационной съемке можно принять:

- перепад высоты, который отсчитывается от поверхности Земли до максимального значения высоты;
- крутизну изменения высоты объектов, т. е. приращение высоты на единицу длины, отсчитанной на поверхности Земли;
- степень изрезанности высот объекта;
- интенсивность отраженного импульса;
- координаты и скорость движения объектов (для подвижных объектов) — траекторные признаки.

Косвенные или вспомогательные признаки объектов можно получить из анализа сцены на поверхности: взаимное расположение объектов, характер рельефа, наличие той или иной растительности, водных поверхностей, явно определяемых объектов инфраструктуры (мостов, дорог, взлетно-посадочных полос, коммуникаций и др.). Лазерные изображения достоверно совмещаются с изображениями от других средств: оптических, оптико-электронных, радиоэлектронных, фотографических, что позволяет получать полную информацию о наблюдаемых объектах и местности.

Чтобы можно было отличить искусственный объект от природного, необходимо, чтобы его крутизна превышала крутизну элементов рельефа. В большинстве практических случаев это условие соблюдается.

Следует выбирать такие параметры формы, которые инвариантны к условиям встречи носителя и распознаваемого объекта. Таким параметром может служить, например, коэффициент формы

$$K_{\Phi} = L^2/S,$$

где L — периметр контура двумерного изображения; S — площадь изображения или ее сечение на заданной высоте.

Площади проекции объектов при построчном разложении изменений можно непосредственно определять в процессе сканирования изображения путем суммирования длин отрезков в проекции фигуры с учетом масштаба разложения. Измерение периметра связано с выполнением промежуточных операций и вычислений.

В качестве признака объекта также может служить коэффициент изменения по высоте $\sigma(H)/H$. Указанный признак проявляется при распознавании таких объектов, как дерево, кусты, трава и другие, для которых размер светового пятна меньше отражающего элемента.

По выбранным признакам объемных изображений необходимо разделить сходные между собой изображения на однородные классы, идентифицировать и определить координаты местоположения объектов на фоне подстилающей поверхности.

Особенности решения задачи составления априорного алфавита классов и априорного словаря признаков

Задача составления априорного алфавита классов состоит в определении принципа классификации и разбиении множества объектов в соответствии выбранным принципом на априорно заданное множество классов.

Пусть задано множество НО $\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_z\}$, а также множество возможных управлений (стратегий) $L = \{l_1, \dots, l_k\}$, которые могут быть приняты по результатам решения задачи распознавания НО.

Введем в рассмотрение множество возможных вариантов разбиения всей возможной совокупности НО на классы $A = \{A_1, \dots, A_r\}$.

Будем полагать, что если выбран вариант разбиения A_α , $\alpha = \overline{1, r}$, то множество Ω подразделяется на m_α классов, т. е.

$$A_\alpha : \Omega_q^{A_\alpha} \cap \Omega_g^{A_\alpha} = \emptyset, q, g = \overline{1, m_\alpha}, \Omega_q, \Omega_g \subset \Omega,$$

где $\bigcup_{i=1}^{m_\alpha} \Omega_i^{A_\alpha} = \Omega$, q, g — классы НО.

Информация относительно множества управлений $L = \{l_1, \dots, l_k\}$ позволяет провести исходное разбиение множества объектов на классы — составить априорный алфавит классов. В этом первом варианте разбиения НО на классы $\alpha = 1$, т. е. когда $A_\alpha = A_1$, их число равно $m_\alpha = m_1 = k + 1$. Исходное множество объектов $\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_z\}$ подразделим на подмножества — классы:

$$\Omega \supseteq \{\Omega_1^{A_1}, \Omega_2^{A_1}, \dots, \Omega_{m_1}^{A_1}\}.$$

НО предъявляются для распознавания не непосредственно, а в виде некоторой совокупности наблюдений, образующей контрольную выборку и обычно представляемой в виде матрицы [1]

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p1} & x_{p2} & \dots & x_{pn} \end{pmatrix}.$$

Каждый столбец $x_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi})^T$, $i = \overline{1, n}$, матрицы X представляет собой p -мерный вектор наблюдаемых значений признаков $X_1, X_2, \dots, X_p$, являющихся безразмерными переменными (n — размерность выборки). Совокупность признаков $X_1, X_2, \dots, X_p$ образует пространство признаков ЛЛР.

