УДК 621.396.96

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ЦЕЛЕВЫХ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ

Савченко Д. И.

ОАО Научно-производственная фирма «Меридиан», Санкт-Петербург, Россия (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Блохина, д. 19), e-mail: cfdX@list.ru

Отождествление целевых данных от различных источников информации является эффективным способом повышения полноты и достоверности освещения обстановки в информационно-управляющих системах надводных кораблей и судов. В настоящей статье рассмотрен подход к отождествлению данных об обстановке от двух источников информации. Предлагаются новые оптимальные по критерию максимума апостериорной вероятности универсальное решающее правило и частное решающее правило для отождествления внутри групп предварительно отождествленных формуляров целей. Частное решающее правило построено для случая практически доступных объемов априорной информации о пространственных отношениях между целями. На основе разработанных решающих правил предложена модификация квазиоптимального полиномиального алгоритма отождествления данных от двух источников информации. Полученные результаты могут быть использованы для решения задачи отождествления данных от произвольного числа источников в информационно-управляющих системах надводных кораблей и судов.

Ключевые слова: отождествление, источники информации, информационно-управляющие системы.

ASSOCIATION OF TARGETS DATA FOR INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS OF SURFACE SHIPS AND VESSELS

Savchenko D. I.

Meridian Research and Production Firm, St. Petersburg, Russia (197198, St. Petersburg, street Blokhina, 19), e-mail: cfdX@list.ru

The association of targets data fed by various sources is an effective way to increase comprehensiveness and reliability of covering situation in the information and control systems of surface ships and vessels. This article studies an approach to association of situation data fed by two information sources. A new universal decision rule and a case decision rule optimal by a maximum aposteriori probability criterion are offered for the association within the groups of the pre-associated targets logs. The case decision rule is made for the case of practically accessible scopes of an apriori data regarding the space relationships between targets. Based on the suggested decision rules, a modification of quasi-optimal polynomial algorithm for association of data coming from two sources is offered. The results could be used to solving the task of associating the data fed by any number of sources in information and control systems of surface ships and vessels.

Keywords: association, information sources, information and control systems.

Введение

В настоящее время для информационно-управляющих систем (ИУС) судов и надводных кораблей общей тенденцией является внедрение методов комплексирования данных об окружающей обстановке от различных источников информации (ИИ). Это обуславливается постоянным повышением требований к точности, полноте и достоверности данных, а также стабильности и непрерывности поступления информации по целям, предъявляемых при решении широкого круга задач. Отождествление информации – это процесс принятия решений о принадлежности или непринадлежности данных о целях (формуляров целей), поступивших от разных ИИ, одним и тем же реальным объектам.

Состояние рассматриваемого вопроса

Анализ [4, 5] известных подходов к отождествлению показывает, что большинству из них присущ ряд недостатков, ограничивающих их практическую применимость ввиду невозможности решения задачи в реальном времени или недостаточно высоких вероятностей принятия правильных решений. Однако некоторые приемы, используемые в известных подходах, хорошо обоснованы и могут применяться при разработке новых алгоритмов. К таким приемам можно отнести:

- реализацию процесса отождествления информации от большого числа ИИ в виде последовательности вызовов процедуры отождествления данных от пар ИИ;

- применение двухэтапной схемы построения алгоритма отождествления информации от двух ИИ.

По этой причине данная статья посвящена рассмотрению аспектов отождествления информации от пары ИИ.

Двухэтапная схема алгоритма отождествления информации от двух ИИ предполагает выполнение этапов предварительного и точного отождествления. На первом из них сравнением разностей признаков (координат и параметров движения) из всех пар формуляров целей (ФЦ) от двух ИИ с порогами, вычисляемыми обычно по правилу «трех сигм», принимаются предварительные решения о тождественности ФЦ. На втором этапе формируются непересекающиеся группы предварительно отождествленных ФЦ и выполняется отождествление внутри каждой из них.

