

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 M обнаружителей-измерителей поступают M разнородных, статистически независимых наборов списков $\langle \vec{X}_1, \vec{X}_2, \dots, \vec{X}_M \rangle$ векторов первичных измерений от неизвестного числа s целей в текущей лоцируемой зоне.

Каждый, поступивший от k -го ОИ список $\vec{X}_k = \langle s_k, \{\vec{x}_k(j_k)\} \rangle$, содержит s_k статистически независимых векторов $\{\vec{x}_k(j_k)\}$ ($j_k = 1 \dots s_k$) первичных измерений, полученных в системе координат (СК) k - ОИ. Хотя задачи обнаружения и измерения каждым ОИ решаются одновре-

менно, для последующего анализа их целесообразно разделить. Множество обнаруженных отметок k -м обнаружителем определяет отрезок натурального ряда с естественной нумерацией $Z^{(k)} = [1, 2, \dots, s_k]$ и соответствует факту обнаружения. Набор $\{\bar{x}_k(j_k)\}$ 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 $\bar{Z} = \{Z^{(k)}\}$ упорядоченный набор (вектор) множеств отметок от всех ОИ. Для упорядоченных наборов множеств ложных, групповых и одиночных отметок введем соответственно обозначения $\bar{Z}_l = \{Z_l^{(k)}\}$, $\bar{Z}_g = \{Z_g^{(k)}\}$, $\bar{Z}_o = \{Z_o^{(k)}\}$ ($k = 1 \dots M$). Тогда для вектора множеств всех отметок $\bar{Z} = \{Z^{(k)}\}$ справедливо разбиение $\bar{Z} = \bar{Z}_o \cup \bar{Z}_g \cup \bar{Z}_l$ 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 \bar{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 $\bar{Z}_o = \{Z_o^{(k)}\}$. Обозначим $E_m \subset \bar{Z}_o$ 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 $\bar{E} = \{E_m\}$ ($k = 1 \dots M$) набор непересекающихся

множеств ($E_k \cap E_j = \emptyset$, если $j \neq k$) введенного выше типа, такой что

$$\bar{Z}_o = \bigcup_{k \geq 1} E_k . \quad (1)$$

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

$$|Z_o| = \sum_{k \geq 1} k s^{(k)} . \quad (2)$$

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

$$\langle \bar{E} | \bar{Z}_o \rangle = \left\{ \{E_m\} : E_k \cap E_j = \emptyset, (k \neq j) \text{ и } \bar{Z}_o = \bigcup_{m \geq 1} E_k \right\} . \quad (3)$$

Набор чисел $\{s^{(m)}\}$ можно понимать как значение случайной векторнозначной функции $\bar{S} = \bar{S}(\bar{E})$, которая задана на множестве гипотез о структуре $\langle \bar{E} | \bar{Z}_o \rangle$. 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 \bar{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

$$p_M > p_{M-1} > \dots > p_m > p_{m-1} > \dots > p_1 . \quad (4)$$

Неравенства (4) означают, что компоненты векторного признака $\bar{S}(\bar{E}) = \{s^{(k)}(E_k)\}$ 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

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

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

$$s^{(1)} \leq s^{(2)} \dots \leq s^{(M-1)} \leq s^{(M)} \quad (6)$$

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

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

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

3. Алгоритм структурированной оценки числа целей. Структурированная оценка числа целей строится как алгоритм нахождения максимального значения $\{\hat{s}^{(m)}\} = \max_{\succ_S} (\{s^{(m)}\})$ на множестве (3) для введенного лексико-

графического порядка, при этом $\hat{s} = \sum_{k \geq 1} \hat{s}^{(k)}$. Порядок определения чисел

$s^{(k)} = s^{(k)}(E_k)$ 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

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

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

Множество \bar{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 $\bar{Z}_o = \bar{Z}$. Величина $v_{m+1} = \sum_{k \geq m+1} \hat{s}^{(k)}$ определяет число объектов, обнаруженных не менее чем $m+1$ обнаружителями. Ясно, что $v_m = v_{m+1} + \hat{s}^{(m)}$ и $\hat{s} = v_1$ дает исковую 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 $s_k - v_{m+1} > 0$, 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 $\hat{s}^{(\lambda_m)} = \min \{s_k - v_{m+1} : I_m(k) = 1\}$;

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

В заключение отметим, что для введенного лексикографического порядка \succ_S максимальный элемент множества $\langle \bar{E} | \bar{Z}_o \rangle$ 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 $\hat{H}_o = \{\hat{g}_j\}_{j=1 \dots S}$. 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.