

УДК 621.396.96

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕДИНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОТ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЁННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Пальгуев Дмитрий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники радиофизического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского» (ННГУ)¹.

E-mail: dmi-palguev@yandex.ru.

Фитасов Евгений Сергеевич

доктор технических наук, и.о. заведующего кафедрой радиотехники радиофизического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского» (ННГУ)¹.

E-mail: fitasoves@mail.ru.

Борзов Андрей Борисович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автономных информационных систем Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)².

Павлов Григорий Львович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автономных информационных систем Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)².

Васильев Дмитрий Александрович

ассистент кафедры автономных информационных систем Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)².

¹*Адрес:* 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.

²*Адрес:* 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Аннотация: Применение сетевых структур в информационных системах позволяет осуществлять одноуровневую обработку результатов радиолокационных измерений. В статье получены математические выражения для оценки вероятностных параметров объединения информации радиолокационных измерений от некогерентных пространственно-разнесённых источников в сетевых информационных системах. Определение размеров строга точного отбора по заданной вероятности объединения информации при использовании алгоритма сетевой обработки позволяет уменьшить количество вычислений при последующем попарном сравнении сообщений вследствие уменьшения размеров строга, тем самым сократить время обработки радиолокационных данных в информационной системе, а также повысить точность и достоверность информации, передаваемой потребителям. Полученные математические выражения могут быть использованы при оценке достоверности информации в математических моделях сетевых информационных систем.

Ключевые слова: радиолокационная информация, информационная система, вероятность, третичная сетевая обработка, радиолокационный мониторинг.

1. Введение

Объединение радиолокационной информации от пространственно-разнесённых источников широко применяется в современных системах метеорологического мониторинга воздушного пространства, управления воздушным движением, радиолокационной разведки и т.д.[1–11].

Известно [1, 12, 13], что источники информации могут быть когерентными (синхронизированными по времени) или некогерентными (т.е. информация от источников потребителю поступает асинхронно). Однако в большинстве практических случаев источники радиолокационной информации являются некоге-

рентными, так как имеют более простую техническую реализацию по сравнению с когерентными из-за отсутствия необходимости синхронизации. При этом очевидно, что «некогерентное» объединение информации будет иметь меньшую эффективность по сравнению с «когерентным».

Информация, получаемая посредством радиолокационных измерений от пространственно-разнесённых источников, как правило, объединяется в узлах информационных систем. В свою очередь, информационные системы строятся по иерархическим или сетевым принципам.

Применение классических алгоритмов объединения информации при обработке результатов радиолокационных измерений от пространственно-разнесённых источников и последующем обмене объединённой радиолокационной информацией (РЛИ) в сетевых информационных системах сталкивается с рядом серьезных проблем [14]. Алгоритмы объединения информации изначально были ориентированы на иерархические структуры информационных систем, что обуславливало их основные достоинства и недостатки. К существенным недостаткам относятся задержки информации за счёт обработки в узлах системы, задержки вследствие обмена информацией в многоуровневой структуре, и, как следствие, снижение достоверности объединённой информации. Достоверность информации можно повысить, если построить одноуровневую иерархическую систему обработки и выдачи информации потребителям. Так, например, в 2011 году корпорация Northrop Grumman представила устройство Multi-Radar Tracker (MRT) [2], способное обрабатывать информацию от 32-х радаров производительностью по 1000 трасс каждый. После объединения информация о воздушной обстановке на значительном пространстве выдаётся заинтересованным потребителям. Недостатками подобной системы являются: огромное количество линий передачи данных от источников к центру обработки, и от него – к потребителям, а также необходи-

мость разделения полномочий по обработке информации о воздушных объектах (ВО) на границах зон ответственности центров обработки радиолокационной информации.

Традиционно алгоритмы объединения информации радиолокационных измерений от пространственно-разнесённых источников в соответствии с классификацией, предложенной в [15], основаны на «группе схем ветвящихся решений». После получения каждого сигнала вырабатывается несколько возможных решений, одно из которых признается действующим, а другие гипотетическими. С получением следующего сигнала принимается новая группа возможных решений, при этом каждое из предыдущих решений используется в качестве априорной информации для последующих. Такая процедура требует проверки нескольких вариантов непрерывно возрастающего числа гипотез.

