

И.И. ОБОД, д-р техн. наук, НТУ "ХПИ" (г. Харьков),
А.Э. ЗАВОЛОДЬКО, НТУ "ХПИ" (г. Харьков)

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ОБНАРУЖИТЕЛЯ ТРАЕКТОРИЙ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ ЗАПРОСНЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ ЕДИНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ

Приводится синтез оптимальной структуры обнаружителя траекторий воздушных объектов по данным запросных систем наблюдения в единой постановке вопроса обнаружения в рассматриваемых информационных системах: обнаружитель ответных импульсов, обнаружитель ответных сигналов, обнаружитель воздушного объекта и собственно обнаружитель траекторий. Получены выражения для показателей качества обнаружения траекторий.

Ключевые слова: обнаружитель траекторий, воздушный объект, запросные системы наблюдения, информационная система, ответный сигнал.

Постановка задачи и обзор литературы. Информационное обеспечение, базирующееся на системах наблюдения (СН), в значительной степени определяет решение задач, стоящих перед потребителями. Опыт ведущих стран мира свидетельствует, что в них уже довольно длительный срок существуют национальные единые системы контроля использования воздушного пространства как войсковой, так и гражданской авиацией. Очевидно, что при этом достигается максимальная эффективность использования воздушного пространства при сравнительно низких материальных, технических и людских затратах. Одной из составляющих системы контроля использования воздушного пространства является единая информационная сеть (ЕИС) на базе существующих СН страны. Сетевому построению информационных средств уделяется значительное внимание [1, 2]. Как правило, в ЕИС реализуется распределенная обработка информации. Это приводит к реализации вторичной обработки информации в каждой СН. При этом следует отметить, что в запросных СН [3, 4], которые при реализации принципа автоматического зависимого наблюдения превращаются в один из основных источников информации, вынуждено реализуются и алгоритмы сопровождения воздушных объектов (ВО). Действительно, если для первичных СН теория и практика реализации алгоритмов сопровождения ВО достаточно подробно изложена в [2, 5], то вопросам сопровождения ВО по данным запросных СН уделено незначительное внимание. Запросные СН, решающие классификационную задачу идентификации ВО, построены по принципам: несинхронной сети; открытых одноканальных систем массового обслуживания с отказами [6 – 8]. Это обстоятельство вынуждает рассматривать их как инерционные системы со случайным пропаданием ответных сигналов, характеризующиеся коэффициентом готовности ответчика

(P_0). Это обстоятельство необходимо учитывать при реализации алгоритмов сопровождения ВО по данным запросных СН.

Цель работы. Синтез оптимального обнаружителя траекторий воздушных объектов по данным запросных систем наблюдения.

Обнаружение (захват) траекторий ВО рассматривается, как правило, в виде отдельной структуры, на вход которой поступают данные от устройства первичной обработки СН. Реализация распределенной обработки в ЕИС, которая предполагает реализацию устройств вторичной обработки информации в каждой СН, позволяет рассматривать обнаружение (захват) траекторий ВО в единой постановке вопроса, т.е. исключив разделение обработки на первичную и вторичную. Для запросных СН, с позиций обнаружения это: обнаружение ответных импульсов, обнаружение ответных сигналов, обнаружение ВО и собственно обнаружение (автозахват) траектории.

В такой постановке вопроса обнаружения траектории наблюдатель располагает матрицей реализаций $\bar{X} = x_{ij}$ ($i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, N}$), где $x_{ij} = 1$, если в элементе временного разрешения, соответствующем анализируемому пространственному разрешению, произошло превышение порога; если же не произошло – то $x_{ij} = 0$, n – значность ответных сигналов; m – критерий принятия решения об обнаружении ВО; N – число ответных сигналов в пачке. Следует отметить, что рассматриваемые реализации берутся после линейной обработки и детектирования, с выхода порогового устройства.