В соответствии с [1] выделение групп ФЦ возможно с использованием алгоритма выделения компонент связности графа, множество вершин которого соответствует множеству ФЦ от обоих ИИ, а в множестве ребер содержатся только ребра, инцидентные парам вершин, отвечающих предварительно отождествленным ФЦ. Каждая компонента связности этого графа однозначно определяет группу ФЦ.

Отождествление информации внутри группы представляет собой выбор одного из возможных вариантов отождествления (ВО) внутри группы ФЦ, то есть непротиворечивой совокупности гипотез о принадлежности и непринадлежности всех пар, входящих в эту группу ФЦ одним и тем же реальным целям.

В [3, 4, 5] рассмотрены вопросы отождествления информации внутри группы ФЦ. Однако предложенное там решающее правило (РП) построено в предположении о независимости плотности вероятности нахождения цели в каждой точке пространства признаков от положения других целей. Это приводит к игнорированию априорной информации о возможных пространственных отношениях между целями, что снижает эффективность практического применения данного РП и, следовательно, построенного на его основе алгоритма отождествления внутри группы ФЦ. Поэтому целесообразен синтез

РП, избавленных от этого недостатка.

Решающие правила для отождествления данных внутри групп ФЦ

Исходными данными для отождествления внутри одной группы являются массивы включенных в нее ФЦ от двух ИИ: $U_1 = \{u_{1,1}, u_{1,2} ... u_{1,N_1}\}$ и $U_2 = \{u_{2,1}, u_{2,2} ... u_{2,N_2}\}$, где N_1, N_2 – количество ФЦ от первого и второго ИИ в группе, $u_{i,j}$ – j-ый ФЦ в группе от i-ого ИИ ($i = \overline{1,2}$; $j = \overline{1, N_i}$). Каждый ФЦ содержит L-вектор выработанных ИИ признаков цели $X_{i,j}$ и соответствующую корреляционную матрицу ошибок $\Psi_{i,j}$.

Количество ВО внутри группы ФЦ определяется оценкой [5]:

$$K = \sum_{n=0}^{\min(N_1,N_2)} N_1! \cdot N_2! \cdot \left(n! \cdot (N_1 - n)! \cdot (N_2 - n)!\right)^{-1}. \tag{1}$$

Каждый ВО A_g ($g = \overline{1,K}$) внутри группы может быть описан множеством из $k_g \in \{0,..,\min(N_1, N_2)\}$ пар ФЦ, отождествляемых в соответствии с этим ВО:

$$A_g \to \{y_{g,1}, y_{g,2} ... y_{g,k_g}\} = \{y_{g,m}\}_{m=\overline{1,k_g}}, \tag{2}$$

где $y_{g,m} = \{y^g_{1,m}, y^g_{2,m}\}$ – пара номеров ФЦ от первого и второго ИИ, отождествляемых в соответствии с ВО A_g ($y^g_{1,m}$ – номер ФЦ от первого ИИ, $y^g_{2,m}$ – от второго ИИ).

Синтез РП оптимального алгоритма отождествления данных внутри группы ФЦ формально сводится к определению выражения для апостериорной вероятности ВО и выбору ВО с максимальным ее значением.

Апостериорная вероятность ВО A_g определяется по теореме Байеса:

$$P(A_g | U) = P(A_g) \cdot p(U | A_g) \cdot \left(\sum_{g=1}^{K} P(A_g) \cdot p(U | A_g) \right)^{-1}, \tag{3}$$

где $P(A_g)$ – априорная вероятность ВО A_g;

$p(U | A_g)$ – плотность вероятности данных $U = \{U_1, U_2\}$ при условии правильности ВО A_g.