Для того чтобы ограничить это возрастание, принимают специальные меры по отсечению ветвей, что также связано с потерями информации, так как является, по существу, принятием априорного решения. В [15] отмечается, что эта группа схем обработки даёт удовлетворительные, а в некоторых случаях хорошие результаты, если расстояние между целями намного превышает ошибки измерений, экстраполированные на интервал времени между двумя измерениями. Если поток целей плотный, то может оказаться, что ветвящиеся алгоритмы либо не обеспечивают сходимости, либо окажутся неэффективными. Указанная группа схем обработки обеспечивает наибольшую экономию средств обработки и поэтому широко распространена в существующих информационных системах.

В этих схемах снижаются все показатели качества по сравнению с потенциальными возможностями системы, и степень этого снижения зависит от распределения целей и от модели ошибок. В наибольшей степени недостатки схем этой группы скажутся в случае плотного информационного потока. Это особенно плохо для систем, которые должны точно определять

число регистрируемых радиолокационных объектов. Поэтому такие алгоритмы, по мнению [15], мало применимы для систем, которые должны иметь очень высокую пропускную способность.

Классические алгоритмы третичной обработки РЛИ от пространственно-разнесённых источников допускают формирование нескольких ветвящихся решений в одном цикле алгоритма. Соответственно, математические выражения для условной вероятности отождествления [12, с. 424] будут иметь вид:

$$P(\Delta U_{ir} \leq \Delta U_{cmp} \Delta S = 0) = \int_{-\infty}^{\infty} w(U_i) \left[\int_{U_i - \Delta U_{cmp}}^{U_i + \Delta U_{cmp}} w(\Delta U_{ir}) dU_{ir} \right] dU_i, \quad (1)$$

$$P(\Delta U_{ir} \leq \Delta U_{cmp} \Delta S \neq 0) = \int_{-\infty}^{\infty} w(U_i) \left[\int_{U_i - \Delta U_{cmp}}^{U_i + \Delta U_{cmp}} w(\Delta U_{ir}) dU_{ir} \right] dU_i, \quad (2)$$

где ΔU_{cmp} – размеры строга, образованного вокруг отметки от i -го источника, ΔU_{ir} – расстояние между отметками от i -го и r -го источников при условии, что отметки принадлежат одному и тому же объекту $\Delta S = 0$, или если расстояние между объектами $\Delta S \neq 0$ и объекты разные, w – функция плотности распределения вероятности отождествления.

В случае отождествления по одной координате x выражения (1, 2) принимают вид:

$$P(\Delta x_{ir} \leq \Delta x_{cmp} | \Delta S_x = 0) = \frac{1}{2\pi\sigma_i\sigma_r} \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\pi\sigma_i^2}\right) \left\{ \int_{x_i - \Delta x_{cmp}}^{x_i + \Delta x_{cmp}} \exp\left(-\frac{\Delta x_{ir}^2}{2\pi\sigma_r^2}\right) dx_{ir} \right\} dx_i, \quad (3)$$

$$P(\Delta x_{ir} \leq \Delta x_{cmp} | \Delta S_x \neq 0) = \frac{1}{2\pi\sigma_i\sigma_r} \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\pi\sigma_i^2}\right) \left\{ \int_{x_i - \Delta x_{cmp}}^{x_i + \Delta x_{cmp}} \exp\left(-\frac{(\Delta x_{ir}^2 + \Delta S_x^2)}{2\pi\sigma_r^2}\right) dx_{ir} \right\} dx_i. \quad (4)$$

Выражения (1)–(4) справедливы в ситуации при наличии сообщений по одному или двум

воздушным объектам от двух источников, при полном отсутствии других сообщений. Априорным условием является знание факта – отличаются два объекта друг от друга или нет. На практике это условие, как правило, невыполнимо. Сама процедура отождествления должна дать ответ на вопрос: принадлежат отметки о сообщениях от разных источников одному и тому же или разным объектам.

