

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ДИСКРЕТНОГО ПОИСКА И ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

к.т.н. Г.В. Худов

(представил д.т.н., проф. Д.В. Голкин)

Кратко анализируются основные результаты решения задач поиска и обнаружения объектов в информационных системах. Уточняется байесовское правило принятия решения при совместной оптимизации дискретного поиска и обнаружения объектов.

Постановка проблемы в общем виде. В настоящее время целый класс информационных систем используется для решения задачи поиска и обнаружения объектов в условиях ограниченного поискового потенциала [1 – 4]. В статье оценивается возможность снижения требований к поисковому потенциалу за счет совместной байесовской оптимизации поиска и обнаружения объектов. Целью исследований является уменьшение времени поиска и обнаружения объектов путем оптимизации пространственно-временного распределения поискового потенциала. Учитывается специфика функционирования информационной системы в режиме дискретного поиска.

Анализ последних достижений и публикаций. Задачи поиска и обнаружения объектов в информационных системах решаются в настоящее время независимо друг от друга [5, 6]. Приведенные в работе [7] методы оптимизации рассматривают поиск и обнаружение как единую задачу только в постановочном плане, решения получены для отдельных составляющих поставленной задачи. Первая попытка решить задачу совместной оптимизации поиска и обнаружения предпринята в [8]. Для случая непрерывного обзора некоторой области Ω сформулировано уточненное байесовское правило принятия решения об обнаружении объекта, заключающееся в том, что при решении задачи проверки простой гипотезы против простой альтернативы совместная оптимизация поиска и обнаружения объектов сводится к нахождению равномерно-оптимальной стратегии поиска [5], вычислению максимума безусловного отношения правдоподобия в текущей зоне обзора и сравнению его с порогом.

Распространим результаты, полученные в [8], на случай решения зада-

чи дискретного поиска и обнаружения неподвижного одиночного объекта.

Постановка задачи и изложение материалов исследований. Рассмотрим задачу совместной байесовской оптимизации дискретного поиска и обнаружения объектов. Для этого будем использовать критерий минимума среднего риска – среднего значения платы за принятие решения при проверке статистических гипотез [6].

Для дальнейших исследований разобьем зону поиска Ω на N подобластей Ω_i , таких, что $\sum_{i=1}^N \Omega_i = \Omega$. Среднее значение риска в подобласти Ω_j обозначим как R_j .

Введем в рассмотрение текущую зону поиска $\Omega(t_j) = \sum_{j(t_j)} \Omega_j$, где j – номер подобласти поиска и обнаружения объекта в момент времени t_j (j указывает порядковый номер подобласти, в которой осуществляется поиск и обнаружение объекта в момент времени t_j). Поставим задачу нахождения оптимального байесовского правила принятия решения в текущей дискретной зоне поиска $\Omega(t_j)$. При такой постановке задачи появляется дополнительный параметр оптимизации: текущие размеры и положение дискретной зоны $\Omega(t_j)$ в общей зоне Ω . Следовательно, создаются условия для нахождения оптимальной по байесовскому критерию минимума среднего риска стратегии совместного поиска и обнаружения объекта в зоне поиска дискретной структуры. Решение такой задачи, как в теории поиска, так и в теории обнаружения ранее отсутствовало.

Согласно [6, 8] среднее значение риска в текущей зоне поиска $\Omega(t_j)$ теперь может быть найдено как

$$R(t_j) = \sum_{\Omega(t_j)} R_j = R_0 - ((\Pi_{10} - \Pi_{11}) \sum_{\Omega(t_j)} P_{1j}(\gamma_1, t_j) - (\Pi_{01} - \Pi_{00}) \sum_{\Omega(t_j)} P_{0j}(\gamma_1, t_j)), \quad (1)$$

где $P_{1j}(\gamma_1, t_j)$ – текущее значение безусловной вероятности правильного обнаружения объекта в j -й подобласти на момент времени t_j ; $P_{0j}(\gamma_1, t_j)$ – текущее значение безусловной вероятности ложной тревоги в j -й подобласти на момент времени t_j .