Выражение для априорной вероятности ВО, выведенное в [4], построено с привлечением практически обоснованных предположений и не требует пересмотра:

$$P(A_g) \approx C_0 \cdot (N_1 + N_2 - k_g)! \cdot (q_2 \cdot q_1)^{N_1 + N_2 - k_g} \cdot (1 - q_2 \cdot q_1)^{-N_1 - N_2 + k_g - 1}, \tag{4}$$

где C_0 – постоянный коэффициент;

q_1, q_2 – вероятности пропуска цели ИИ в области, где расположена группа ФЦ.

Условная плотность вероятности $p(U | A_g)$ ВО A_g в общем случае имеет вид:

$$p(U \mid A_g) = \prod_{i=1}^{N_1}\prod_{j=1}^{N_2} p(u_{1,i}, u_{2,j} \mid h_{i,j}^g) = C_1 \cdot \prod_{m=1}^{k_g} \frac{p(u_{1,y_{1,m}^g}, u_{2,y_{2,m}^g} \mid h_1)}{p(u_{1,y_{1,m}^g}, u_{2,y_{2,m}^g} \mid h_0)} = C_1 \cdot \prod_{m=1}^{k_g} \mu(u_{1,y_{1,m}^g}, u_{2,y_{2,m}^g}), \quad (5)$$

где $h_{i,j}^g \in \{h_0, h_1\}$ – гипотеза, принимаемая в отношении i-ого ФЦ от первого ИИ и j-ого ФЦ от второго ИИ в группе в соответствии с ВО A_g: h_0 – принадлежат разным реальным целям; h_1 – принадлежат одной реальной цели;

$p(u_{1,i}, u_{2,j} \mid h_{i,j}^g)$ – условная плотность вероятности $u_{1,i}$ и $u_{2,j}$ при гипотезе $h_{i,j}^g$;

$C_1 = \prod_{i=1}^{N_1}\prod_{j=1}^{N_2} p(u_{1,i}, u_{2,j} \mid h_0)$ – постоянный коэффициент;

$\mu(u_{1,y_{1,m}^g}, u_{2,y_{2,m}^g})$ – отношение условных плотностей вероятностей измерений $u_{1,y_{1,m}^g}$ и $u_{2,y_{2,m}^g}$ при гипотезах об их принадлежности одной и разным целям.

Можно показать, что выражение $\mu(u_{1,i}, u_{2,j})$ в общем случае определяется следующим образом:

$$\mu(u_{1,i}, u_{2,j}) = \frac{\int\limits_{\Phi} \gamma(X_{1,i}, M, \Psi_{1,i}) \cdot \gamma(X_{2,j}, M, \Psi_{2,j}) \cdot p(M) \cdot dM}{\int\limits_{\Phi}\int\limits_{\Phi} \frac{p(M_2 \mid M_1) \cdot p(M_1) \cdot dM_2 \cdot dM_1}{[\gamma(X_{1,i}, M_1, \Psi_{1,i}) \cdot \gamma(X_{2,j}, M_2, \Psi_{2,j})]^{-1}}}, \quad (6)$$

где M, M_1, M_2 – векторы, характеризующие точки в пространстве признаков;

$\gamma(X, M, \Psi) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left[(X - M)^T \cdot \Psi^{-1} \cdot (X - M)\right]\right) \cdot \left((2 \cdot \pi)^{\frac{L}{2}} \cdot \sqrt{|\Psi|}\right)^{-1}$;

$p(M)$ – плотность вероятности нахождения цели в точке M пространства признаков (для рассматриваемой группы ФЦ);

Φ – множество всех возможных положений цели в пространстве признаков (для рассматриваемой группы ФЦ);

$p(M_2 \mid M_1)$ – плотность вероятности нахождения цели в точке M_2 пространства признаков при условии нахождения другой цели в точке M_1.

Плотности вероятностей $p(M)$ и $p(M_2 \mid M_1)$ позволяют использовать любой объем априорной информации о пространственных отношениях между целями. Это дает возможность говорить об универсальности РП, включающего выражение (6). Однако практическая сложность задания этих плотностей вероятностей делает проблематичным непосредственное использование выражения (6) в реальных алгоритмах. Вместе с тем на основе (6) для конкретных доступных априорных данных возможно построение более простых выражений и, следовательно, частных РП, пригодных для практического применения.

