УДК 621. 396.96 + 519.237

СТРУКТУРИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ЧИСЛА ЦЕЛЕЙ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ

к.т.н. Ю.А. Сиротин
(представил д.т.н., проф. Ю.Н. Седышев)

Предлагается алгоритм оценки числа целей, который строит максимальное значение для введенного лексикографического порядка на структурированном множестве разрешаемых отметок.

В многопозиционных системах радиолокации (МПСРЛ) окончательное решение задачи обнаружения - разрешения - измерения воздушных объектов (ВО) возлагается на систему отождествления и оценки пространственных координат - систему объединения первичной координатной информации (ОПКИ) [1]. Вероятностный характер принятия решений на каждом обнаружителе-измерителе (РЛС или измерительной базы), входящем в систему, определяет постановку и решение задачи отождествления на языке выдвижения и проверки гипотез. Число выдвигаемых гипотез задачи отождествления зависит от числа целей и числа обнаружителей-измерителей (ОИ) как показательная функция с основанием, равным произведению числа отметок от всех ОИ [2], что и определяет вычислительную сложность этой задачи.

Вычислительная сложность задачи отождествления приводит к тому, что при обслуживании большого числа ВО решение задачи отождествления в полном объеме за отведенное время (в режиме real-time) может оказаться нереализуемым и управляющая программа будет вынуждена давать целеуказание на отказ от решения. Однако, при сопровождении ВО целесообразен не отказ от решения, а принятие частичного решения. Одним из таких частичных решений является оценка числа целей по еще неотождествленным отметкам.

1. Постановка задачи. На систему ОПКИ в текущий момент наблюдения от М обнаружителей-измерителей поступают M разнородных, статистически независимых наборов списков $<\vec{X}_1, \vec{X}_2, \ldots, \vec{X}_M>$ векторов первичных измерений от неизвестного числа s целей в текущей лоцируемой зоне.

Каждый, поступивший от k-го ОИ список $\vec{X}_k = <s_k, \{\vec{x}_k(j_k)\}>$, содержит s_k статистически независимых векторов $\{\vec{x}_k(j_k)\}$ $(j_k = 1 \ldots s_k)$ первичных измерений, полученных в системе координат (СК) k – ОИ. Хотя задачи обнаружения и измерения каждым ОИ решаются одновременно, для последующего анализа их целесообразно разделить. Множество обнаруженных отметок k-м обнаружителем определяет отрезок натурального ряда с естественной нумерацией $Z^{(k)} = [1, 2, \ldots, s_k]$ и соответствует факту обнаружения. Набор $\{\vec{x}_k(j_k)\}$ независимых векторов первичных измерений – факту измерения.

В силу независимости принятия решений каждым ОИ, их различной разрешающей способности, возможного необнаружения, ложной тревоги число обнаруженных отметок s_k различно. Среди полученных отметок $Z^{(k)}$ могут быть как истинные $Z_u^{(k)}$ (порожденные лоцируемыми целями), так и ложные отметки $Z_l^{(k)}$. Среди истинных отметок $Z_u^{(k)}$ могут быть отметки, как от одиночных, так и от групповых (неразрешаемых) целей. Таким образом, для каждого множества $Z^{(k)}$ справедливо разбиение $Z^{(k)} = Z_o^{(k)} \cup Z_g^{(k)} \cup Z_l^{(k)}$ (при этом $Z_u{}^{(k)} = Z_o^{(k)} \cup Z_g^{(k)}$). Здесь $Z_o^{(k)}, Z_g^{(k)}$ множества истинных отметок от одиночных целей и от групповых (неразрешаемых) целей, соответственно обнаруженных k-м ОИ.

Обозначим $\vec{Z} = \{Z^{(k)}\}$ упорядоченный набор (вектор) множеств отметок от всех ОИ. Для упорядоченных наборов множеств ложных, групповых и одиночных отметок введем соответственно обозначения $\vec{Z}_l = \{Z_l^{(k)}\}$, $\vec{Z}_g = \{Z_g^{(k)}\}$, $\vec{Z}_o = \{Z_o^{(k)}\}$ $(k = 1 \ldots M)$. Тогда для вектора множеств всех отметок $\vec{Z} = \{Z^{(k)}\}$ справедливо разбиение $\vec{Z} = \vec{Z}_o \cup \vec{Z}_g \cup \vec{Z}_l$ на непересекающиеся подмножества одиночных, групповых и ложных отметок. Отметим, что априори такое разбиение неизвестно, и одной из подзадач задачи отождествления является его установление.

Задача заключается в получении оценки числа целей по множеству отметок $\vec{Z}$, более информативной для трассовой обработки, чем простое среднее $\hat{s} = \frac{1}{M} \sum_{k \geq 1} s_k$.