Пусть первоначальная информация позволяет построить априорное признаковое пространство (составить априорный словарь признаков), описываемое многомерным вектором

$$X_{pr} = \{X_1, X_2, \dots, X_{p_r}\}, X_j = \{x_{j1}, \dots, x_{jn}\}, j = \overline{1, p_r}.$$

Очевидно, что совокупность признаков должна в наибольшей степени отражать те свойства объектов, которые важны для распознавания. При этом от размерности p признакового пространства в значительной степени зависит вычислительная сложность процедур обучения и принятия решения, достоверность распознавания, материальные и трудовые затраты на измерение необходимых характеристик НО, т. е. на получение наблюдений на этапе обучения и принятия решений.

Если выборка X достаточно представительна, то можно путем непосредственной обработки исходной информации определить описания классов. При статистическом подходе к задаче распознавания такими описаниями являются априорные вероятности появления соответствующих классов НО [2]

$$P_{pr} = \{P_q\}_{q=1}^{m_\alpha}, \text{ где } P_q = P(\omega \in \Omega_q^{A_\alpha}), \sum_{q=1}^{m_\alpha} P_q = 1,$$

а также условные многомерные плотности распределения значений признаков по классам, т. е. функции $f_q = f(X_{pr} | \Omega_q^{A_\alpha})$.

Если объем исходной информации недостаточен для непосредственного описания классов НО, то они могут быть получены с помощью процедуры обучения [3, 4]. На этапе обучения при наблюдении НО определенно-го класса по результатам измерений каждого признака из множества X_{pr} формируются характерные области значений и законы распре-

деления признаков, которые ставятся в соответствие каждому классу НО и образуют обучающую выборку.

Наличие описаний классов НО в принципе позволяет определить решающие правила (решающие границы), с помощью которых обеспечивается минимизация ошибок при распознавании неизвестных НО. Разбиение пространства признаков на области, однозначно отождествляющие предъявляемые для ЛЛР классы НО, также должно быть выполнено в некотором смысле рациональным образом. Это означает, что в пространстве признаков требуется выделить области $D_1, \dots, D_{m_\alpha}$, эквивалентные классам. В алгебраической трактовке этой задачи требуется построить в данном пространстве разделяющие функции $F_i(\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_{p_{pr}})$, $i = 1, m_\alpha$, обладающие следующим свойством: если $\mathbf{X}_q = \{X_1, \dots, X_{p_{pr}}\}$ обозначает вектор признаков объекта, принадлежащего к классу Ω_q , то для всех значений вектора $\mathbf{X}_q$

$$F_q(\mathbf{X}_q) > F_g(\mathbf{X}_q); \quad q, g = 1, \dots, m; \quad q \neq g.$$

Пусть в результате наблюдения объекта ω класса q вектор измеренных признаков принял значение $\mathbf{x}$. Тогда в признаковом пространстве системы распознавания граница областей, определяющая правила принятия решений, выражается уравнением

$$d_\alpha : F_q(\mathbf{x}) - F_g(\mathbf{x}) = 0, \quad q \neq g.$$

При решении задачи распознавания мера близости в виде разделяющей функции или функции принадлежности может быть дополнена некоторыми другими условиями, например, весами отдельных признаков или стоимостью принятия тех или иных решений [5]. В алгоритмах распознавания, базирующихся на использовании вероятностных признаков, в качестве меры близости используется риск, связанный с решением о принадлежности распознаваемого объекта к какому-либо классу [6].