Для принятия решения о наличии или отсутствии сигнала совместной обработки подвергается совокупность нулей и единиц x_{ij} . Очевидно, что x_{ij} – случайная величина, подчиняющаяся распределению Бернулли

$$P(x_{ij}) = P_{ij}^{x_{ij}} (1 - P_{ij})^{1-x_{ij}}, \quad (1)$$

где P_{ij} – вероятность превышения порога в i -м временном канале обработки. В отсутствие сигнала $P_{ij} = F_{ij}$ – вероятность ложной тревоги, а при воздействии сигнала $P_{ij} = P_0 D_{ij}$ – вероятность обнаружения сигнала в запросных СН.

Предположим, что на вход устройства совместной обработки принимаемых сигналов поступает совокупность случайных величин x_{ij} . Совместные распределения вероятностей всех возможных комбинаций x_{ij} как в отсутствии, так и при наличии сигнала (гипотезы H_0 и H_1), т.е. $P(x_{ij} | H_0)$ и $P(x_{ij} | H_1)$ произвольны, но известны. Для каждой конкретной совокупности x_{ij} сформируем отношение правдоподобия

$$\Lambda = P(x_{ij} | H_1) / P(x_{ij} | H_0).$$

Сравнение Λ с порогом, определенным по допустимой вероятности ложной тревоги, обеспечивает оптимальное по критерию Неймана-Пирсона решение о наличии или отсутствии сигнала.

Из-за независимости шумов в каналах временной обработки можно записать

$$P(x_{11}, \dots, x_{n \times m, N} | H_0) = \prod_{i=1, j=1}^{n \times m, N} P(x_{ij} | H_0) = \prod_{i=1, j=1}^{n \times m, N} F_{ij}^{x_{ij}} (1 - F_{ij})^{1-x_{ij}}. \quad (2)$$

При воздействии сигнала превышение порогов в каналах обработки – независимые события. Тогда можно записать

$$P(x_{11}, \dots, x_{n \times m, N} | H_1) = \prod_{i=1, j=1}^{n \times m, N} P(x_{ij} | H_1) = \prod_{i=1, j=1}^{n \times m, N} D_{ij}^{x_{ij}} (1 - D_{ij})^{1-x_{ij}}. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) выражение (1) можно записать как

$$\Lambda = \prod_{i=1, j=1}^{n \times m, N} D_{ij}^{x_{ij}} (1 - D_{ij})^{1-x_{ij}} \bigg/ \prod_{i=1, j=1}^{n \times m, N} F_{ij}^{x_{ij}} (1 - F_{ij})^{1-x_{ij}}. \quad (4)$$

Прологарифмировав (4), получаем

$$L = \ln \Lambda = \sum_{i=1, j=1}^{n \times m, N} x_{ij} (\ln D_{ij} - \ln F_{ij}) + (1 - x_{ij}) [\ln(1 - D_{ij}) - \ln(1 - F_{ij})]. \quad (5)$$

Если обозначить множители при x_{ij}

$$Q_{ij} = \ln D_{ij} - \ln F_{ij} - \ln(1 - D_{ij}) + \ln(1 - F_{ij}) = \ln \left(D_{ij} (1 - F_{ij}) / (1 - D_{ij}) F_{ij} \right) \quad (6)$$

и отбросить слагаемые, не зависящие от x_{ij} , то получаем оптимальный, по критерию Неймана-Пирсона, алгоритм обнаружения (захвата) траектории ВО при объединении предварительных решений всех временных каналов обработки

$$L = \sum_{i=1, j=1}^{n \times m, N} Q_{ij} x_{ij} \underset{<}{\overset{>}{z_0}}, \quad (7)$$

где z_0 – порог, определяемый вероятностью F (ложного захвата траектории).