Ветвящиеся решения, кроме наличия в самом алгоритме третичной обработки, возникают на более высоком уровне – на уровне одного временного цикла обработки в устройствах или центрах обработки информации, при наличии большого количества обрабатываемых результатов измерений от нескольких источников. На размеры строга точного отбора и вероятность объединения информации будут влиять ошибки экстраполяции, ошибки пересчётов координат и задержки времени на обработку в узлах иерархической структуры. Следовательно, условия для выражений вероятности отождествления (1–4) изменятся, и они перестанут быть корректными.

Таким образом, построение эффективных информационных моделей функционирования иерархических информационных систем является достаточно сложной задачей вследствие высокой динамики информационных процессов, большого количества параметров и характеристик, подлежащих учёту. Математический аппарат для описания процессов отождествления (объединения) радиолокационной информации от пространственно-разнесённых источников в информационных системах при наличии большого количества воздушных объектов развит недостаточно. На практике размеры стробов точного отождествления и вероятность отождествления определяются, как правило, эмпирическим способом.

2. Алгоритм сетевой обработки радиолокационных измерений от пространственно-разнесённых источников

Повысить вероятность объединения, а также точность и достоверность информации можно,



если использовать при объединении радиолокационной информации алгоритм сетевой обработки, предложенный в [16]. Особенность данного алгоритма заключается в объединении радиолокационной информации, поступающей в сетевую информационную систему, с информацией, находящейся в сети. При этом сама сеть своей структурой обеспечивает одноуровневую обработку и доставку информации потребителям с минимальной задержкой по времени.

Алгоритм сетевой обработки [16], разработанный для информационной системы сетевой структуры [17], позволяет получить строгое математическое выражение для определения размеров строга точного отбора при объединении РЛИ. В этом способе обработки вследствие особенностей построения этапов алгоритма не допускается формирование нескольких ветвящихся решений, принадлежащих одному циклу обработки. К рассмотрению привлекается только одно ветвящееся решение, возникающее при получении очередного (любого) сообщения от любого источника. Обработка этого поступившего сообщения проводится без прерываний в алгоритме, от начала до конца, то есть до формирования объединенной информации. Число ветвей в самом алгоритме сведено к минимуму. Блок-схема алго-

ритма третичной сетевой обработки в соответствии с [16] показана на рис. 1.

Мы не будем рассматривать содержание всех этапов сетевой обработки РЛИ, а сосредоточим внимание на одном из самых важных этапов – этапе точного отбора, и определении вероятности точного отбора при объединении сообщений от разных источников. Наличие только одного ветвящегося решения позволяет наиболее полно воспользоваться априорными данными источников РЛИ, а именно их среднеквадратическими отклонениями, и получить матема-

тические выражения для вероятности объединения единственного поступившего сообщения с сообщениями, уже имеющимися в массивах данных средств обработки РЛИ.

Отметим, что вероятностные параметры этапа объединения РЛИ рассматриваются без учёта ошибок и погрешностей, которые могут возникнуть на предыдущих этапах алгоритма сетевой третичной обработки, а также в результате обработки информации непосредственно на источниках. В качестве систематических и случайных ошибок, формируемых на источниках, могут быть ошибки юстирования местоположения, ошибки и погрешности выбранных методов экстраполяции и сглаживания, временные задержки в каналах передачи данных и другие. Ошибками и погрешностями, возникающими на этапах, предшествующих этапу объединения в алгоритме сетевой третичной обработки, могут являться погрешности при вычислении строга предварительного отбора, ошибки, вызванные применением предположения равномерного прямолинейного движения при экстраполяции, ошибки в результате пересчёта координат, и ряд других. Определённым допущением также является предположение о характере ошибок определения координат воздушных объектов, подчиняющихся нормальному распределению вероят-

ности. Поэтому полученные математические выражения могут являться отправной точкой для построения для построения более совершенных моделей оценки вероятностных параметров алгоритма объединения РЛИ при сетевой третичной обработке.

Предположим, что на устройстве обработки РЛИ, через которое осуществляется ввод информации в информационную систему, имеются сообщения от одного источника J_{11} и J_{21} (первый индекс означает номер сообщения, второй – номер источника). В момент времени t_{12} поступает новое сообщение J_{12} о воздушном объекте от второго источника.

