

МЕТОД СОВМЕСТНОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ КООРДИНАТНОЙ И ПРИЗНАКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

С.А. Войтович¹, С.Г. Шило¹, А.В. Сисков¹, П.Г. Бердник², А.Н. Бесчасный¹
(¹Харьковский университет Воздушных Сил,
² Харьковский национальный университет им В.Н. Каразина)

Рассматривается метод совместного объединения координатных параметров и разнородных признаков воздушных объектов, учитывающий различия в возможностях разнотипных источников по содержанию выдаваемой информации.

радиолокационная информация, координатная и при знаковая информация

Постановка проблемы. Процесс объединения информации о воздушной обстановке от совокупности разнотипных источников реализуется в системах обработки радиолокационной информации (СОРЛИ) в сложных условиях радиолокационного наблюдения. Это вызвано маневрированием и постановкой помех воздушными объектами (ВО), их большой пространственной плотностью, воздействием естественного шумового фона и другими факторами. При этом процесс наблюдаемости ВО источниками радиолокационной информации (ИРЛИ) носит случайный прерывистый характер, а поступающие на вход СОРЛИ измеренные и оцененные на источниках координатные параметры и признаки существенно различны по содержанию. Существующие методы объединения информации о воздушной обстановке не учитывают различий в содержании информации, что не позволяет в указанных условиях СОРЛИ обеспечить требуемые показатели качества информации о воздушной обстановке.

Для решения этой актуальной задачи необходимо разработать метод совместного объединения информации о координатных параметрах и разнородных признаках ВО, который позволил бы учесть особенности функционирования разнотипных источников.

Анализ литературы. Применительно к проблеме оптимизации объединения РЛИ от множества источников, в работах [1 – 3] рассмотрены методы и алгоритмы объединения информации, реализующие принцип совместной обработки измеренных неравноточными ИРЛИ значений координат ВО. Приведенные оценки эффективности предложенных методов свидетельствуют об улучшении точностных оценок параметров

обобщенных траекторий ВО в среднем на 20% и о снижении стоимости обработки информации пропорционально увеличению количества измерителей [2].

Однако рассматриваемые методы объединения информации используют информацию только о координатных параметрах ВО. Различающиеся возможности разноотипных ИРЛИ по содержанию выдаваемой информации о поведенческих, сигнальных и траекторных признаках ВО, а также результатов предварительного распознавания ВО, не учитываются. Это может приводить к принятию ошибочных решений при оценивании параметров потока ВО и снижает эффективность функционирования СОРЛИ.

Таким образом, вопросы повышения качества информации о воздушной обстановке, выдаваемой потребителям, за счет учета различий в содержании координатной и признаковой информации при ее совместном объединении являются актуальными и требуют своего решения.

Цель статьи. В статье рассматривается метод совместного объединения разнородной координатной и признаковой информации от совокупности разнотипных источников в СОРЛИ, который позволяет устранить недостатки, присущие существующим методам, и за счет этого повысить качество информации, выдаваемой потребителям.

Основной раздел. Разработка метода совместного объединения разнородной координатной и признаковой информации в СОРЛИ осуществляется при допущениях, что каждое измерение, поступающее от любого из источников, порождено не более чем одним ВО при отсутствии размножения отметок. Составляющие векторов наблюдения координатных параметров \hat{y}_Σ и сигнальных признаков \hat{x}_Σ характеризуются случайными ошибками, распределенными по нормальному закону с известными СКО – $\sigma_{\hat{y}_\Sigma}$, и $\sigma_{\hat{x}_\Sigma}$. Систематическая погрешность измерений на источниках может быть устранена и в рассматриваемом методе не учитывается.

Рассматривается радиолокационная обстановка в зоне обзора гипотетического радиолокатора, накрывающей пересекающиеся зоны обзора разнотипных источников и разрывы между ними. В результате наблюдений, от совокупности источников, в очередном α -м такте обновления информации поступает l отметок, которые характеризуются векторами наблюдения $\vec{y}_\Sigma = \vec{y}_1, \dots, \vec{y}_l$, а также вектора наблюдения признаков $\vec{x}_\Sigma = \vec{x}_1, \dots, \vec{x}_l$. Необходимо оценить количество ВО \hat{n} , их вектора состояния $\hat{\mu}_1, \dots, \hat{\mu}_n$ и классы $\hat{T}_\Sigma = \hat{T}_1, \dots, \hat{T}_n$. Метод совместного объединения координатных и некоординатных параметров траекторий и оцени-