Следовательно, совместная обработка сигналов сводится к весовому суммированию единиц и нулей x_{ij} , отражающих принятые во временных каналах обработки предварительные решения. Весовые коэффициенты (6) повышают роль того временного канала обработки, где выше вероятность D_{ij} и ниже вероятность F_{ij} . Вышеизложенное позволяет изобразить структуру обнаружителя в виде, представленном на рис.

Поскольку x_{ij} равны 0 или 1, то левая часть (7) представляет собой сумму $k < n \times m \times N$ весовых коэффициентов Q_{ij} , а значит, может принимать лишь определенные дискретные значения. Значение порога z_0 в этом случае может

лежать в пределах $0 < z_0 < \sum_{i=1, j=1}^{n \times m, N} Q_{ij}$, чтобы, с одной стороны, не принималось

всегда тривиальное решение об обнаружении траектории, а с другой – тривиальное решение о необнаружении траектории.

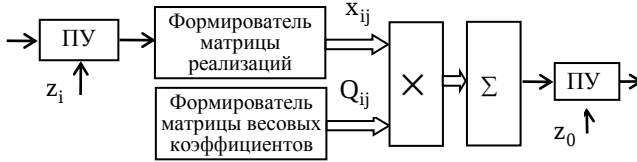


Рис. Структура обнаружителя

При фиксированных вероятностях предварительных решений во временных каналах обработки F_{ij} и D_{ij} , разные решающие правила дают разные значения вероятностей F и D . Чтобы выбрать оптимальное правило, т.е. порог z_0 в (7), получим выражения для вероятностей ложной тревоги F и обнаружения D . Так как x_{ij} подчиняются распределению Бернулли (1) с плотностью $W(x_{ij}) = P_{ij}\delta(x_{ij}-1) + (1-P_{ij})\delta(x_{ij})$, то для случайной величины $z_{ij} = Q_{ij}x_{ij}$ получим плотность вероятности и характеристическую функцию в виде

$$W(z_{ij}) = P_{ij}\delta(z_{ij} - Q_{ij}) + (1 - P_{ij})\delta(z_{ij}), \quad \Theta(u) = P_{ij} \exp(juQ_{ij}) + (1 - P_{ij}).$$

Характеристическая функция L – суммы независимых величин (7)

$$\Theta_L(u) = \prod_{i,j=1}^{n \times m, N} \Theta_{ij}(u) = \prod_{i,j=1}^{n \times m, N} [P_{ij} \exp(juQ_{ij}) + (1 - P_{ij})]. \quad (8)$$

Обратное преобразование Фурье дает плотность вероятности L

$$W_L(u) = \prod_{i,j=1}^{n \times m, N} (1 - P_{ij})\delta(z) + \sum_{k=1}^z \sum_{i_1=1}^{z-k+1} \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^z P_{i_1}P_{i_2} \dots P_{i_k} \delta(z - \sum_{r=1}^k Q_{i_r}) \prod_{j=1}^z (1 - P_j). \quad (9)$$

При изменении k от 1 до z кратность суммы в (9), в общем случае, также меняется от 1 до z . Подставив в (9) F_{ij} или D_{ij} , и проинтегрировав его от z_0 до ∞ получаем вероятность ложной тревоги или обнаружения. Если большее ближайшее z_0 значение суммы весовых коэффициентов содержит n слагаемых и равно $\sum_{r=1}^k Q_{i_r}$, то вероятность превышения порога z_0 можно записать в виде

$$P = \sum_{k=n}^z \sum_{i_1=1}^{z-k+1} \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^z P_{i_1}P_{i_2} \dots P_{i_k} \prod_{j=1}^z (1 - P_j). \quad (10)$$

Если $F_1 = \dots = F_z = F_0$ и $D_1 = \dots = D_z = D_0$, то $Q_1 = \dots = Q_z$, то для алгоритма (10) можно записать

$$P = \sum_{n=k}^z C_m^n \tilde{P}^n (1 - \tilde{P})^{z-n}. \quad (11)$$

По выражениям (10) и (11) при заданных значениях F_{ij} , D_{ij} можно вычислить выходные вероятности F и D для любого значения порога z_0 и соответствующего ему решающего правила. Чем больше z_0 (т.е. чем жестче решающее правило), тем меньше F и D . Алгоритм (11), оптимальный при $Q_1 = \dots = Q_z$, несколько проще, чем (10), так как не требует анализа в каждом временном канале вероятностей F_{ij} , D_{ij} и вычисления Q_{ij} .