Например, можно ввести предположение, что расчет $\mu(u_{1,i},u_{2,j})$ производится для пары ФЦ, принадлежащих одной цели или двум близлежащим целям. Предположение уместно, так как наибольшую сложность при отождествлении составляет принятие решений именно для ФЦ близлежащих целей. В этом случае, если задаться минимальными расстояниями Δa_v и характерными (максимальными) расстояниями Δb_v между двумя близлежащими целями по v-ому признаку для отождествления (при равенстве значений других признаков), выражение (6) может быть преобразовано к виду:

$$\mu(u_{1,i},u_{2,j}) = \gamma(\Delta X_{i,j},0,\Psi_{i,j}^{\Sigma}) \cdot \left(\omega(\Delta X_{i,j},\Delta B,\Psi_{i,j}^{\Sigma}) - \omega(\Delta X_{i,j},\Delta A,\Psi_{i,j}^{\Sigma})\right)^{-1}, \tag{7}$$

где $\omega(\Delta X,\Delta C,\Psi) = V(\Delta C) \cdot \left(V(\Delta B) - V(\Delta A)\right)^{-1} \cdot \prod_{v=1}^{L} \Upsilon(\Delta x_v, \lambda_v(\Delta c_v,\sigma_{i,j,v}),\Delta c_v,\sigma_{i,j,v})$;

$\Psi_{i,j}^{\Sigma} = \Psi_{1,i} + \Psi_{2,j}$ – суммарная корреляционная матрица ошибок из ФЦ $u_{1,i}$ и $u_{2,j}$; $\sigma_{i,j,v}$ – ее v-ый диагональный элемент;

$\Delta X_{i,j} = X_{1,i} - X_{2,j} = \left\|\Delta x_{i,j,v}\right\|_{v=\overline{1,L}}^{T}$ – вектор разностей признаков из ФЦ $u_{1,i}$ и $u_{2,j}$;

$\Delta B = \left\|\Delta b_v\right\|_{v=\overline{1,L}}^{T}$, $\Delta A = \left\|\Delta a_v\right\|_{v=\overline{1,L}}^{T}$ – векторы характерных и минимальных расстояний между двумя близлежащими целями по каждому признаку для отождествления (при равенстве значений других признаков);

$V(\Delta C) = 2^L \cdot \prod_{v=1}^{L} \Delta c_v$ – объем L-мерного гиперпараллелограмма с длинной стороны по v-ой оси $2 \cdot \Delta c_v$ (Δc_v – v-ый элемент вектора ΔC);

$\omega(\lambda,\sigma,\Delta) = \sqrt{\Gamma(1/\lambda)/\Gamma(3/\lambda)} \cdot \sqrt{\sigma^2 + \Delta^2/3}$;

$\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция;

$\Upsilon(x,\lambda,\Delta,\sigma) = \lambda \cdot \exp\left(-\left|x/\omega(\lambda,\sigma,\Delta)\right|^{\lambda}\right) \cdot \left(2 \cdot \Gamma(1/\lambda) \cdot \omega(\lambda,\sigma,\Delta)\right)^{-1}$;

$\lambda(\Delta,\sigma)$ – показатель степени обобщенного нормального распределения (см. далее).

Значение показателя степени $\lambda(\Delta,\sigma)$ обобщенного нормального распределения для конкретных Δ и σ в (7) определяется из условия нормировки:

$$\frac{1}{2 \cdot \Delta} \cdot \Phi\left(\frac{\Delta}{\sigma}\right) = \frac{\lambda}{2 \cdot \Gamma(1/\lambda) \cdot \omega(\lambda,\sigma,\Delta)}. \tag{8}$$

$\Phi(\cdot)$ – функция Лапласа.