Будем считать, что R_0 – неотрицательная постоянная константа для текущей зоны поиска $\Omega(t_j)$ в момент времени t_j . Байесовское правило проверки простой гипотезы H_0 против простой альтернативы H_1 в

текущей дискретной зоне $\Omega(t_i)$ зоны Ω запишем в следующем виде:

$$\frac{\sum_{\Omega(t_i)} P_{1j}(\gamma_1, t_i)^{\gamma_1}}{\sum_{\Omega(t_i)} P_{0j}(\gamma_1, t_i)^{\gamma_0}} > \frac{\Pi_{01} - \Pi_{00}}{\Pi_{10} - \Pi_{11}}. \quad (2)$$

Переходя к безусловному отношению правдоподобия $l(t_i) = \frac{\sum_{\Omega(t_i)} P_{1j}(\gamma_1, t_i)}{\sum_{\Omega(t_i)} P_{0j}(\gamma_1, t_i)}$, выражение (2) запишем в виде

$$l(t_i) > \frac{\Pi_{01} - \Pi_{00}}{\Pi_{10} - \Pi_{11}}. \quad (3)$$

Таким образом, полученное на основании выражений (1), (2) оптимальное байесовское правило (3) проверки простой гипотезы против простой альтернативы состоит в максимизации безусловного отношения правдоподобия $l(t_i)$ в текущей дискретной зоне $\Omega(t_i)$ и сравнении его с порогом

$$c_b = \frac{\Pi_{01} - \Pi_{00}}{\Pi_{10} - \Pi_{11}}, \quad (4)$$

причем, если $l(t) \geq c_b$, то принимается решение γ_1 (отклоняется гипотеза H_0), если $l(t) < c_b$, то принимается решение γ_0 (принимается гипотеза H_0).

В соответствии с (2) оптимизация должна производиться по параметрам условной вероятности правильного обнаружения $P(\gamma_1/H_1, x)$ в подобластях Ω_j и параметрам текущей дискретной зоны поиска $\Omega(t_i)$.

Рассмотрим важный частный случай. Будем считать, что аналогично критерию Неймана – Пирсона фиксируется на постоянном уровне значение безусловной вероятности ложной тревоги в подобласти Ω_j в момент времени $t_i - P_{0j}(\gamma_1, t_i)$. Тогда согласно (2) нахождение максимума безусловного отношения правдоподобия сводится к нахождению максимума безусловной вероятности правильного обнаружения объекта в текущей дискретной зоне $\Omega(t_i)$.

Таким образом, для нахождения оптимального байесовского правила принятия решения в текущей дискретной зоне $\Omega(t_i)$ общей зоны Ω

наряду с решением задачи проверки гипотез в этой зоне должна быть решена задача нахождения оптимальной по байесовскому критерию минимума среднего риска стратегии поиска объекта. Стратегия поиска $\lambda(\Omega_j, t_j)$ есть правило, которое в любой момент времени t_j устанавливает, в какой области Ω_j зоны должен производиться поиск и с какими энергетическими затратами.

Для дальнейших исследований введем основные ограничения на стратегию поиска, используемые обычно в теории поиска. Потребуем, чтобы стратегия поиска $\lambda(\Omega_j, t_i)$ была T-урезанной, т.е. $\lambda(\Omega_j, t_i) = 0$ при $t_i > T$ и $x \in \Omega$. Иными словами, должно выполняться условие обязательного просмотра зоны Ω за время поиска T. Очевидно, что:

$$\begin{aligned} \lambda(\Omega_j, t_i) &> 0, \text{ для } \Omega_j \in \Omega(t_i); \\ \lambda(\tilde{\Omega}, t_i) &= 0, \text{ для } \tilde{\Omega} \in \Omega/\Omega(t_i). \end{aligned} \quad (5)$$

Будем считать, что стратегия поиска должна быть постоянна для всех подобластей, просматриваемых в фиксированный момент времени t_i . При этом мера текущей зоны $\Omega(t_i)$ состоит из просматриваемых в момент t_i подобластей Ω_j :

$$\Omega(t_i) = \sum_j \Omega_j. \quad (6)$$

Помимо указанных выше свойств стратегии поиска потребуем, чтобы она удовлетворяла условию оптимальности, заключающемуся в том, что если каждой T-урезанной стратегии $\lambda(\Omega_j, t_i)$ соответствует функционал $P(\lambda(\Omega_j, t_i))$ – безусловная вероятность правильного обнаружения объекта на момент времени t_i при стратегии $\lambda(\Omega_j, t_i)$, то стратегия $\lambda_{\text{opt}}(\Omega_j, t_i)$ будет оптимальна, если

$$P(\lambda_{\text{opt}}(\Omega_j, t_i)) = \sup P(\lambda(\Omega_j, t_i)). \quad (7)$$

Потребуем также, чтобы стратегия поиска была оптимальна для любого момента времени T окончания поиска, т.е. в какой бы момент времени поиск не был бы прерван, вплоть до этого момента времени он должен быть оптимальным по критерию максимума безусловной вероятности правильного обнаружения.