Выводы. Таким образом, оптимизация обнаружения траекторий по данным запросных СН ЕИС сводится к выбору одного из решающих правил, удовлетворяющих алгоритму (7), и к выбору относительного порога обнаружения импульсов, обеспечивающего такое значение F_{ij} , которое при выбранном решающем правиле дают требуемое значение результирующей вероятности ложного захвата траектории F .

В дальнейшем, представляет интерес рассмотреть квазиоптимальные структуры обнаружителя траектории ВО по данным запросных СН, учитывающие последовательность выполнения промежуточных обнаружений. Сравнить показатели качества обнаружения (захвата) траекторий ВО, исследовать влияние конечного коэффициента готовности ответчика на качество обнаружения траекторий.

Список литературы: 1. Lok J.J. C² for the air warrior // Jane's International Defense Review. – October 1999. – V.2. – P. 53-59. 2. Farina A., Studer F.A. Radar Data Processing Introduction and Tracking. – Vol.1. – Research Studies Press. Letch worth England, 1985. – P. 121-123. 3. AAP-28(B) NATO Glossary of Identification. – NATO Standardization Agency, 2002. 4. Маляренко А.С. Системы вторичной радиолокации для управления воздушным движением и государственного радиолокационного опознавания: Справочник. – Харьков: ХУПС, 2007. – 78 с. 5. Кузмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 351 с. 6. Обод И.И. Помехоустойчивые системы вторичной радиолокации. – М.: ЦНТИ, 1998. – 119 с. 7. Комплексне інформаційне забезпечення систем управління польотами авіації та протиповітряної оборони // В.В. Ткачев, Ю.Г. Даник, С.А. Жуков, І.І. Обод, І.О. Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 342 с. 8. Теоретичні основи побудови заводозахисних систем інформаційного моніторингу повітряного простору / В.В. Ткачев, Ю.Г. Даник, С.А. Жуков, І.І. Обод, І.О. Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 271 с.

УДК 621.396.967.2

Синтез оптимального детектору траекторій повітряних об'єктів за даними запитних систем спостереження єдиної інформаційної мережі / Обод І.І., Заволодько Г.Е. // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – № 49. – С. 114 – 119.

Наводиться синтез оптимальної структури детектору траекторій повітряних об'єктів за даними запитних систем спостереження в єдиній постановці питання виявлення в даних інформаційних системах: обнаружитель відповідних імпульсів, обнаружитель відповідних сигналів, обнаружитель повітряного об'єкту і власне обнаружитель траекторій. Отримані вираження для показників якості виявлення траекторій. Лл.: 1. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: обнаружитель траекторий, повітряний об'єкт, запитні системи спостереження, інформаційна система, відповідний сигнал.

UDC 621.396.967.2

Synthesis optimal trajectories detector of air objects by data of enquiry of observation of a uniform informational network/ Obod I.I., Zavolodko G.E. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling. – NTU "KhPI". – 2008. – № 49. – P. 114 – 119.

Synthesis of optimum structure trajectories detector of air objects by data enquiry in uniform statement of a detection question in considered information systems is resulted: reciprocal impulses detector, reciprocal signals detector, air object detector and actually trajectories detector. Expressions for indicators of trajectories detection quality are received. Figs: 1. Refs: 8 titles.

Keywords: trajectories detector, air object, enquiry supervision systems, information system, backward signal.

Поступила в редакцію 15.10.2008