В соответствии с этапами способа третичной сетевой обработки [16], сначала выполним пересчёт координат, содержащихся в сообщении J_{12} , в систему координат устройства обработки РЛИ. Затем проведём этап предварительного отбора. Будем полагать, что сообщения J_{11} и J_{21} соответствуют его критериям. Далее экстраполируем сообщения J_{11} и J_{21} на момент времени t_{12} поступления сообщения J_{12} .

После этого переходим к этапу точного отбора сообщений. Сущность этого отбора состоит в том, что сообщения J_{11} , J_{21} подвергаются попарной проверке с вновь пришедшим сообщением J_{12} на предмет объединения с требуемой вероятностью.

Пусть ошибки измерения координат источников подчиняются нормальному закону. Так, плотность распределения вероятности координаты x сообщений, поступающих от источника № 1, может быть представлена в виде [18]:

$$f_1(x_1) = \frac{1}{\sigma_{x_1} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_1 - \bar{x}_1)^2}{2\sigma_{x_1}^2}\right), \quad (5)$$

где σ_{x_1} – среднеквадратическое отклонение (СКО) координаты x_1 ; \bar{x}_1 – математическое ожидание случайной величины x_1 .

По аналогии, для сообщений, поступающих от источника № 2, плотность распределения вероятности координаты x может быть представлена в виде:

$$f_2(x_2) = \frac{1}{\sigma_{x_2} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_2 - \bar{x}_2)^2}{2\sigma_{x_2}^2}\right), \quad (6)$$

Разность координат также является случайной величиной [18, с. 360], плотность распределения вероятности которой в соответствии с [19, с. 331], как модуля разности случайных величин $\Delta x = |x_1 - x_2|$, определяется выражением:

$$f(\Delta x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(x_2) \times [f_1(x_2 + \Delta x) + f_1(x_2 - \Delta x)] dx_2, \quad (7)$$

Преобразуем выражение (7) в сумму интегралов:

$$f(\Delta x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(x_2) f_1(x_2 + \Delta x) dx_2 + \int_{-\infty}^{\infty} f_2(x_2) f_1(x_2 - \Delta x) dx_2. \quad (8)$$

Подставляя формулы (5) и (6) в (8), получим выражение для плотности распределения вероятности случайной величины Δx :

$$f(\Delta x) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x_1}\sigma_{x_2}} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x_2 - \bar{x}_2)^2}{2\sigma_{x_2}^2}\right) \times \exp\left(-\frac{(x_2 - \bar{x}_1 + \Delta x)^2}{2\sigma_{x_1}^2}\right) dx_2 + \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x_2 - \bar{x}_2)^2}{2\sigma_{x_2}^2}\right) \times \exp\left(-\frac{(x_2 - \bar{x}_1 - \Delta x)^2}{2\sigma_{x_1}^2}\right) dx_2 \right], \quad (9)$$

или, после преобразования, получаем

$$f(\Delta x) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x_1}\sigma_{x_2}} \times \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x_2 - \bar{x}_2)^2}{2\sigma_{x_2}^2} - \frac{(x_2 - \bar{x}_1 + \Delta x)^2}{2\sigma_{x_1}^2}\right) dx_2 + \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x_2 - \bar{x}_2)^2}{2\sigma_{x_2}^2} - \frac{(x_2 - \bar{x}_1 - \Delta x)^2}{2\sigma_{x_1}^2}\right) dx_2 \right]. \quad (10)$$

Соответственно, для трёхмерной плотности распределения вероятности случайных величин Δy и Δz определяются выражениями:

$$f(\Delta y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{y_1}\sigma_{y_2}} \times \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(y_2 - \bar{y}_2)^2}{2\sigma_{y_2}^2} - \frac{(y_2 - \bar{y}_1 + \Delta y)^2}{2\sigma_{y_1}^2}\right) dy_2 + \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(y_2 - \bar{y}_2)^2}{2\sigma_{y_2}^2} - \frac{(y_2 - \bar{y}_1 - \Delta y)^2}{2\sigma_{y_1}^2}\right) dy_2 \right]; \quad (11)$$

$$f(\Delta z) = \frac{1}{2\pi\sigma_{z_1}\sigma_{z_2}} \times \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(z_2 - \bar{z}_2)^2}{2\sigma_{z_2}^2} - \frac{(z_2 - \bar{z}_1 + \Delta z)^2}{2\sigma_{z_1}^2}\right) dz_2 + \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(z_2 - \bar{z}_2)^2}{2\sigma_{z_2}^2} - \frac{(z_2 - \bar{z}_1 - \Delta z)^2}{2\sigma_{z_1}^2}\right) dz_2 \right]. \quad (12)$$

