АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1999, том 45, № 1, с. 124–127

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.883.77

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К СОВМЕСТНОМУ РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМУ ПОЛЮ

© 1999 г. А. И. Машошин

Лаборатория прикладных акустических исследований
189620 С.-Петербург, Пушкин-4, а/я 10

Поступила в редакцию 30.12.97 г.

Излагается методология совместного решения задач классификации и определения координат подводных объектов по их гидроакустическому полю. В качестве иллюстрации приводится решение относительно простой, но практически важной задачи классификации подводного объекта и определения дистанции до него по данным пассивного гидроакустического средства подводного наблюдения.

В работе [1] автором рассмотрены особенности синтеза алгоритмов классификации подводных объектов по их гидроакустическому полю. Целью данной статьи является изложение одного из подходов к совместному решению задач классификации и определения координат подводных объектов.

В основе совместного решения задач классификации и определения координат подводных объектов по их гидроакустическому полю лежат следующие предпосылки:

1) обе задачи базируются на единой физической основе и, как следствие, решаются с использованием результатов измерения практически одних и тех же параметров сигнала обнаруженного объекта;

2) класс объекта является таким же его параметром, как и координаты. Отличие состоит лишь в том, что класс может принимать только дискретные значения из известного ограниченного счетного множества (алфавита классов);

3) известно, что учет класса объекта позволяет повысить точность определения его координат и, наоборот, учет координат облегчает задачу классификации. Т.е. от совместного решения рассматриваемых задач ожидается повышение эффективности решения каждой из них;

4) совместное решение названных задач за счет исключения дублирования однотипных алгоритмов должно позволить существенно упростить реализующий их вычислитель.

В известных источниках, например [2–4], обе задачи рассматриваются как самостоятельные.

Математически рассматриваемая задача формулируется как задача получения максимально правдоподобных оценок (МП-оценок) класса цели ω и вектора координат $\mathbf{U}$, исходя из вектора оценок параметров сигнала $\hat{\mathbf{X}}$. Согласно теории оптимального оценивания [5], решение сформулированной задачи имеет вид:

$$(\hat{\omega}, \hat{\mathbf{U}}) = \arg\max_{\omega, \mathbf{U}} g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, \mathbf{U}}(\hat{\mathbf{X}}), \qquad (1)$$

где $g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, \mathbf{U}}(\mathbf{x})$ – условная плотность распределения (ПР) вектора $\hat{\mathbf{X}}$ в зависимости от принимающего дискретные значения класса цели $\omega = \omega_j, j = 1, \ldots, m$ и принимающего непрерывные значения вектора координат $\mathbf{U}$.

Следовательно, для определения МП-оценок класса цели ω и вектора координат $\mathbf{U}$ достаточно найти выражение для условной ПР вектора $\hat{\mathbf{X}}$, подставить в него измеренное значение вектора $\hat{\mathbf{X}}$ и найти максимум полученной функции правдоподобия относительно ω и $\mathbf{U}$. Значения ω и $\mathbf{U}$, при которых достигается максимум, и будут их МП-оценками.

Согласно [6], функция $g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, \mathbf{U}}(\hat{\mathbf{X}})$ при выполнении условий нормировки может рассматриваться в качестве совместной ПР скаляра ω и вектора $\mathbf{U}$, на основе которой могут быть получены оценки эффективности принятого решения, а именно апостериорная вероятность правильности осуществленной классификации:

$$P(\hat{\omega}) = \frac{g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, \mathbf{U}}(\hat{\mathbf{X}})}{\sum_{j=1}^{m} g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega_j, \mathbf{U}}(\hat{\mathbf{X}})} \qquad (2)$$

и корреляционная матрица оценок координат, kl-й элемент которой вычисляется по формуле:

$$\|K(\hat{\mathbf{U}})\|_{kl} = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} (U_k - \hat{U}_k) \times \times (U_l - \hat{U}_l) g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, \mathbf{U}}(\hat{\mathbf{X}}) d\mathbf{U}. \quad (3)$$