Из анализа результатов по выбору стратегий поиска, исследованных в теории поиска, из всех стратегий наиболее полно условиям (5) – (7) удовлетворяет класс равномерно-оптимальных стратегий поиска [5, 8]. Стратегия $\lambda(\Omega_j, t_i)$ равномерно-оптимальна, если ее любая T-урезанная

стратегия оптимальна, т.е.

$$P(\lambda(\Omega_j, t_i) = P(\lambda_{\text{opt}}(\Omega_j, t_i)), \forall t_i \leq T. \quad (8)$$

Таким образом, при решении задачи нахождения по байесовскому критерию минимума среднего риска стратегии поиска и обнаружения объекта оптимальной является равномерно-оптимальная стратегия поиска, в соответствии с которой должны быть выбраны текущие размеры и положение зоны $\Omega(t_i)$ в общей зоне поиска Ω .

В соответствие с (2) при фиксированном на постоянном уровне значении безусловной вероятности ложной тревоги оптимизационная задача формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned} P_1(\gamma_1, t_i) &\rightarrow \max; \\ \lambda(\Omega_j, t_i) &\geq 0, t_i > 0; \\ \sum_{\Omega(t_i)} \lambda(\Omega_j, t_i) &= L_0, t_i > 0; \\ \sum_j \lambda(\Omega_j, t_i) &= \varphi(t_i); \\ \sum_{\Omega(t_i)} \varphi(t_i) &= L_0 t_i, \end{aligned} \quad (9)$$

где $P_1(\gamma_1, t_i)$ – безусловная вероятность обнаружения объекта на момент времени t_i в дискретной зоне поиска $\Omega(t_i)$; L_0 – характеризует мощность поисковой системы [5]; $\varphi(t_i)$ – поисковое усилие в зоне поиска Ω на момент времени t_i .

Как указано в [5], решение оптимизационной задачи (9) для дискретного случая получить достаточно сложно. Поэтому несколько переформулируем оптимизационную задачу (9) и для ее решения воспользуемся подходом, предложенным в [9]. Основной переменной теперь будем считать величину $0 \leq P_{lj} \leq 1$ – условную вероятность того, что объект будет обнаружен при просмотре подобласти с номером l зоны Ω_j при условии, что объект в самом деле находится в зоне Ω_j и ранее не был обнаружен. При этом подразумевается, что просмотры с номерами $1, 2, \dots, l-1$ подобласти Ω_j проводились ранее, причем не обязательно последовательно, один за другим. Введем обозначение $q_{lj} = 1 - P_{lj}$. Пусть зона Ω_j просматривается n_j раз, тогда условная вероятность того, что объект в зоне Ω_j будет обнаружен при просмотре с номером l , есть

$P_{ij} \prod_{i=1}^{l-1} q_{ij}$. Если просматриваются все зоны $\Omega_j, j = \overline{1, N}$, а зона Ω_j просматривается n_j раз, то безусловная вероятность обнаружения объекта в течение этой последовательности просмотров есть

$$\sum_{j=1}^N P_j \sum_{l=1}^{n_j} P_{lj} \prod_{i=1}^{l-1} q_{ij}, \quad (10)$$

где P_j – априорная вероятность распределения местоположения объекта в зоне Ω_j .

Вводя условие $\sum_{j=1}^N n_j S_j \leq C$, где C – общий поисковый потенциал, выделенный за время T , $n_j \in Z = \{0, 1, 2, \dots\}$, S_j – площадь j -й подобласти зоны поиска Ω , получаем следующую оптимизационную задачу:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N P_j \sum_{l=1}^{n_j} P_{lj} \prod_{i=1}^{l-1} q_{ij} \rightarrow \max; \\ \sum_{j=1}^N n_j S_j \leq C; \\ n_j \in Z, j = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (11)$$

В оптимизационной задаче (11) имеется два вида неизвестных величин: поисковые усилия, выраженные целыми числами n_1, n_2, \dots, n_k и зоны $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N$. Перепишем оптимизационную задачу (11) в виде задачи динамического программирования

$$f_N(z) = \max_{n_j, j=1, N} \left\{ \sum_{j=1}^N P_j \sum_{l=1}^{n_j} P_{lj} \prod_{i=1}^{l-1} q_{ij} \right\}, \quad \text{где } \sum_{j=1}^N n_j S_j \leq z. \quad (12)$$

Решая (12) с использованием оптимизационной теории Беллмана [10], получаем оптимальное число просмотров каждой зоны. После нахождения оптимального числа просмотров каждой зоны определим порядок просмотра этих зон. При этом поставим условие обеспечения минимального времени поиска и обнаружения объекта. Для этого воспользуемся отношениями Блэкуэла-Блэка-Кадана [5]:

$$\frac{P_j P(\gamma_1 / H_1, i, j) \prod_{l=1}^{i-1} P(\gamma_1 / H_1, l, j)}{S_j}, \quad (13)$$

где $P(\gamma_1/H_1, i, j) = 1 - \bar{P}(\gamma_1/H_1, i, j)$; i – число просмотров j -й зоны, $i = \overline{1, u_{i-1}^{opt}}$; $j = \overline{1, k}$, k – общее число зон в зоне поиска Ω .