вания количества ВО предполагает выполнение следующих процедур третичной обработки РЛИ [1, 3 – 5]:

а) приведение множества измерений координатных параметров ВО, полученных от совокупности разнотипных ИРЛИ, к единому времени;

б) пересчет измеренных источниками значений координатных параметров ВО в систему координат СОРЛИ;

в) принятие решений о тождественности измеренных значений координат и разнородных признаков, а также результатов предварительного распознавания ВО от разнотипных источников;

г) оценка количества ВО \hat{n} , координатных параметров $\hat{\mu}_1, \dots, \hat{\mu}_n$ и классов $\hat{T}_\Sigma = \hat{T}_1, \dots, \hat{T}_n$ обобщенных траекторий.

К предварительной обработке РЛИ в СОРЛИ относятся процедуры а) и б). Результатом их являются пересчитанные значения координат ВО из систем координат источников в прямоугольную систему координат СОРЛИ, а также экстраполяция измеренных источниками значений на момент времени обработки в СОРЛИ, которые осуществляются в соответствии с известными методами [1 – 3].

Целью процедур окончательной обработки РЛИ в) – г) является принятие решений о тождественности измерений, поступивших от разнотипных ИРЛИ и оценивание параметров потока ВО. Решение рассматриваемой задачи предполагает последовательное выдвижение и проверку множества гипотез совместного отождествления измерений разнотипных источников, подходы к решению которой, приведены в [4, 5].

Однако существенную сложность в процессе выдвижения и проверки гипотез представляет совместный учет разнородной координатной и признаковой информации, что позволяет учитывать особенности функционирования разнотипных ИРЛИ.

Для принятия решений о тождественности информации, поступающей от s -го и p -го ИРЛИ, необходимо осуществить сравнение всех измеренных значений координатных параметров и признаков ВО в пространстве источников и на основании величины несовпадения $\Delta x_k = \bar{y}_{sj} - \bar{y}_{pj}$, $\Delta x_z = \bar{x}_{sj} - \bar{x}_{pj}$ по каждой из составляющих вектора измерения координатных параметров и вектора измерения признаков, где $k \in r$, r – размерность вектора измерения координатных параметров; $z \in \theta$, θ – размерность вектора признаков, принять решение об их тождественности. Для решения задачи необходимо формирование условной совместной плотности вероятности $\omega_1(\Delta x_k \Delta x_z; k \in r, z \in \theta)$ – для условия принадлежности каждой пары измерений конкретной j -й траектории ВО, ус-

ловной совместной ПРВ $\omega_2(\Delta y_k \Delta x_z; k \in r, z \in \theta)$ – для условия принадлежности измерений различным траекториям ВО, нахождение отношения правдоподобия и сравнения его с пороговым значением γ_{Ξ} :

$$\frac{\omega_1(\Delta y_k \Delta x_z; k \in r, z \in \theta)}{\omega_2(\Delta y_k \Delta x_z; k \in r, z \in \theta)} \geq \gamma_{\Xi}. \quad (1)$$

Решение подобных задач сводится к построению Ξ -мерного строга ($\Xi = r + z$) вокруг выбранной опорной отметки и проверке попадания в него другой отметки при условии оптимальности строга согласно принятого критерия, если уравнение строга удовлетворяет неравенству (1).

Принимается допущение, что случайные величины \bar{y}_k , $k \in r$, \bar{x}_z , $z \in \theta$ статистически независимы, а следовательно, для их совместной ПРВ справедливо: $\omega(\Delta y_k \Delta x_z; k \in r, z \in \theta) = \prod_{(k+z) \in \Xi} \omega(\bar{y}_k \bar{x}_z)$.

Плотность вероятности величины несовпадения измерений по произвольной k -й координате Δy_k определяется как композиция нормальных законов распределения случайных величин \bar{y}_{sj} и \bar{y}_{pj} с дисперсиями σ_{sj}^2 и σ_{pj}^2 и математическими ожиданиями m_{sj} и m_{pj} . Выражение для композиции нормальных законов распределения случайной величины несовпадения отметок по координатным параметрам будет иметь вид

$$\omega(\Delta y_k) = 1/\sqrt{2\pi\sigma_{\Delta k}^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{\Delta k}^2} (\Delta y_k - \Delta m_k)^2 \right\},$$

где $\sigma_{\Delta k}^2 = \sigma_{sj}^2 + \sigma_{pj}^2$; $\Delta m_k = m_{sj} - m_{pj}$.