Кроме данных по координатам воздушных объектов, в сообщениях имеются данные по составляющим их скоростей V_x, V_y, V_z . Будем полагать, что измеренные значения скоростей распределены по нормальному закону. Поэтому считаем, что плотности распределения вероятности случайных величин модулей разности составляющих скоростей также выражаются аналогично плотностям распределения случайных величин модулей разности координат:

$$f(\Delta V_x) = \frac{1}{2\pi\sigma_{V_{x1}}\sigma_{V_{x2}}} \times \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(V_{x_2} - \bar{V}_{x_2})^2}{2\sigma_{V_{x2}}^2} - \frac{(V_{x_2} - \bar{V}_{x_1} + \Delta V_x)^2}{2\sigma_{V_{x1}}^2}\right) dV_{x_2} + \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(V_{x_2} - \bar{V}_{x_2})^2}{2\sigma_{V_{x2}}^2} - \frac{(V_{x_2} - \bar{V}_{x_1} - \Delta V_x)^2}{2\sigma_{V_{x1}}^2}\right) dV_{x_2} \right]; \quad (13)$$

$$f(\Delta V_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{V_{y1}}\sigma_{V_{y2}}} \times$$

$$\times \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(V_{y_2} - \bar{V}_{y_2})^2}{2\sigma_{V_{y2}}^2} - \frac{(V_{y_2} - \bar{V}_{y_1} + \Delta V_y)^2}{2\sigma_{V_{y1}}^2}\right) dV_{y_2} + \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(V_{y_2} - \bar{V}_{y_2})^2}{2\sigma_{V_{y2}}^2} - \frac{(V_{y_2} - \bar{V}_{y_1} - \Delta V_y)^2}{2\sigma_{V_{y1}}^2}\right) dV_{y_2} \right]; \quad (14)$$

$$f(\Delta V_z) = \frac{1}{2\pi\sigma_{V_{z1}}\sigma_{V_{z2}}} \times \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(V_{z_2} - \bar{V}_{z_2})^2}{2\sigma_{V_{z2}}^2} - \frac{(V_{z_2} - \bar{V}_{z_1} + \Delta V_z)^2}{2\sigma_{V_{z1}}^2}\right) dV_{z_2} + \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(V_{z_2} - \bar{V}_{z_2})^2}{2\sigma_{V_{z2}}^2} - \frac{(V_{z_2} - \bar{V}_{z_1} - \Delta V_z)^2}{2\sigma_{V_{z1}}^2}\right) dV_{z_2} \right]. \quad (15)$$

В [18, с. 230] показано, что в случае некоррелированности случайных величин X и Y , их совместная плотность распределения равна произведению плотностей распределения каждой из случайных величин. Поэтому можно полагать, что выражение для трёхмерной плотности распределения трёх случайных некоррелированных величин $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ имеет следующий вид:

$$f(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = f(\Delta x)f(\Delta y)f(\Delta z). \quad (16)$$

Для многомерной плотности распределения модулей разностей некоррелированных величин координат $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ и составляющих скоростей $\Delta V_x, \Delta V_y, \Delta V_z$ выражение (16) можно представить как

$$f(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta V_x, \Delta V_y, \Delta V_z) = f(\Delta x)f(\Delta y)f(\Delta z)f(\Delta V_x)f(\Delta V_y)f(\Delta V_z). \quad (17)$$

3. Вероятность объединения информации радиолокационных измерений от пространственно-разнесённых источников

Допустим, что вероятность объединения $P_{объед}$ данных о воздушных объектах задана потребителем. В этом случае, для определения размеров строга точного отбора необходимо решить задачу нахождения пределов интегрирования