Упорядочив отношения (13) в порядке убывания, решать задачу поиска и обнаружения необходимо в том же порядке.

На основании выполненных исследований можно сформулировать следующее уточненное оптимальное байесовское правило принятия решения: при решении задачи проверки простой гипотезы против простой альтернативы совместная оптимизация дискретного поиска и обнаружения объектов сводится к нахождению равномерно-оптимальной стратегии поиска, вычислению максимума безусловного отношения правдоподобия в текущей дискретной зоне $\Omega(t_j)$ и сравнению его с порогом.

При выполнении указанного правила среднее время до обнаружения объекта может быть вычислено по формуле [5]:

$$T_{cp} = \int_0^T Q(t) dt,$$

где $Q(t)$ – безусловная вероятность необнаружения объекта.

С учетом того, что $Q(t) = 1 - P_1(\gamma_1, t)$ для дискретного поиска и обнаружения запишем

$$T_{cp} = \sum_j (1 - (P_j P_1(t_j))) \Delta t_j,$$

где $P_1(t_j)$ – условная вероятность обнаружения объекта в подобласти Ω_j ; Δt_j – время, отводимое на просмотр подобласти Ω_j ; $\sum_j \Delta t_j = T$.

Для количественных оценок будем считать, что $P_j = P_1(t_j)$, $\Delta t_j = \Delta t$. Рассмотрим два частных случая: а) $P_1 = P_2 = 0,5$; $\Delta t = 0,5T$; б) $P_1 = 0,7$; $P_2 = 0,3$; $\Delta t = 0,5T$. Для этих случаев получаем: а) $T_{cp} \approx 0,75T$; б) $T_{cp} \approx 0,71T$.

Видно, что при совместной оптимизации поиска и обнаружения обеспечивается выигрыш в среднем времени до обнаружения объекта.

Выводы и направления дальнейших исследований.

1. Совместная оптимизация дискретного поиска и обнаружения объектов позволяет уменьшить время и, соответственно, снизить энергетические затраты на обнаружение объектов.

2. Введена в рассмотрение текущая дискретная зона обзора, поставлена и решена задача нахождения оптимального байесовского правила принятия решения во введенной текущей дискретной зоне обзора.

3. Сформулировано уточненное оптимальное байесовское правило принятия решения: при решении задачи проверки простой гипотезы против простой альтернативы совместная оптимизация дискретного поиска и обнаружения объектов сводится к нахождению равномерно-оптимальной стратегии поиска объекта в дискретных ячейках зоны поиска, вычислению максимума безусловного отношения правдоподобия в текущей группе подобластей поиска и сравнению его с порогом.

4. В дальнейших исследованиях необходимо рассмотреть случаи поиска и обнаружения, когда подобласти зоны поиска имеют неодинаковый размер и когда их размер может изменяться в процессе проведения поиска и обнаружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л.М. Митника, С.В. Викторова. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 200 с.*
2. *Гонин Г.Б. Космические съемки Земли. – М.: Недра, 1989. – 252 с.*
3. *Гиммельфарб Г.Л. Автоматизированная межотраслевая обработка снимков земной поверхности с ИСЗ серии «Landsat» // ЗРЭ. – 1983. – № 8. – С. 56 – 84.*
4. *Аерокосмічна розвідка в локальних війнах сучасності. Досвід, проблемні питання і тенденції / Л.М. Артюшин, С.П. Мосов, Д.В. П'ясовський, В.Б. Толубко. – К.: НАОУ, ЖВІРЕ, 2002. – 207 с.*
5. *Хеллман О. Введение в теорию оптимального поиска. – М.: Наука, 1985. – 246 с.*
6. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.*
7. *Васильев О.В., Меркулов В.И., Карев В.В. Управляемый радиолокационный поиск воздушных целей // Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 1. – С. 49 – 61.*
8. *Голкин Д.В., Худов Г.В. Постановка задачи совместной байесовской оптимизации поиска и обнаружения объектов в радиолокационных системах // Системи обробки інформації. – НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 6 (22). – С. 383 – 389.*
9. *Liepala T. On discretized stationary search. Publication the Inst. Appl. Math. – Univ. of Turku, Finland, 1976, 6.*
10. *Беллман Р. Динамическое программирование / Пер. с англ. И.М. Андреевой. – Под ред. Н.Н. Воробьева. – М.: Изд. иностр. лит. 1960. – 352 с.*

Поступила 4.06.2003

ХУДОВ Геннадий Владимирович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, докторант ХВУ. В 1991 году окончил ЖВУРЭ ПВО. Область научных интересов – поиск и обнаружение объектов в сложных информационных системах.