Обозначим $C_\alpha = \{c_{qg}^{(\alpha)}\}$, $q, g = 1, m_\alpha$, матрицу выигрышей $c_{qq}^{(\alpha)}$ (штрафов $c_{qg}^{(\alpha)}$, $q \neq g$; $q, g = 1, m_\alpha$), связанных с реализацией возможных решений системой управления или оператором-дешифровщиком при распознавании НО ω , правильно отнесенного к классу $\Omega_q^{A_\alpha}$ (ошибочно отнесенного к классу $\Omega_g^{A_\alpha}$) в варианте классификации A_α .

Если $\overline{P}_{\text{пр}}(\Omega_q^{A_\alpha} | \mathbf{X}_{pr})$ — оценка апостериорной вероятности того, что $\omega \in \Omega_q^{A_\alpha}$ при условии наблюдения $\mathbf{x}$, усредненная по всем возможным значениям признаков априорного словаря, описываемого вектором $\mathbf{X}_{pr}$, то значение

риска, связанного с решением $\omega \in \Omega_g^{A_\alpha}$ в варианте классификации A_α определяется как

$$R_\alpha(\omega \in \Omega_g^{A_\alpha} | \mathbf{x}) = \sum_{q=1}^{m_\alpha} \overline{P}_{\text{пр}}(\Omega_q^{A_\alpha} | \mathbf{X}_{pr}) c_{qg}^{(\alpha)},$$

где $c_{qg}^{(\alpha)}$ — элемент платежной матрицы C , определяющий стоимость принятия решения о принадлежности наблюдаемого объекта классу g , когда на самом деле он принадлежит классу q .

Апостериорная вероятность $\overline{P}_{\text{пр}}(\Omega_q^{A_\alpha} | \mathbf{x})$ правильного решения задачи распознавания определяется в соответствии с известной формулой Байеса[7], а решение вида $\omega \in \Omega_g^{A_\alpha}$ принимается в случае, если

$$R_\alpha(\omega \in \Omega_q^{A_\alpha} | \mathbf{x}) \stackrel{\omega \in \Omega_q^{A_\alpha}}{=} \min_{i=1, m_\alpha} R_\alpha(\omega \in \Omega_i^{A_\alpha} | \mathbf{x}).$$

Оценка $\overline{P}_{\text{пр}}(\Omega_q^{A_\alpha} | \mathbf{X}_{pr})$ может быть получена путем проведения статистических испытаний (метод Монте-Карло) математической модели системы ЛЛР.

Если нет ограничений на объем ресурсов, ассигнованных на построение измерительных устройств, предназначенных для определения признаков $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_{p_{pr}}$, то можно полагать, что основные характеристики системы ЛЛР — алфавит классов НО и словарь признаков — определены и можно приступить к построению системы ЛЛР. В условиях ограничений, когда реализовать априорное признаковое пространство $\mathbf{X}_{pr} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_{p_{pr}}\}$ в полном объеме невозможно, приходится признаковое пространство по сравнению с априорным сокращать, т. е. переходить от априорного словаря признаков к рабочему.

Заключение

Задача составления априорного алфавита классов и априорного словаря признаков НО для системы ЛЛР является актуальной.

Уменьшение числа классификационных признаков снижает затраты на проведение измерений и вычислений, но может привести к падению достоверности распознавания. Если время на обучение и принятие решений жестко ограничено, то повышение размерности признакового пространства может оказаться единственным средством увеличения достоверности до требуемого уровня. Таким образом, с практической точки зрения требования минимума общей размерности задачи распознавания и максимума достоверности оказываются в противоречии. Из этого факта следует большая важность правильного (рационального) форми-

рования алфавита классов и словаря признаков. При этом необходимо учитывать, что система ЛЛР классов НО в составе лазерно-локационного комплекса съемки должна обеспечить наибольшую эффективность действий системы управления и оператора, и, значит, ее алфавит классов целесообразно расширять в пределе до величины $m_\alpha = m_1 = k + 1$, где k — число управленческих решений. Однако при заданном словаре признаков (определяемом возможностями измерительной системы лазерно-локационного комплекса) увеличение числа классов уменьшает вероятность правильного решения задачи распознавания, что сопряжено с уменьшением эффективности системы ЛЛР.