2. Структура множества отметок и лексикографический порядок. Зафиксируем вектор множеств $\vec{Z}_o = \{Z_o^{(k)}\}$. Обозначим $E_m \subset \vec{Z}_o$ множество отметок, которое содержит одно и то же число отметок $s^{(m)} > 0$ для каких-то m из M обнаружителей. От остальных $M - m$ обнаружителей множество E_m отметок не содержит. Ясно, что $|E_m| = ms^{(m)}$ и $s^{(m)}$ – это число гипотетических целей, обнаруженных и разрешаемых в точности m обнаружителями. Пусть $\vec{E} = \{E_m\}$ $(k = 1..M)$ набор непересекающихся множеств ($E_k \cap E_j = \varnothing$, если $j \neq k$) введенного выше типа, такой что

$$\vec{Z}_o = \bigcup_{k \geq 1} E_k \,. \tag{1}$$

Так как $E_k \cap E_j = \varnothing$, то справедливо

$$\left| Z_o \right| = \sum_{k \geq 1} k\, s^{(k)} \,. \tag{2}$$

Если набор $\vec{E} = \{E_m\}$ непересекающихся множеств удовлетворяет (1) и (2) , то будем говорить, что на множестве $\vec{Z}_o$ задана гипотеза о структуре. Для множества всех структур, заданных на множестве $\vec{Z}_o$, введем обозначение $< \vec{E} \,|\, \vec{Z}_o >$, имея ввиду что

$$< \vec{E} \,|\, \vec{Z}_o > = \left\{ \{E_m\} : E_k \cap E_j = \varnothing, \quad (k \neq j\,) \quad \text{и} \quad \vec{Z}_o = \bigcup_{m \geq 1} E_k \right\}. \tag{3}$$

Набор чисел $\left\{ s^{(m)} \right\}$ можно понимать как значение случайной векторнозначной функции $\vec{S} = \vec{S}(\vec{E})$, которая задана на множестве гипотез о структуре $< \vec{E} \,|\, \vec{Z}_o >$. Каждая компонента этой функции $s^{(k)}(E_k)$ может принимать значения от 0 до $s_{\max}^{(m)}$.

Множество E_m является объединением непересекающихся множеств $E_m = \cup g_j^{(m)} (j = 1..s^{(m)})$, где каждое множество отметок $g_j^{(m)} \subset E_m$ содержит в точности m отметок (не более одной от каждого обнаружителя). Каждое множество отметок $g_j^{(m)}$ определяет гипотезу об отождествлении отметок от одного ВО, которые обнаружены и разрешаются m обнаружителями.

Положим, что множество $\vec{Z}_o$ определено и каждый разрешаемый объект любым ОИ обнаруживается с вероятностью не хуже, чем D. Тогда вероятность p_m обнаружить один объект согласно любой гипотезе типа $g_j^{(m)}$ будет равна $p_m = D^m (1 - D)^{M-m}$. Так как $D > 0{,}5 > (1 - D)$, то

$$p_M > p_{M-1} > \ldots > p_m > p_{m-1} > \ldots.\, p_1 \;\; . \tag{4}$$

Неравенства (4) означают, что компоненты векторного признака $\vec{S}(\vec{E}) = \{s^{(k)}(E_k)\}$ можно упорядочить (ранжировать). Из двух компонент

$s^{(k)}$ и $s^{(i)}$ более «значим» признак, задающий обнаружение на большем числе ОИ.

В силу независимости обнаружения каждого ВО каждым ОИ для распределения вероятностей структурного представления (события) $\vec{E}$ имеем

$$p(\vec{E}) = \prod_{m=1}^{M} p_m^{s^{(m)}(E_m)} . \tag{5}$$

Из (4) следует, что максимальное значение (5) следует искать на структурных представлениях $\vec{E} = \{E_m\}$ $(k = 1..M)$ с возрастающей последовательностью

$$s^{(1)} \le s^{(2)} ... \le s^{(M-1)} \le s^{(M)} \tag{6}$$

компонент векторного признака $\vec{S} = \vec{S}\,(\vec{E})$. При этом для $s^{(M)}$ наиболее правдоподобной оценкой будет максимально допустимое значение

$$\hat{s}^{(M)} = max\,\{s^{(M)}(E_M) : E_M \subset \vec{Z}_o\} . \tag{7}$$

Таким образом, при фиксированном числе $|\vec{Z}_o| = const$ множества отметок, порожденных одиночными объектами, на множестве структурных представлений (3) с помощью векторного признака $\vec{S} = \vec{S}\left(\vec{E}\right)$ можно ввести лексикографический порядок $\succ_S$ [3]. Этот лексикографический порядок характеризует предпочтительность (правдоподобие) гипотез $\vec{E} = \{E_m\}$ ($E_k \cap E_j = \varnothing$, если $j \ne k$, $k, j = 1..M$) о структуре множества $\vec{Z}_o$.

3. Алгоритм структурированной оценки числа целей. Структурированная оценка числа целей строится как алгоритм нахождения максимального значения $\{\hat{s}^{(m)}\} = \max\limits_{\succ_S}(\{s^{(m)}\})$ на множестве (3) для введенного лексикографического порядка, при этом $\hat{s} = \sum\limits_{k \ge 1} \hat{s}^{(k)}$. Порядок определения чисел $s^{(k)} = s^{(k)}\left(E_k\right)$ задается их значимостью от M до 1.

