

УДК 681.396.96

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕДИНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТАХ ПО ДАННЫМ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ

А.А. БЕЛОУС, А.В. ХИЖНЯК, Д.С. ШАРАК, А.С. БЕЛЫЙ

Военная академия Республики Беларусь
Минск, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 23 октября 2015

Предлагается методика оценки эффективности функционирования алгоритмов обработки информации о воздушных объектах, применяемых в многодатчиковых комплексах мониторинга воздушного пространства, а также результат ее применения для исследования эффективности алгоритмов третичной обработки радиолокационной информации (РЛИ).

Ключевые слова: многодатчиковые комплексы, мониторинг воздушного пространства, третичная обработка РЛИ, эффективность алгоритма объединения информации.

Введение

В настоящее время одним из перспективных направлений развития информационных систем, к классу которых относятся системы разведки воздушного пространства, является разработка многодатчиковых комплексов мониторинга воздушного пространства, под которыми понимают совокупность совместно функционирующих источников информации, средств ее обработки и отображения, а также средств связи и передачи данных [1]. Целью функционирования таких многодатчиковых комплексов является получение информации о воздушных объектах от информационных датчиков, ее объединение и предоставление обобщенной картины воздушной обстановки в зоне ответственности комплекса. При этом в качестве источников информации в таких системах могут использоваться как однотипные, так и разнотипные по способу получения информации источники (информационные датчики (ИД) – оптические, радиолокационные, акустические, сейсмические и др.).

Одним из важнейших вопросов, возникающих на этапе разработки новых или модернизации существующих многодатчиковых комплексов мониторинга воздушного пространства, является исследование эффективности функционирования указанных комплексов при использовании в них различных алгоритмов объединения информации, получаемой от ИД.

Предлагаемая в статье методика предназначена для проведения сравнительной оценки эффективности функционирования алгоритмов объединения информации о воздушных объектах в многодатчиковых комплексах мониторинга воздушного пространства. Результатом применения данной методики являются полученные расчетные значения критериев и показателей эффективности функционирования алгоритмов. Полученные расчетные значения могут быть использованы при выборе конкретного алгоритма для его последующей реализации в реальных технических системах.

Постановка задачи

Под основной характеристикой эффективности функционирования алгоритма объединения информации необходимо понимать степень соответствия результатов его функционирования целям решения задачи объединения информации. Для получения количественной оценки эффективности требуется провести выбор и обоснование критерия,

позволяющего определить прирост или снижение эффективности за счет применения различных алгоритмов. В свою очередь, решение данной задачи требует определения показателя эффективности функционирования исследуемых алгоритмов.

Синтез показателя эффективности является достаточно сложной задачей, требующей проведения всестороннего анализа исследуемого процесса функционирования алгоритма, определения наиболее важных подзадач объединения информации, а также степени их важности при достижении цели функционирования исследуемых алгоритмов. Решение указанных задач затруднительно без наличия научного инструментария, позволяющего установить последовательность и способы определения критерия эффективности в процессе исследования. Это ведет к необходимости создания подхода к оценке эффективности объединения информации в многодатчиковых комплексах мониторинга воздушного пространства. Решение данной задачи может быть реализовано посредством разработки методики, позволяющей осуществить сравнительный анализ эффективности применения различных алгоритмов объединения информации о воздушных объектах.

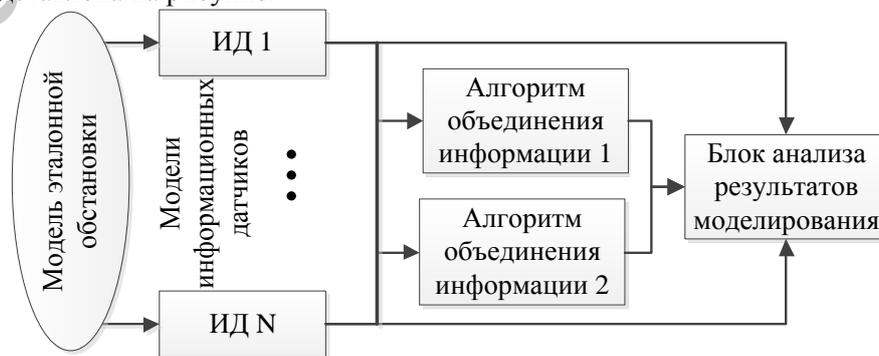
Разработка обобщенной методики оценки эффективности объединения информации