Только некоторый компромисс между размерами алфавита классов и объемом рабочего словаря признаков системы, базирующийся на исходных данных относительно набора возможных решений системы управления и объема ресурсов, которые отпущены на создание измерительной аппаратуры (в данном случае

с учетом энергетических и вычислительных ресурсов лазерно-локационного комплекса и ограничений на время обучения и принятия решений), реализующей словарь признаков, позволяет обеспечить решение задачи построения системы ЛЛР оптимальным образом.

Список литературы

1. Цыпкин Я. З. Основы теории обучения систем. М.: Наука, 1970. 251 с.
2. Фомин Я. А., Тарловский Г. Р. Статистическая теория распознавания образов. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
3. Горелик А. Л., Гуревич И. Б., Скрипкин В. А. Современное состояние проблемы распознавания: Некоторые аспекты. М.: Радио и связь, 1985. 161 с.
4. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
5. Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем. М.: Мир, 1989. 376 с.
6. Шибанов Г. П. Распознавание в системах автоконтроля. М.: Машиностроение, 1973. 424 с.
7. Харт П., Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 509 с.

A. V. Zharkov, Deputy Head of the Science and Technology Center, ajarkov@npomis.ru,
Scientific and Production Corporation "Mobile Information Systems"

Formation of Classification Signs of Object Recognition when Using Laser-Location Means of their Scanning

The task of effective selection of ground-based objects based on the results of the use of laser means of scanning them can be solved provided that the object is reliably selected against the background of a complex masking relief. The recognition result will be identification (assignment of the proper and unambiguous name to the object in question) or classification (determination of the object's belonging to a given class with an estimate of their coordinates). Identification or classification of objects is made on the basis of an a priori dictionary of attributes and the alphabet of their division into classes. In the self-learning recognition system, the feature dictionary can be filled (corrected). The development of a generalized algorithm for the formation of a feature space required for reliable separation of image classes is one of the most important and time-consuming tasks of creating a system with recognition, since in most cases the distinctive features do not have clear boundaries and cannot always be formalized. Selection of features can be carried out in the measurement space and the transformed space. Reducing the number of features reduces the cost of carrying out measurements and calculations, but can lead to a drop in the reliability of recognition. If the time for training and decision making is severely limited, then increasing the dimensionality of the attribute space may be the only means of increasing the reliability to the required level. Thus, from a practical point of view, the requirements of the minimum of the overall dimension of the problem of recognition and the maximum of confidence are in conflict. In this article, the author examines the task of forming an a priori alphabet of classes, based on an a priori compiled dictionary of object recognition features from the results of an airborne laser radar scan.

Keywords: laser location, relief, feature dictionary, class alphabet, recognition, a posteriori probability, a priori probability, matrix of winnings

DOI: 10.17587/it.25.368-372

References

1. Tsypkin Ya. Z. Fundamentals of the theory of teaching systems, Moscow, Nauka, 1970, 251 p. (in Russian).
2. Fomin Ya. A. Tarlovskiy G. R. Statistical Pattern Recognition Theory, Moscow, Radio i Svyaz, 1986, 264 p. (in Russian).
3. Gorelik A. L., Gurevich I. B., Skripkin V. A. The current state of recognition problems: Some aspects. Moscow, Radio i Svyaz, 1985, 161 p. (in Russian).
4. Dubua D., Prade A. Theory of Opportunities, Moscow, Radio i Svyaz, 1982, 432 p. (in Russian).
5. Cooper J., McGill C. Probabilistic methods for analyzing signals and systems, Moscow, Mir, 1982, 376 p. (in Russian).
6. Shibanov G. P. Identification systems of automatic control, Moscow, Mashinostroenie, 1973, 424 p. (in Russian).
7. Hart P., Duda R. Pattern recognition and scene analysis, Moscow, Mir, 1976, 509 p. (in Russian).