Из сказанного следует, что центральное место при совместном решении задач классификации и определения координат морских объектов занимает вычисление условной ПР $g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, \mathbf{U}}(\mathbf{x})$, а точнее ПР $g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, \mathbf{U}, \hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(\mathbf{x})$, поскольку, согласно работе [1], эта ПР существенно зависит от текущих условий наблюдения, характеризуемых вектором оцениваемых параметров $\hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}$. Методика синтеза алгоритма вычисления ПР $g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, \mathbf{U}, \hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(\mathbf{x})$ в целом аналогична методике, описанной в работе [1], за тем лишь исключением, что стохастическая модель (11) из [1], лежащая в основе синтеза, при сохранении обозначений работы [1] записывается в виде:

$$\hat{\mathbf{X}} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{U}, \mathbf{\Lambda}, \mathbf{\Gamma}^{(1)}, \mathbf{\Gamma}^{(2)}, \mathbf{Y}), \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\varphi}(\cdot)$ – векторная функция, описывающая фундаментальные физические представления об излучении, распространении, приеме сигналов и измерении их параметров на фоне помех. Строго говоря, эта функция является случайной со случайными аргументами, однако, для некоторого упрощения используемого математического аппарата она принимается неслучайной, а ее случайный характер приписывается и без того случайным аргументам; $\mathbf{\Lambda}$ – вектор состояния объекта классификации, включающий параметры его шумоизлучения (звукоотражения) и движения; $\mathbf{\Gamma}$ – вектор параметров, характеризующих условия наблюдения, состоящий из вектора $\mathbf{\Gamma}^{(1)}$ параметров, поддающиеся оперативному измерению (например, вертикальное распределение скорости звука, волнение поверхности моря, отношение сигнал/помеха), и вектора $\mathbf{\Gamma}^{(2)}$ параметров, оперативное измерение которых затруднено (например, коэффициенты объемного затухания, коэффициенты отражения от границ волновода); $\mathbf{Y}$ – вектор ошибок измерения параметров сигнала.

Окончательное выражение для вычисления искомой ПР при тех же обозначениях принимает вид:

$$g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, \mathbf{U}, \hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(\mathbf{x}) = \frac{d}{d\mathbf{x}} \int_{\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{U}, \boldsymbol{\lambda}, \hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}, \boldsymbol{\gamma}^{(2)}, \mathbf{y}) < \mathbf{x}} \dots \int g_{\mathbf{\Lambda}/\omega, \mathbf{U}}(\boldsymbol{\lambda}) \times \times g_{\mathbf{\Gamma}^{(2)}/\hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(\boldsymbol{\gamma}^{(2)}) g_{\mathbf{Y}/\hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(\mathbf{y}) d\boldsymbol{\lambda} d\boldsymbol{\gamma}^{(2)} d\mathbf{y}. \quad (5)$$

С использованием ПР $g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, \mathbf{U}, \hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(\mathbf{x})$ сравнительно несложно осуществить оценку эффективности алгоритма (1) в различных условиях. В частности, вероятность правильного отнесения объекта класса ω к своему классу в зависимости от его истинных координат $\mathbf{U}$ и условий наблюдения $\mathbf{\Gamma}$ может быть вычислена по формуле:

$$P_{\text{прав}/\omega}(\mathbf{U}, \mathbf{\Gamma}) = \int_{\theta_{\text{прав}/\omega, \mathbf{U}, \mathbf{\Gamma}}} \dots \int g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, \mathbf{U}, \mathbf{\Gamma}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \quad (6)$$

где $\theta_{\text{прав}/\omega, \mathbf{U}, \mathbf{\Gamma}}$ – область, попадание в которую вектора $\hat{\mathbf{X}}$ влечет принятие решения в пользу класса ω. Изменяя область интегрирования, можно аналогичным образом вычислить вероятность отнесения объекта класса ω к чужому классу, а также вероятность отказа от классификации.