Δx , Δy , Δz по известной вероятности объединения:

$$P_{объед \Delta x} = \frac{1}{2\pi\sigma_{x_1}\sigma_{x_2}} \times \int_{-\infty}^{\Delta x} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x_2 - \bar{x}_2)^2}{2\sigma_{x_2}^2} - \frac{(x_2 - \bar{x}_1 + \Delta x)^2}{2\sigma_{x_1}^2}\right) dx_2 + \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x_2 - \bar{x}_2)^2}{2\sigma_{x_2}^2} - \frac{(x_2 - \bar{x}_1 - \Delta x)^2}{2\sigma_{x_1}^2}\right) dx_2 \right] d\Delta x; \quad (18)$$

$$P_{объед \Delta y} = \frac{1}{2\pi\sigma_{y_1}\sigma_{y_2}} \times \int_{-\infty}^{\Delta y} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(y_2 - \bar{y}_2)^2}{2\sigma_{y_2}^2} - \frac{(y_2 - \bar{y}_1 + \Delta y)^2}{2\sigma_{y_1}^2}\right) dy_2 + \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(y_2 - \bar{y}_2)^2}{2\sigma_{y_2}^2} - \frac{(y_2 - \bar{y}_1 - \Delta y)^2}{2\sigma_{y_1}^2}\right) dy_2 \right] d\Delta y; \quad (19)$$

$$P_{объед \Delta z} = \frac{1}{2\pi\sigma_{z_1}\sigma_{z_2}} \times \int_{-\infty}^{\Delta z} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(z_2 - \bar{z}_2)^2}{2\sigma_{z_2}^2} - \frac{(z_2 - \bar{z}_1 + \Delta z)^2}{2\sigma_{z_1}^2}\right) dz_2 + \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(z_2 - \bar{z}_2)^2}{2\sigma_{z_2}^2} - \frac{(z_2 - \bar{z}_1 - \Delta z)^2}{2\sigma_{z_1}^2}\right) dz_2 \right] d\Delta z. \quad (20)$$

Эта задача решается численными методами [12]. Результатом является нахождение величин Δx , Δy , Δz , которые и определяют размер строка точного отбора при заданной вероятности объединения.

Если учесть корреляционную матрицу ошибок измерения Ψ_{12} для вектора разности параметров сравниваемых сообщений источников № 1 и № 2, то, в соответствии с [12], и в предположении, что ошибки измерения источника № 1 при измерении координат близко расположенных воздушных объектов имеют одинаковые корреляционные матрицы ошибок, то есть

$$\Psi_{11} = \Psi_{21} = \Psi_1, \quad (21)$$

то корреляционная матрица ошибок для векторов разности параметров сравниваемых сообщений с учётом (21) принимает следующее выражение:

$$\Psi_{ij/12} = \Psi_1 + \Psi_2, \quad (22)$$

где i – номер сообщения, а j – номер источника РЛИ.

В предположении, что объединение производится по координатам x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} и составляющим скоростей V_{xj} , V_{yj} , V_{zj} (при отсутствии корреляции между ними), корреляционная матрица ошибок (22) источников № 1 и № 2 запишется в виде

$$\Psi_{11/12} = \Psi_{21/12} = \Psi_1 + \Psi_2 = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{V_x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{V_y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{V_z}^2 \end{pmatrix} \quad (23)$$

где $\sigma_x^2 = \sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2$; $\sigma_y^2 = \sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2$;
 $\sigma_z^2 = \sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2$; $\sigma_{V_x}^2 = \sigma_{V_{x1}}^2 + \sigma_{V_{x2}}^2$;
 $\sigma_{V_y}^2 = \sigma_{V_{y1}}^2 + \sigma_{V_{y2}}^2$; $\sigma_{V_z}^2 = \sigma_{V_{z1}}^2 + \sigma_{V_{z2}}^2$.