Выбор приемлемого алгоритма объединения информации на этапе разработки или совершенствования многодатчикового комплекса мониторинга воздушного пространства осуществляется на основе анализа критерия эффективности применения исследуемых алгоритмов для решения основной функциональной задачи комплекса – адекватного представления воздушной обстановки в зоне его ответственности. При этом под адекватностью понимается величина значения степени соответствия реальной воздушной обстановки ее отображению на выходе алгоритма объединения информации. Таким образом, оценка эффективности алгоритма объединения информации в многодатчиковых комплексах мониторинга воздушного пространства может быть реализована на основе сопоставления результатов его функционирования с исходной (эталонной) воздушной обстановкой, формируемой ИД на входе алгоритма объединения. Исходя из этого, методика оценки эффективности может быть представлена в следующем виде: 1) выбор условий функционирования исследуемых алгоритмов объединения информации; 2) разработка комплекса имитационных моделей для оценки эффективности решения задачи объединения информации; 3) определение оценок частных показателей качества объединения информации; 4) обоснование выбора применяемого показателя эффективности; 5) анализ факторов, влияющих на функционирование алгоритмов объединения информации; 6) определение коэффициентов важности решения частных задач объединения информации на основе проведения факторного эксперимента; 7) определение критерия эффективности.

Выбор условий функционирования алгоритма подразумевает реализацию следующих этапов:

- построение модели эталонной воздушной (фоновой-целевой) обстановки;
- определение структуры многодатчикового комплекса;
- моделирование траекторных данных на входах исследуемых алгоритмов отождествления.

Реализация указанных этапов первого пункта методики осуществляется на основе применения комплекса математических имитационных моделей, структура взаимодействия которых представлена на рисунке.



Структура взаимодействия имитационных моделей

Разработка комплекса имитационных моделей включает:

- разработку имитатора эталонной обстановки;
- разработку имитационных моделей информационных датчиков;
- моделирование процесса объединения информации исследуемыми алгоритмами;
- сбор, обработку статистических данных и расчет на их основе показателей эффективности.

Определение оценок частных показателей качества объединения информации включает следующие этапы:

- декомпозицию процесса объединения информации на частные подзадачи;
- выбор и обоснование показателей качества решения частных подзадач (частных показателей качества);
- проведение серии имитационных экспериментов с последующим расчетом статистических оценок частных показателей качества.

При выборе показателя эффективности, применяемого для комплексной оценки качества функционирования алгоритма объединения, требуется определение функциональной зависимости между показателями качества решения частных задач. Установление данной зависимости осуществляется исходя из анализа особенностей функционирования алгоритмов объединения, а также степени корреляции при решении частных подзадач. В настоящее время для свертки частных показателей используются мультипликативный и аддитивный способы (1), (2) [2].

$$W = \prod_{s=1}^k R_s, \quad (1)$$

$$W = \prod_{s=1}^k R_s \eta_s, \quad (2)$$

где R_s – частный показатель качества решения s -й задачи; η_s – коэффициент важности решения s -й задачи алгоритмом объединения информации.

Дальнейшая оценка эффективности объединения информации, осуществляемая при использовании показателя, определяемого выражением (1), сводится к выполнению пункта 7 методики и состоит в выборе и расчете критерия эффективности.

Среди критериев, применяемых для оценки прироста эффективности функционирования процессов и систем, наиболее широкое распространение нашел критерий следующего вида [2]:

$$\Delta W = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где W_1 и W_2 – расчетные значения показателей эффективности исследуемых алгоритмов, полученных в соответствии с (1) или (2).

Применение критерия вида (3) позволяет определить в процентном отношении прирост показателя эффективности, за счет применения алгоритма (W_1) вместо алгоритма (W_2). При использовании аддитивной свертки частных показателей качества решения задачи отождествления возникает дополнительная задача по определению весовых коэффициентов η_s .

Применение комплекса имитационных моделей в составе предлагаемой методики позволяет решить данную задачу посредством проведения факторного эксперимента, предполагающего решение следующего ряда задач:

- определение количества варьируемых факторов, влияющих на качество функционирования алгоритмов объединения информации, а также числа их уровней квантования;
- построение плана проведения факторного эксперимента;
- проведение серии имитационных экспериментов, обработка статистических данных, определение коэффициентов уравнения регрессии (коэффициентов η_s).

На основе полученных коэффициентов важности решения частных задач объединения информации, а также рассчитанных значений частных показателей, в соответствии с (2)

определяются W_1 и W_2 . Далее, в соответствии с пунктом 7 методики, определяется прирост эффективности.