Принятие решение о тождественности отметок по их координатным параметрам основывается на том факте, что истинные значения измеренных разнотипными источниками координатных параметров, принадлежащих траектории одного и того же ВО в один и тот же момент времени должны совпадать. То есть выполняется равенство $\Delta y_k^{\text{ИСТ}} = \bar{y}_{sj}^{\text{ИСТ}} - \bar{y}_{pj}^{\text{ИСТ}} = 0$, либо учитывая, что $\Delta y_k^{\text{ИСТ}} = m_k$, $\Delta m_k = m_{sj} - m_{pj} = 0$, где $\bar{y}_j^{\text{ИСТ}}$ – истинные значения вектора координатных параметров j -го ВО. В этом случае $\omega_1(\Delta y_k) = \omega_1(\Delta y_k / \Delta m_k) = 0$.

В случае, если измерения координатных параметров принадлежат различным траекториям, то $\Delta m_k = m_{sj} - m_{pj} \neq 0$, к тому же Δm_k является случайной величиной для наблюдателя (СОРЛИ) и для определения вза-

имного положения ВО в пространстве необходимо иметь и учитывать данные о предыстории наблюдений, т.е. задать вид априорного распределения параметров наблюдаемого потока ВО.

Полагая, что взаимное положение ВО в пространстве на момент обновления информации в СОРЛИ определяется известной априорной ПРВ $\omega_0(\Delta y_k^0) = \omega_0(\Delta m_k)$, можно найти апостериорную ПРВ события, состоящего в том, что измерения принадлежат двум различным ВО, для этого усредняя по множеству возможных состояний Δm_k , апостериорная ПРВ примет вид:

$$\omega_2(\Delta y_k; k \in r) = \int_{-\infty}^{+\infty} \omega_0(\Delta m_k) \times (\Delta y_k / \Delta m_k \neq 0) d\Delta m_k. \quad (2)$$

Например, рассматривая процедуру принятия решения о принадлежности двух измерений координатных параметров от разнотипных источников одной либо двум различным траекториям, необходимо задание вида априорного распределения расстояний между ВО по всем координатам, т.е. необходимо иметь значения минимального α_k и максимального β_k допустимых расстояний между ВО по каждой из k координат. В интервале $[\alpha_k; \beta_k]$ распределение расстояния между ВО по координатам будет равновероятным, т.е. справедливо

$$\omega(\Delta m_k) = \begin{cases} \frac{(\beta_k - \alpha_k)}{2} & \text{при } \beta_k < \Delta m_k < \alpha_k \text{ или } -\beta_k < \Delta m_k < -\alpha_k; \\ 0 & \text{при } \alpha_k < \Delta m_k < \beta_k \text{ или } -\alpha_k < \Delta m_k < -\beta_k. \end{cases}$$

При этом выражение (2) примет вид:

$$\omega_2(\Delta y_k; k \in r) = \int_{-\beta_k}^{-\alpha_k} 1/2(\beta_k - \alpha_k) \times 1/\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta k} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{\Delta k}^2}(\Delta y_k - \Delta m_k)^2\right\} d\Delta m_k + \int_{\alpha_k}^{\beta_k} 1/2(\beta_k - \alpha_k) \times 1/\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta k} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{\Delta k}^2}(\Delta y_k - \Delta m_k)^2\right\} d\Delta m_k.$$

Учитывая, что при рассматриваемой постановке задачи и принятых допущениях приведенные выкладки справедливы для отождествления измеренных значений признаков, в случае совпадения словарей признаков на источниках, выражение (1) при отождествлении измерений координатных и признаковых параметров от разнотипных источников примет вид:

$$\frac{\omega_1(\Delta y_k \Delta x_z; k \in r, z \in \theta)}{\omega_2(\Delta y_k \Delta x_z; k \in r, z \in \theta)} = \frac{\sigma_{pk}}{\sigma_{\Delta k}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_{pk}^2 - \sigma_{\Delta k}^2}{\sigma_{pk}^2 \sigma_{\Delta k}^2} (\Delta y_k)^2 \right] \right\} \times$$

$$\times \frac{\sigma_{pz}}{\sigma_{\Delta z}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_{pz}^2 - \sigma_{\Delta z}^2}{\sigma_{pz}^2 \sigma_{\Delta z}^2} (\Delta x_z)^2 \right] \right\} = \frac{\sigma_{pk} \sigma_{pz}}{\sigma_{\Delta k} \sigma_{\Delta z}} \times$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(\sigma_{pk}^2 - \sigma_{\Delta k}^2)(\Delta y_k)^2 (\sigma_{pz} - \sigma_{\Delta z}^2)(\Delta x_z)^2}{\sigma_{pk}^2 \sigma_{pk}^2 \sigma_{\Delta k}^2 \sigma_{\Delta z}^2} \right] \right\},$$

где σ_{pk}^2 – результирующая дисперсия измерения координатных параметров; σ_{pz}^2 – результирующая дисперсия измерения признаков.