Вместо решения уравнения (8) относительно λ возможно использование аппроксимирующих формул, например, следующего вида:

$$\lambda(\Delta,\sigma) \approx e_2 \cdot \left(\frac{\sqrt{\sigma^2 + \Delta^2/3}}{2\cdot\Delta} \cdot \Phi\left(\frac{\Delta}{\sigma}\right) - e_1 \right)^{-e_4} - e_3, \tag{9}$$

где $e_1 = 0{,}289$; $e_2 = 1{,}0833$; $e_3 = 0{,}8895$; $e_4 = 0{,}438885$.

Величины Δa_v могут быть определены практически всегда – исходя из информации о пространственных отношениях между целями, либо исходя из данных о разрешающих способностях ИИ. На расстояниях по признакам, меньших разрешающих способностей ИИ, две цели не будут разрешаться. Поэтому поступление информации от одного ИИ по двум различным целям, находящимся на меньших расстояниях, невозможно, что отвечает смыслу величин Δa_v. При невозможности указания величин Δb_v они могут быть положены близкими (стремящимися) к Δa_v. Это предположение понизит вероятность правильного отождествления, но даст возможность принимать решения в условиях отсутствия априорных данных о пространственных отношениях между целями.

Модификация алгоритма отождествления данных внутри групп ФЦ

Оптимальный алгоритм отождествления внутри группы ФЦ должен выбирать ВО с максимальным значением (3), с учетом (4), (5) и (6) (в частном случае – (7)). Признак для сравнения ВО в таком алгоритме может быть получен на основе (3) логарифмированием и отбрасыванием постоянных слагаемых:

$$\alpha_1(A_g) = \ln\left((N_1 + N_2 - k_g)! \cdot (q_2 \cdot q_1)^{N_1+N_2-k_g} \cdot (1 - q_2 \cdot q_1)^{-N_1-N_2+k_g-1}\right) + \sum_{m=1}^{k_g} \ln \mu(u_{1,y^g_{1,m}}, u_{2,y^g_{2,m}}) . \tag{10}$$

Аппроксимируя по аналогии с [4] первое слагаемое линейной функцией и отбрасывая постоянные слагаемые, получим:

$$\alpha_2(A_g) = \sum_{m=1}^{k_g} \left(a + \ln \mu(u_{1,y^g_{1,m}}, u_{2,y^g_{2,m}}) \right), \tag{11}$$

где $a = 6 \cdot \left(N^3 + 3 \cdot N^2 + 2 \cdot N\right)^{-1} \cdot \sum_{i=0}^{N} (2 \cdot i - N) \cdot f_1(i)$ – угловой коэффициент аппроксимирующей прямой;

$$f_1(k_g) = \sum_{i=1}^{N_1+N_2-k_g} \ln i + (N_1 + N_2 - k_g) \cdot \ln q_1 \cdot q_2 - (N_1 + N_2 - k_g + 1) \cdot \ln(1 - q_2 \cdot q_1) ;$$

$N = \min(N_1, N_2)$.

Построение алгоритма поиска ВО с максимальным значением признака (11) возможно с использованием логики [4]. В результате, алгоритм сводится к нахождению совершенного паросочетания максимального веса (СПМВ) Q в полном двудольном графе, множество вершин каждой доли которого отвечает множеству ФЦ от одного из ИИ в группе, а вес ребра между любой парой вершин $\{i, j\}$ определяется по формуле:

$$r_{i,j} = \max(a + \ln \mu(u_{1,i}, u_{2,j}), 0). \qquad (12)$$

Конкретнее, множество пар номеров ФЦ от двух ИИ, отождествляемых в соответствии с ВО, максимизирующим признак (11), определяется как:

$$E = \{\{i, j\} \mid [\{i, j\} \in Q] \wedge [a + \ln \mu(u_{1,i}, u_{2,j}) > 0]\}, \qquad (13)$$

где i – номер ФЦ от первого ИИ, отождествляемого с j-ым ФЦ от второго ИИ.