Реализация указанной методики может быть применена для исследования различных алгоритмов объединения информации. В данной статье предлагается использовать разработанную обобщенную методику для оценки эффективности функционирования алгоритмов объединения траекторной РЛИ в многодатчиковой радиолокационной системе.

Реализация методики оценки эффективности объединения траекторной РЛИ

Под траекторной РЛИ понимается совокупность данных о пространственном положении воздушных объектов, параметрах их изменения, признаках и характеристиках, получаемых на пункте объединения РЛИ от радиолокационных датчиков с трассовым выходом.

Под объединением траекторной РЛИ принято понимать процесс принятия решения о соответствии траекторных данных, получаемых радиолокационными датчиками при ведении радиолокационной разведки в общих зонах, действительным воздушным объектам и последующую оценку их параметров.

В теории цифровой обработки РЛИ задачу объединения траекторной РЛИ принято называть третичной обработкой, на этапе которой решаются две частные подзадачи [3]:

- 1) отождествление (идентификация) траекторных данных;
- 2) оценка параметров отождествленных траекторий (осреднение).

Решение задачи третичной обработки РЛИ в многодатчиковых радиолокационных системах осуществляется на основе реализации алгоритмов третичной обработки. В соответствии с предложенной обобщенной методикой может быть получена ее частная реализация для оценки эффективности третичной обработки РЛИ в многодатчиковых радиолокационных комплексах (системах).

Модель эталонной воздушной обстановки [4] представляет собой множество векторов параметров воздушных объектов $H_i = \{i, U_i, \dot{U}_i, \ddot{U}_i, t_i\}$ на интервале моделирования $\{t_n, t_k\}$, где $U_i, \dot{U}_i, \ddot{U}_i$ – координаты положения i -го воздушного объекта, скорость и ускорение их изменения соответственно; t_i – значение модельного времени для i -го воздушного объекта ($t_i \in \{t_n, t_k\}$).

Формирование множества эталонных траекторий H_i осуществляется имитатором воздушной обстановки, с последующей их выдачей на входы имитационных моделей радиолокационных датчиков, на выходах которых формируются измеренные значения траекторий эталонных воздушных объектов $H_{ij} = \{ij, U_{ij}, \dot{U}_{ij}, \ddot{U}_{ij}, \Psi_{ij}, X_{ij}, \Pi_{ij}, t_{ij}\}$, где $U_{ij}, \dot{U}_{ij}, \ddot{U}_{ij}$ – координаты положения i -го воздушного объекта по данным j -го информационного датчика, скорость и ускорение их изменения соответственно (при возможности их определения информационным датчиком); Ψ_{ij} – корреляционная матрица ошибок измерения или оценки параметров i -го воздушного объекта по данным j -го ИД (при возможности ее определения); X_{ij}, Π_{ij} – характеристики и признаки i -го воздушного объекта, определяемые j -м ИД; t_{ij} – время наблюдения i -го воздушного объекта, определяемое j -м информационным датчиком на интервале $\{t_n, t_k\}$.

К основным функциям имитационных моделей радиолокационных траекторных датчиков относятся:

- обнаружение эталонных траекторий в области зоны радиолокационного наблюдения датчиков;
- моделирование процесса измерения траекторных параметров с заданными точностными характеристиками и темпом;
- выдача измеренных траекторных параметров на вход алгоритмов третичной обработки.

Учитывая, что многодатчиковая радиолокационная система (комплекс), как правило, является пространственно распределенной системой, очередной этап методики требует определения ее структуры: количество датчиков и их пространственное положение. Совокупность траекторных данных, полученных на выходах имитационных моделей радиолокационных датчиков, является исходными данными для алгоритмов третичной обработки РЛИ.

Для оценки качества решения частных подзадач третичной обработки могут быть использованы частные показатели качества: коэффициент отождествления $K_{от}$ и коэффициент осреднения $K_{оср}$ – выражения (4) и (5):

$$K_{от} = \frac{K_{Д.ВЫХ}}{K_{Д.ВХ}}, \quad (4)$$

$$K_{оср} = 1 - \frac{\Delta_{ВЫХ}}{\Delta_{ВХ}}, \quad (5)$$

где $K_{Д.ВХ}$, $K_{Д.ВЫХ}$ – соответственно коэффициенты достоверности РЛИ; $\Delta_{ВХ}$, $\Delta_{ВЫХ}$ – усредненные сферические ошибки оценки положения эталонных воздушных объектов на входе и выходе алгоритма третичной обработки.