Таким образом, описанные плотности распределения вероятности требуют априорного задания параметров α_k – минимального расстояния между ВО и β_k – максимально возможного расстояния между ВО. Следует отметить, что величина α_k может быть задана, исходя из требований обеспечения безопасности полетов, построения тактических боевых порядков авиации и т.п., однако задать хотя бы приближенно значение величины β_k во многих случаях не представляется возможным.

Исходя из этого, более предпочтительно рассматривать взаимное положение (расстояние между двумя ВО) как неизвестную постоянную величину Δy_k^0 . Принимая, как и прежде, что Δy_k является разностью между двумя измерениями координат ВО разнотипными источниками, случайные ошибки измерений координат $\varepsilon = \Delta y_k^0 - \Delta y_k$ будут подчинены нормальному закону распределения

$$\omega(\varepsilon) = 1/\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta k} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{(\Delta y_k^0 - \Delta y_k)^2}{\sigma_{\Delta k}^2} \right\}.$$

Предполагая, что минимально допустимое расстояние между ВО α_k задано, и известно максимально возможное отклонение между измеренными значениями признаков одного ВО от разнотипных ИРЛИ β_z , принятие решения о принадлежности измерений ИРЛИ к одному, либо к разным ВО, основывается на сравнении отношения правдоподобия с порогом, согласно соотношения:

$$\frac{\omega_1(\Delta y_k \Delta x_z; k \in r, z \in \theta / \Delta y_k^0 = 0, \Delta \bar{K}_z^0 = 0, |\Delta x_z^0| \leq \beta_z)}{\omega_2(\Delta y_k \Delta x_z; k \in r, z \in \theta / |\Delta y_k^0| \geq \alpha_k, |\Delta x_z^0| > \beta_z)} \geq \gamma_{\Xi}, \quad (3)$$

где Δx_z^0 – рассогласование между истинными значениями в пространстве параметрических признаков $z \in \theta$; $\Delta \bar{K}^0$ – рассогласование между истинными значениями составляющих вектора поведенческих признаков [5]; γ_{Ξ} – значение результирующего порога, размерность которого определяется размером пространства координатных параметров и признаков.

При получении некоторой фиксированной случайной выборки измерений Δy_k ; Δx_z и неизвестных параметрах $|\Delta y_k^0| \geq \alpha_k$, Δx_z^0 , вероятность события, состоящего в том, что интервалы $]-\infty; -\alpha_k]$, $[\alpha_k; +\infty[$ и $]-\infty; -\beta_z[$, $]\beta_z; +\infty[$ накроют соответственно величины Δy_k^0 и Δx_z^0 , может быть найдена из выражения

$$\begin{aligned} P\{-\infty \leq \Delta y_k^0 \leq -\alpha_k \text{ или } \alpha_k \leq \Delta y_k^0 \leq +\infty \text{ и } -\infty \leq \Delta x_z^0 < -\beta_z \text{ или } \beta_z < \Delta x_z^0 \leq +\infty\} = \\ = \int_{-\infty}^{-(\Delta y_k + \alpha_k)} \omega(\varepsilon_k) d\varepsilon_k + \int_{-(\Delta y_k - \alpha_k)}^{\infty} \omega(\varepsilon_k) d\varepsilon_k + \int_{-\infty}^{-(\Delta x_z + \beta_z)} \omega(\varepsilon_z) d\varepsilon_z + \int_{-(\Delta x_z - \beta_z)}^{\infty} \omega(\varepsilon_z) d\varepsilon_z. \end{aligned}$$