Пропустим ряд промежуточных выражений и представим выражения (18–20) с учётом составляющих скоростей V_{xj} , V_{yj} , V_{zj} в другой форме:

$$P_{объед} = \frac{1}{(2\pi)^3 \sqrt{|\Psi_{12}|}} \left(\int_0^{\Delta x} \int_0^{\Delta y} \int_0^{\Delta z} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x^2}{\sigma_x^2} + \frac{\Delta y^2}{\sigma_y^2} + \frac{\Delta z^2}{\sigma_z^2} \right) d\Delta x d\Delta y d\Delta z \right] \times \left(\int_0^{\Delta V_x} \int_0^{\Delta V_y} \int_0^{\Delta V_z} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_x^2}{\sigma_{V_x}^2} + \frac{\Delta V_y^2}{\sigma_{V_y}^2} + \frac{\Delta V_z^2}{\sigma_{V_z}^2} \right) d\Delta V_x d\Delta V_y d\Delta V_z \right] \right), \quad (24)$$

где пределы интегрирования Δx , Δy , Δz , ΔV_x ,

$\Delta V_y, \Delta V_z$ определяются в соответствии с требуемой потребителем вероятностью объединения информации.

Учитывая, что плотность распределения вероятности симметрична относительно оси ординат и что модуль принимает только положительные значения, для дальнейшего преобразования выражения (24) в части вероятности объединения по координатам применим функцию Лапласа вида:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (25)$$

С учётом (21) выражение для вероятности объединения по трём координатам принимает вид:

$$P_{\text{объед}} = \frac{2\Phi(\Delta x)}{\sigma_x} \frac{2\Phi(\Delta y)}{\sigma_y} \frac{2\Phi(\Delta z)}{\sigma_z}, \quad (26)$$

где $t_x = \frac{\Delta x}{\sigma_x}$, $t_y = \frac{\Delta y}{\sigma_y}$, $t_z = \frac{\Delta z}{\sigma_z}$, а $\sigma_x = \sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2}$,

$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2}$, $\sigma_z = \sqrt{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2}$ соответственно.

С теоретической точки зрения вероятность правильного объединения $P_{\text{объед}}$ не должна зависеть от увеличения количества ВО или структуры информационной системы. На практике с увеличением количества ВО в иерархической информационной системе вероятность правильного объединения данных при третичной обработке ухудшается, и в некоторый момент наступает информационная перегрузка и значительное уменьшение достоверности информации. Это происходит в основном вследствие временных задержек при обработке измерений в узлах информационной системы иерархической структуры. При объединении информации в сетевой информационной структуре состояние информационной перегрузки наступает при большем количестве обрабатываемых данных о воздушных объектах. Количественные характеристики вероятности правильного объединения (и размеров строга точного отбора) и её изменения при различных количествах обрабатываемых объ-

ектов могут быть получены при динамическом моделировании информационных процессов, происходящих в системах обработки информации различных структур.

Литература

1. Ермолаев В.Т., Морозов К.А., Солоницына А.А. Разнесённый приём на основе корреляционной обработки сигналов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2017. № 12. С. 1109–1116.
2. Multi-radar tracker (MRT). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.es.northropgrumman.com/> (дата доступа: 12.03.2020).
3. Лучков Н.В. Анализ объединения данных РЛС, их временная и пространственная привязки // Автоматизация процессов управления. 2015. № 1 (39). С. 21–26.
4. Хомяков А.В., Филипченков В.И., Мамон Ю.И. Алгоритмы совместной траекторной обработки в многопозиционном радиолокационном комплексе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 2. С. 305–314.
5. Архимандритов И.Б., Белов С.Г., Верба В.С., Липатов А.А., Миляков Д.А., Сидоров И.А., Четыркин Д.Ю. Задача разработки модели цифровой платформы сбора, обработки и распространения пространственных данных, построенной с использованием сетцентрической авиационной системы мониторинга // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 5. С. 8.
6. Коновалов А.А. Алгоритм завязки траектории цели в асинхронном многопозиционном радиолокационном комплексе // Радиотехника. 2012. № 7. С. 50–55.
7. Кирюшкин В.В., Волков Н.С. Межпозиционное отождествление результатов измерений и определение координат воздушных целей в многопозиционной радиолокационной системе на беспилотных летательных аппаратах // Теория и техника радиосвязи. 2019. № 1. С. 107–116.
8. Журавлёв А.В., Кирюшкин В.В., Коровин А.В. Алгоритм межпозиционного отождествления результатов измерений в суммарно-дальномерной многопозиционной радиолокационной системе в условиях многоцелевой обстановки // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 180–189.
9. Языров Э.В., Аравин А.В., Михайлов С.В., Филлошкин И.П. Выбор вида и параметров стробов при отождествлении координатной информации от средств обнаружения воздушных целей в комплексе средств автоматизации батарейного командного пункта // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 4 (48). С. 88–95.
10. Воронина Н.Г., Шафранюк А.В. Проблемные вопросы решения задач при вторичной и третичной

обработке данных в системах освещения обстановки // В сборнике: Материалы конференции "Управление в морских системах" (УМС-2018). 2018. С. 215–221.