Определение $K_{Д.ВХ}$ осуществляется в соответствии с выражением:

$$K_{Д.ВХ} = \sum_{i=1}^n N_{Дi} / [\sum_{i=1}^n N_{Дi} + \sum_{i=1}^n N_{Лi}], \quad (6)$$

где $N_{Дi}$ и $N_{Лi}$ – количество действительных и ложных траекторий воздушных объектов на выходе имитационной модели радиолокационного i -го датчика соответственно.

Значение $K_{Д.ВЫХ}$ может быть определено как

$$K_{Д.ВЫХ} = N_{Д}^{Эт} / [\sum_{i=1}^n N_{Лi} + N_{Д}^{Алг} + N_{Дуб}^{Алг}], \quad (7)$$

где $N_{Д}^{Эт}$ – количество действительных траекторий из состава эталонной обстановки, информация о которых поступает на вход алгоритма третичной обработки от имитационных моделей; $N_{Д}^{Алг}$ и $N_{Дуб}^{Алг}$ – количество действительных и дублирующих траекторий, полученных на выходе алгоритма третичной обработки соответственно.

Для оценки точности РЛИ целесообразно использовать усредненную по всем датчикам и воздушным объектам сферическую ошибку определения положения эталонного воздушного объекта, определяемую в соответствии с выражением

$$\Delta_{ВХ} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta_{сфij} / nm, \quad (8)$$

где $\Delta_{сфij}$ – сферическая ошибка определения положения i -го воздушного объекта по данным j -го радиолокационного датчика, определяемая в соответствии с выражением

$$\Delta_{сфij} = \sqrt{(X_{Эти} - X_{ij})^2 + (Y_{Эти} - Y_{ij})^2 + (H_{Эти} - H_{ij})^2}, \quad (9)$$

где $X_{Эти}, Y_{Эти}, H_{Эти}$ – координаты i -го эталонного воздушного объекта, а X_{ij}, Y_{ij}, H_{ij} – координаты i -го эталонного объекта, полученные на выходе j -го радиолокационного датчика.

Подобным образом может быть получено значение для $\Delta_{ВЫХ}$:

$$\Delta_{ВЫХ} = \sum_{k=1}^l \Delta_{сфk} / l, \quad (10)$$

где $\Delta_{\text{сф}k}$ – сферическая ошибка определения положения k -го воздушного объекта на выходе алгоритма третичной обработки; l – общее количество траекторий на выходе алгоритма третичной обработки.

Следует отметить некоторые особенности при определении коэффициента осреднения $K_{\text{оср}}$, а именно:

– априорно, в процессе осреднения $\Delta_{\text{вых}} \leq \Delta_{\text{вх}}$. Выполнение данного условия вытекает из реализации известных методов осреднения, а именно метода приоритетного источника РЛИ (в качестве осредненных параметров используются измеренные параметры воздушного объекта, полученные по данным наиболее точного радиолокационного датчика) и метода весового осреднения (в качестве осредненных параметров используются усредненные с учетом точностных характеристик радиолокационных датчиков измеряемые ими координаты воздушных объектов). Метод весового осреднения при наличии в многодатчиковом радиолокационном комплексе равноточных источников позволяет снизить $\Delta_{\text{вх}}$ пропорционально количеству радиолокационных данных;

– разность в правой части в выражении (5) позволяет отразить влияние снижения $\Delta_{\text{вх}}$ на увеличение $K_{\text{оср}}$.

Учитывая тот факт, что решение задач отождествления и осреднения при функционировании алгоритма третичной обработки реализуется независимо друг от друга, для синтеза показателя эффективности целесообразно использовать аддитивную свертку показателей качества решения частных подзадач третичной обработки (2). Тогда показатель эффективности третичной обработки $W_{\text{тр.обр.}}$ примет вид:

$$W_{\text{тр.обр.}} = \eta_{\text{от}} K_{\text{от}} + \eta_{\text{оср}} K_{\text{оср}}, \quad (11)$$

где $\eta_{\text{от}}$ и $\eta_{\text{оср}}$ – коэффициенты важности решения задачи отождествления и осреднения соответственно.