Совместная ПРВ координатных и признаковых параметров случайных величин Δy_k ; Δx_z при неизвестных Δy_k^0 и Δx_z^0 при условии, что $|\Delta y_k^0| \geq \alpha_k$, $|\Delta x_z^0| > \beta_z$, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \omega_2(\Delta y_k \Delta x_z; k \in \Gamma, z \in \theta | |\Delta y_k^0| \geq \alpha_k, |\Delta x_z^0| > \beta_z) = \frac{d}{d\Delta y_k d\Delta x_z} P\{\cdot\} = \\ = [\omega(\alpha_k - \Delta y_k) - \omega(-\alpha_k - \Delta y_k)] \times [\omega(\beta_z - \Delta x_z) - \omega(-\beta_z - \Delta x_z)] = \\ = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\Delta k}}} \left\{ e^{-\frac{(\alpha_k - \Delta y_k)^2}{2\pi\sigma_{\Delta k}^2}} - e^{-\frac{(-\alpha_k - \Delta y_k)^2}{2\pi\sigma_{\Delta k}^2}} \right\} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\Delta z}}} \left\{ e^{-\frac{(\beta_z - \Delta x_z)^2}{2\pi\sigma_{\Delta z}^2}} - e^{-\frac{(-\beta_z - \Delta x_z)^2}{2\pi\sigma_{\Delta z}^2}} \right\}. \end{aligned}$$

Подставляя полученные выражения в (3), решающее правило, на основании которого должны приниматься решения о тождественности измерений координатной и признаковой информации от разнотипных ИРЛИ, примет вид:

$$\left\{ e^{\frac{\alpha_k \Delta y_k}{\sigma_{\Delta k}^2}} - e^{-\frac{\alpha_k \Delta y_k}{\sigma_{\Delta k}^2}} \right\} \leq \frac{1}{\gamma_k} e^{\frac{\alpha_k^2}{2\sigma_{\Delta k}^2}} \wedge \left\{ e^{\frac{\beta_z \Delta x_z}{\sigma_{\Delta z}^2}} - e^{-\frac{\beta_z \Delta x_z}{\sigma_{\Delta z}^2}} \right\} \leq \frac{1}{\gamma_z} e^{\frac{\beta_z^2}{2\sigma_{\Delta z}^2}} \wedge \Delta \bar{K} = 0,$$

где γ_k и γ_z – пороговые значения для принятия решения о тождественности измеренных значений координатных параметров и параметриче-

ских признаков соответственно; $\Delta\bar{K}$ – отклонения измеренных значений составляющих вектора логических поведенческих признаков, \wedge – знак конъюнкции, обозначающий логическую операцию И.

В случае несовпадения словарей признаков на источниках, анализу на возможность отождествления подлежат только измеренные значения координатных параметров, а по измеренным значениям признаков ВО принимается решение о их непротиворечивости (согласованности).

Проведенные статистические испытания свидетельствуют, что в зависимости от сложности условий радиолокационного наблюдения, использование предлагаемого метода позволяет повысить качество информации о воздушной обстановке, а именно: достоверность информации повышается на 12 – 30%, полнота на 5 – 17%, точность на 18 – 33% при приемлемом росте требований к производительности и объемам оперативной памяти вычислительных средств СОРЛИ.

Выводы. В статье приводится метод совместного объединения координатной и признаковой информации от разнотипных источников, который отличается от известных полученными впервые решающими правилами отождествления измерений разнотипных источников. Метод позволяет учитывать особенности функционирования разнотипных источников, определяющие различия в содержании координатной и признаковой информации, выдаваемой в СОРЛИ. Использование предложенного метода позволяет обеспечить потребителей информацией о воздушной обстановке требуемого качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин С.З. *Цифровая радиолокация. Введение в теорию.* – К.: Издательство КВИЦ, 2000. – 428 с.
2. Chen H., Kirubarjan T., Bar-Shalom Y. *Centralized vs. Distributed Tracking Algorithms for Air to Air Scenarios // Proc. of SPIE Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets.* – 2000. – Vol. 4048. – P. 318 – 324.
3. *Автоматизация обработки, передачи и отображения радиолокационной информации / Под ред. В.Г. Корякова.* – М.: Сов. радио, 1975. – 304 с.
4. Шило С.Г. *Метод статистического синтеза алгоритмов комбинированного объединения и обобщения радиолокационной информации // Вісник МСУ. „Технічні науки”.* – Х.: МСУ. – 2002. – Том 5, № 7. – С. 9 – 12.
5. Войтович С.А., Шило С.Г. *Метод совместного объединения и обобщения информации о воздушной обстановке в системах обработки радиолокационной информации // Системи обробки інформації.* – Х.: ХВУ. – 2004. – Вип. 1. – С. 200 – 207.

Поступила 22.04.2005

Рецензент: кандидат технических наук профессор Б.Н.Судаков,
Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.