В качестве показателя эффективности определения координат объекта может быть использована корреляционная матрица вектора МП-оценок координат. Элементы этой матрицы при условии, что класс объекта определен правильно, рассчитываются по формуле:

$$\|K_{\hat{\mathbf{U}}/\omega}(\mathbf{U}, \mathbf{\Gamma})\|_{kl} = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} (\hat{U}_{k/\omega}(\mathbf{x}) - U_k) \times \times (\hat{U}_{l/\omega}(\mathbf{x}) - U_l) g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, \mathbf{U}, \mathbf{\Gamma}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \quad (7)$$

в которой $\hat{U}_{k/\omega}(\mathbf{x})$ – оценка k-й составляющей вектора координат объекта класса ω, соответствующая вектору оценок параметров x; U_k – истинная величина k-й составляющей вектора координат объекта.

В качестве иллюстрации изложенной методологии совместного решения задач классификации и определения координат подводных объектов по их гидроакустическому полю рассмотрим относительно простой пример, имеющий, однако, важное практическое значение.

Пусть поставлена задача определения класса объекта и дистанции до него непосредственно в момент его обнаружения по информации пассивного ненаправленного гидроакустического буя. Такая постановка задачи означает, что единственным источником информации для ее решения является измеренный спектр шума объекта. То есть вектор $\hat{\mathbf{X}}$ оценок параметров сигнала, используемых для решения рассматриваемой задачи, имеет вид:

$$\hat{\mathbf{X}} = \{\hat{S}_1, \hat{S}_2, \dots, \hat{S}_n\}, \quad (8)$$

где $\hat{S}_i$ – оценка мощности сигнала в i-й частотной полосе (узкой либо широкой); n – число частотных полос.

Стохастическая модель выраженной в децибеллах оценки $\hat{S}_i$ при ряде допущений имеет вид [1]:

$$\hat{S}_i = P_0 + D_i(R, H, \Delta S_0) + Y_i, \quad i = 1, \ldots, n, \qquad (9)$$

где P_0 – приведенная шумность цели, дБ (т.е. акустическое давление, создаваемое объектом, рассматриваемым как монополь, в некоторой узкой полосе Δf_0 с центральной частотой f_0 на некотором малом расстоянии от объекта R_0); $D_i(R, H, \Delta S_0)$ – потери (в децибеллах) в i-й полосе частот при распространении сигнала источника, находящегося на глубине H и на расстоянии от приемника R и имеющего спектр в точке излучения с наклоном ΔS_0; Y_i – ошибка измерения $\hat{S}_i$, дБ.

Случайными в модели (9) являются величины $P_0, R, H, \Delta S_0, Y_i$ и функции $D_i(R, H, \Delta S_0)$ $(i = 1, \ldots, n)$. Учитывая, что из всех них взаимно зависимыми являются только функции $D_i(R, H, \Delta S_0)$, ПР оценки вектора X можно записать в виде, более простом, чем формула (5):

$$g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, R, \hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(\mathbf{x}) = \int_{-\infty}^{\infty} g_{P_0/\omega}(p)dp \int_{0}^{\infty} g_{R/\omega, \hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(r)dr \times$$

$$\times \int_{0}^{\infty} g_{H/\omega, \hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(h)dh \int_{-\infty}^{\infty} g_{\Delta S_0/\omega}(s)ds \longrightarrow \qquad (10)$$

$$\longrightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \ldots \int_{-\infty}^{\infty} g_{D_1, \ldots, D_n/r, h, s, \hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(t_1, \ldots, t_n) \times$$

$$\times \prod_{i=1}^{n} g_{Y_i/\hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(x_i - p - t_i)dt_1 \ldots dt_n.$$

Плотности распределения $g_{P_0/\omega}(p)$, $g_{\Delta S_0/\omega}(s)$, $g_{R/\omega, \hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(r)$ и $g_{H/\omega, \hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(h)$ в правой части формулы (10) являются априорным описанием спектра шумоизлучения и координат объекта каждого класса ω, причем учитывающим текущие условия наблюдения, характеризуемые вектором измеряемых параметров $\hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}$. Получение этих ПР принципиальных сложностей не вызывает. Этого нельзя сказать о вычислении совместной условной ПР потерь на распространение сигнала в различных частотных полосах $g_{D_1, \ldots, D_n/r, h, s, \hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(t_1, \ldots, t_n)$. Один из подходов к ее вычислению изложен в работе [7]. ПР ошибки мощности сигнала в i-й частотной полосе $g_{Y_i/\hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(y_i)$ можно считать нормальной с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, вычисляемой по формуле, приведенной в работе [9].