Процедура нахождения максимального элемента строится в виде последовательности однородных этапов нахождения оценки $\hat{s}^{(m)}$ при условии, что найдена подпоследовательность оценок

$$(\hat{s}^{(M)}, \hat{s}^{(M-1)}, \dots, \hat{s}^{(m+1)}),$$

а именно

$$\hat{s}^{(m)} = \max\left\{\hat{s}^{(m)}(E_m) : E_m \subset \vec{E}_o \setminus \left(\bigcup_{k=M}^{m+1} E_k\right)\right\}.$$

На каждом m-м этапе вычисляются индикаторные функций $I_m(k)$ для состава множества обнаружителей с неиспользованными отметками.

Множество $\vec{Z}_o$ назначается по целеуказанию управляющей программы (например [4], цели, пеленги которых близки к направлению измерительной базы, не разрешаются и отметки с таких баз исключаются из алгоритма отождествления), либо совпадает с множеством неотождествленных отметок на момент прерывания отождествления.

В дальнейшем для упрощения изложения полагаем $\vec{Z}_o = \vec{Z}$. Величина $\nu_{m+1} = \sum_{k \geq m+1} \hat{s}^{(k)}$ определяет число объектов, обнаруженных не менее чем $m+1$ обнаружителями. Ясно, что $\nu_m = \nu_{m+1} + \hat{s}^{(k)}$ и $\hat{s} = \nu_1$ дает искомую оценку числа объектов.

На начальном этапе (m= 0) полагается $I_0(i)$= 1 , если $s_i > 0$, иначе $I_0(i)$= 0. Сумма $\lambda_0 = \sum_{i=1}^{M} I_0(i)$ дает число обнаружителей, на которых имеются отметки. Если $\lambda_0 = M$ (ВО обнаружены всеми ОИ), то число целей, обнаруженных и разрешаемых M обнаружителями, находится как $\hat{s}^{(M)} = \min_i s_i$.

Ясно, что так найденная оценка совпадает с оценкой (7).

На m-м этапе (при $m > 0$) последовательно:

1) находится индикаторная функция множества обнаружителей m-го этапа; для $k = 1..M$ полагается $I_m(k) = 1$, если $s_k - \nu_{m+1} > 0$, иначе $I_m(k) = 0$;

2) вычисляется число обнаружителей $\lambda_m = \sum_{i=1,M} I_m(i)$ для нахождения $\hat{s}^{(\lambda_m)}$;

3) если $(\lambda_m < m)$, то полагают $\hat{s}^{(k)} = 0$ для $\lambda_m < k \leq m$;

4) если $\lambda_m = 0$, то вычисления закончены, иначе:

5) находится оценка $\hat{s}^{(\lambda_m)} = \min\{s_k - \nu_{m+1} : I_m(k) = 1\}$;

6) вычисляется $\nu_m = \nu_{m+1} + \hat{s}^{(k)}$ – число объектов, обнаруженных не менее, чем m обнаружителями.

В заключение отметим, что для введенного лексикографического порядка $\succ_S$ максимальный элемент множества $<\vec{E}\,|\,\vec{Z}_o>$ не единственный. Множество таких элементов образует Парето-оптимальное [3] подмножество структур $\{E_k\}_{k\geq 1}$. Предлагаемым алгоритмом такие структуры не находятся (в силу отсутствия информации для их определения).

Выводы. 1. Структурированная оценка $\{\hat{s}^{(k)}\}$ является частичным решением о структуре гипотезы отождествления $\hat{H}_o = \{\hat{g}_j\}_{j=1...S}$. Такая оценка может быть использована для трассовой обработки, если между сканами передается состав ОИ по каждой гипотезе $\hat{g}_j$.

2. Оценка числа целей $\hat{s} = \sum_{k=1}^{M} \hat{s}^{(k)}$, обнаруженных и разрешаемых хотя бы одним обнаружителем, дает верхнюю границу для интервальной оценки числа целей, которая используется в алгоритмах отождествления для сокращения вычислительных затрат.

3. Предлагаемый алгоритм может быть использован для нахождения частичного решения в алгоритмах отождествления, основанных на направленном поиске оптимальной гипотезы отождествления (например, на методе ветвей и границ [4]).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / Под ред. В.В. Цветнова. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.*
2. *Сиротин Ю.А. Математическая модель задачи отождествления в многопозиционных системах радиолокации // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 1(17). – С. 198 – 203.*
3. *Подиновский В.Д., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982. – 256 с.*
4. *Сиротин Ю.А. Метод ветвей и границ в задаче отождествления для трехбазовой системы пассивной локации // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ. – 2002. – Вип. 3(41). – С. 105 –109.*

Поступила 07.10.2002

***СИРОТИН Юрий Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры ХВУ. В 1974 году окончил ХГУ. Область научных интересов – обработка неоднородной информации в вычислительных системах, имитационное математическое моделирование.*