Для определения коэффициентов $\eta_{\text{от}}$ и $\eta_{\text{оср}}$ предлагается использовать метод, основанный на проведении факторного эксперимента, реализация которого требует:

– определить перечень факторов, влияющих на качество третичной обработки РЛИ, выделить из них существенные и определить количество уровней их градаций;

– построить план проведения эксперимента и провести его в соответствии с данным планом;

– определить $\eta_{\text{от}}$ и $\eta_{\text{оср}}$ на основе обработанных результатов экспериментальных исследований.

На входе этапа третичной обработки РЛИ характеризуется следующими свойствами: плотность траекторий (количество траекторий воздушных объектов на единицу объема пространства зоны ответственности многодатчиковой радиолокационной системы), точность, достоверность и полнота.

Анализ выражений (4) и (5) позволяет сделать вывод о том, что качество решения частных задач третичной обработки не зависит от достоверности и полноты РЛИ, так как данные ее свойства определяются характеристиками источников РЛИ, формирующими суммарный входной сигнал для алгоритма третичной обработки. В то же время очевидно, что плотность траекторий и точность оценки траекторных параметров будут сказываться на качестве объединения трассовой РЛИ в связи с непосредственным влиянием их на решение частных задач отождествления и осреднения траекторной РЛИ. Вследствие этого можно сделать вывод, что плотность траекторий и точность оценки их параметров являются наиболее существенными факторами, влияющими на качество решения задачи третичной обработки РЛИ.

Построение плана и проведение факторного эксперимента с последующим анализом его результатов выполняется по известной методике [5]. По полученным в результате факторного эксперимента $\eta_{\text{от}}$ и $\eta_{\text{оср}}$ рассчитываются показатели эффективности $W_{\text{тр.обр.}}$ исследуемых алгоритмов третичной обработки.

В соответствии с выражением (3) рассчитывается критерий эффективности $\Delta W_{\text{тр.обр.}}$ и делается вывод об эффективности применения исследуемых алгоритмов.

Заключение

Предложены обобщенная и частная методики оценки эффективности объединения информации о воздушных объектах в многодатчиковых комплексах мониторинга воздушного пространства.

Реализация обобщенной методики позволяет проводить оценку эффективности процесса объединения информации о воздушных объектах в многодатчиковых комплексах мониторинга воздушного пространства. В качестве источников информации в таких комплексах могут быть использованы различные по физическому принципу получения информации ИД. Оценка эффективности процесса объединения информации с применением указанной методики осуществляется на основе расчета критерия эффективности функционирования алгоритмов, применяемых для реализации указанного процесса.

Отличительной особенностью предлагаемой методики является применение в ней для расчета показателей эффективности исследуемых алгоритмов этапа факторного эксперимента, реализуемого на основе применения комплекса математических имитационных моделей. Применение факторного эксперимента при расчете показателей эффективности позволило, с одной стороны, выделить наиболее существенные факторы, влияющие на качество решения задачи объединения информации, а с другой – определить их весовые коэффициенты при расчете показателя эффективности.

На основе обобщенной методики предложена частная методика для оценки эффективности процесса объединения информации в многодатчиковой радиолокационной системе. Применение данной частной методики позволяет исследовать алгоритмы третичной обработки РЛИ в различных условиях их функционирования. Результаты применения данной методики могут быть использованы при совершенствовании известных или разработке новых методов третичной обработки РЛИ и алгоритмов, их реализующих, для оценки эффективности.

THE ESTIMATION TECHNIQUE OF THE ASSOCIATION INFORMATION EFFICIENCY ABOUT AIR OBJECTS ACCORDING TO SEVERAL SOURCES

A.A. BELOUS, A.V. KHIZHNIAK, D.S. SHARAK, A.S. BELY

Abstract

The estimation technique of information processing algorithms functioning efficiency on air objects applied in multisensor complexes of air space monitoring, and the result of its application for research of algorithms efficiency of tertiary handling of the radar-tracking information is offered in the article.

Список литературы

1. *Верба В.С., Меркулов В.И., Миляков Д.А. и др.* // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 4. С. 12–15.
2. *Гермейер Ю.Б.* Введение в теорию исследования операций. М., 1971.
3. *Кузьмин С.З.* Основы цифровой обработки радиолокационной информации. М., 1974.
4. *Белоус А.А.; Семченко И.Л.; Смирнов С.А.* // Сб. докл. IX Всеросс. научн.-практ. конф. «Актуальные вопросы разработки и внедрения информационных технологий двойного применения». Ярославль, 24–25 октября 2008 г. С. 47–51.
5. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М., 1978.