В результате, алгоритм (1) совместного решения задач классификации и определения координат подводных объектов в рассматриваемом примере принимает вид:

$$(\hat{\omega}, \hat{R}) = \arg\max_{\omega, R} g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, R, \hat{\mathbf{\Gamma}}^{(1)}}(\hat{\mathbf{X}}), \qquad (11)$$

в котором максимизируемая ПР вычисляется по формуле (10).

Эффективность этого алгоритма может быть вычислена по формулам (6) и (7), последняя из которых в рассматриваемом случае принимает вид:

$$\sigma^2_{\hat{R}/\omega}(R, \mathbf{\Gamma}) = \int_{-\infty}^{\infty} \ldots \int_{-\infty}^{\infty} (\hat{R}_\omega(x) - R)^2 g_{\hat{\mathbf{X}}/\omega, R, \mathbf{\Gamma}}(\mathbf{x})d\mathbf{x}, \qquad (12)$$

где $\sigma^2_{\hat{R}/\omega}(R)$ – дисперсия оценки дистанции $\hat{R}$ до объекта класса ω в зависимости от величины истинной дистанции R; $\hat{R}_\omega(\mathbf{x})$ – оценка дистанции до объекта класса ω, соответствующая вектору оценок параметров $\mathbf{x}$.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Предложенный подход к совместному решению задач классификации и определения координат подводных объектов по их гидроакустическому полю учитывает единую физическую основу обеих задач и рассматривает класс объекта как одну из его координат. Отличие этого подхода от известных состоит в учете статистической взаимосвязи используемых для решения обеих задач параметров сигнала объекта каждого распознаваемого класса как между собой, так и с параметрами, характеризующими текущие условия наблюдения.

2. Принципиальным моментом совместного решения задач классификации и определения координат в рамках предложенного подхода, как и в случае решения задачи классификации [1], является получение адекватных плотностей распределения аргументов стохастических моделей используемых параметров сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Машошин А.И.* Особенности синтеза алгоритмов классификации подводных объектов по их гидроакустическому полю // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 3. С. 396–400.

2. *Hayward T.J.* Classification by multiple-resolution statistical analysis with application to automated recognition of marine nammal sounds // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. № 3. P. 1516–1526.

3. *Book P.J., Notle L.W.* Wide-band source localization in the presence of internal waves // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 102. № 5. P. 2597–2606.

4. *Wazenski M., Alexandrou D.* Acitve, wide-band detection and localization in an uncertain multipath environment // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. № 4. P. 1961–1970.

5. *Репин В.Г., Тартаковский Г.П.* Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптации информационных систем. М.: Сов. радио, 1977.

6. *Кендал М., Стьюарт А.* Статистические выводы и связи. М.: Наука, 1973.

7. *Кадашников С.К., Машошин А.И.* Об одном подходе к статистическому описанию канала распространения сигнала в интересах синтеза алгоритмов классификации подводных объектов по их гидроакустическому полю // Акуст. журн. (в печати).

8. *Машошин А.И.* Экспериментальное определение коэффициента вариации оценки мощности гидроакустического сигнала в реальных океанических условиях // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 3. С. 470–473.

An Approach to the Problems of Simultaneous Classification and Localization of Underwater Objects from Their Underwater Sound Fields

A. I. Mashoshin

An approach to the problems of simultaneous classification and localization of underwater objects from their underwater sound fields is presented. The approach is illustrated by solving a relatively simple but practically important problem of classification and ranging of an underwater object from passive underwater acoustic observation data.