Для поиска СПМВ может быть использован Венгерский метод [2], обладающий сложностью $O(n^3)$, где n – число вершин в большей доле двудольного графа.

Результаты экспериментальных исследований полученных результатов

Экспериментальное исследование проводилось методом математического моделирования. Для отождествления использовались пеленги и дистанции до цели. В качестве обстановки использовался вариант расположения целей, в соответствии с которым цели распределены равномерно в пространстве признаков, причем для любых двух близлежащих целей расстояние по одному признаку равно нулю, а по второму – $d \cdot \sigma_v$, где σ_v – суммарная среднеквадратическая погрешность (СКП) определения соответствующего признака источниками, d – коэффициент. Отношение $\mu(u_{1,i}, u_{2,j})$ определялось по формуле (7). Априорное минимальное расстояние между целями по каждому признаку (при условии равенства значений других признаков) задавалось на основе соотношения между СКП и разрешающей способностью – $\Delta a_v = 1{,}1 \cdot \sigma_v$. Априорные характерные расстояния между парами близлежащих целей задавались равными $\Delta b_v = 2{,}0 \cdot d \cdot \sigma_v$. В результате моделирования было установлено, что высокие вероятности принятия правильных решений (больше 0,75..0,80) достигаются при d >1,6..2,0, то есть при расстояниях между целями хотя бы по одному признаку, превышающих в 1,6..2,0 раза суммарные СКП определения соответствующего признака ИИ.

Заключение

В статье предложено универсальное РП для оптимального по критерию максимума апостериорной вероятности алгоритма отождествления информации от двух ИИ. На основе этого правила синтезировано практически полезное частное решающее правило и предложена модификация квазиоптимального алгоритма.

Сложность алгоритма отождествления в группе ФЦ и, следовательно, всего алгоритма отождествления данных от двух ИИ в общем случае составляет $O(n^3 + n^2 \cdot \chi(\cdot))$, где $\chi(\cdot)$ – сложность нахождения логарифма $\mu(u_{1,i}, u_{2,j})$. При использовании частных РП (например, рассчитывающего $\mu(u_{1,i}, u_{2,j})$ по формуле (7)) $\chi(\cdot) = const$, и сложность алгоритма становится полиномиальной.

Полученная процедура может являться основой для решения задачи отождествления данных от произвольного числа ИИ в ИУС надводных кораблей и судов.

Список литературы

1. Музыченко О. Н., Савченко Д. И. Использование теории графов для отождествления целевой информации // Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов: сборник докладов науч.-техн. конф. – М.: ОАО Концерн «Моринформсистема-Агат», 2009. – С. 132-136.
2. Пападимитриу Х., Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. – М.: Мир, 1984. – 510 с.
3. Савченко Д. И. Алгоритм отождествления информации двух источников для систем управления оружием надводных кораблей // Молодежь. Техника. Космос: труды III Общеросс. молод. науч.-техн. конф. – СПб.: БГТУ, 2011. – С. 134-136.
4. Савченко Д. И. Задача отождествления данных в системах освещения обстановки // Итоги диссертационных исследований. Том 3. – Материалы III Всероссийского конкурса молодых ученых. – М.: РАН, 2011. – С. 149-159.
5. Савченко Д. И. Эвристические алгоритмы для второго этапа отождествления информации // Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов: сборник докладов науч.-техн. конф. – М.: ОАО Концерн «Моринформсистема-Агат», 2011. – С. 42-47.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России по ГК от 11.10.2011 г. № 07.514.12.4023 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 г.».

Рецензенты:

Сикарев Игорь Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор каф. «Комплексного обеспечения информационной безопасности», Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций, г. Санкт-Петербург.

Мальцев Олег Григорьевич, доктор технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории научно-производственного комплекса радиотехнических систем, ФНПЦ ОАО Концерн «Гранит-Электрон», г. Санкт-Петербург.