11. Морозов Г.В., Давыдов А.В., Мальцев А.А. Координированная пространственная обработка сигналов на базовых станциях систем сотовой связи с адаптивным выбором поляризации // Известия вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 8. С. 586.

12. Кузьмин С.З. Основы цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. радио, 1974. 432 с.

13. Охрименко А.Е. Основы обработки и передачи информации. Минск: МВИЗРУ ПВО, 1990. 180 с.

14. Кореньков В. Моисеенко П., Семёнов С. Время нового подхода. Агрегирование информации – эффективный способ борьбы с информационными перегрузками // Воздушно-космическая оборона. 2006. № 3 (28).

Поступила 16 марта 2020 г.

15. Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С. Введение в радиолокационную системотехнику. М.: Сов. радио, 1971. 368 с.

16. Пат. РФ № 2461843, МПК G01S 13/91 (2006.01). Способ обработки радиолокационной информации в сетевой информационной структуре автоматизированной системы управления / Пальгуев Д.А., Таныгин А.А. Заявл. 29.04.2011; опубл. 20.09.2012. Бюл. № 26.

17. Пат.102269 РФ, МПК G01S 13/91 (2006.01). Автоматизированная система передачи радиолокационной информации / Пальгуев Д.А., Таныгин А.А. Заявл. 07.09.2010; опубл.20.02.2011. Бюл. № 5.

18. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.

19. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.

English

PROBABILITY PARAMETERS FOR FUSION OF RADAR MEASUREMENT DATA FROM SPACED-APART SOURCES

Dmitry Anatolyevich Palguev – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Radio Engineering Department in Radio Physics Faculty, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN)¹.

E-mail: dmi-palguev@yandex.ru.

Evgeny Sergeevich Fitsov – Doctor of Engineering Sciences, Acting Head of Radio Engineering Department in Radio Physics Faculty, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN)¹.

E-mail: fitsoves@mail.ru.

Andrei Borisovich Borzov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Autonomous Information Systems, Bauman Moscow State Technical University (National Research University)².

Grigoriy Lvovich Pavlov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Autonomous Information Systems, Bauman Moscow State Technical University (National Research University)².

Dmitriy Alexandrovich Vasilyev – Assistant Lecturer, Department of Autonomous Information Systems, Bauman Moscow State Technical University (National Research University)².

¹*Address:* 603950, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Gagarin Av., 23.

²*Address:* 105005, Russian Federation, Moscow, 2nd Bauman St., 5, b. 1.

Abstract: The fusion of radar data from spaced-apart sources is widely used in current systems for airspace weather monitoring, air traffic control, radar reconnaissance, etc. Data obtained through radar measurements from spaced-apart sources is fused as a rule in data system hubs. On the other hand, data systems are built according to hierarchical or network principles. The use of classical data fusion algorithms during processing radar measurements from spaced-apart sources and subsequent exchange of fused radar data in network data systems encounters a number of serious problems, in particular, failure to obtain the exact expression of probability for data fusion at the stage of correct selection. The research work provides strict mathematical expressions to estimate the probability for fusion of radar measurement data from non-coherent spaced-apart sources when a number of conditions are met, namely, fusion is performed in data system hub of network structure; network processing algorithm is used for fusion which due to peculiarities of its forming enables to process

only one branching solution - one message about the air target. When specified conditions are met, probability of data fusion is the same for each received message about the air target and it does not depend on processing cycles' time in data system hub, on the number of measurements processed, on data transmission channels' occupation, etc., unlike the case is with conventional processing algorithms. The obtained expressions for calculating probability of accurate selection can be used in making mathematical models of data systems' functioning. Inverse solution - strobe sizing of correct selection through specified probability of data fusion using network processing algorithm enables to reduce the number of calculations during subsequent pair-wise comparison of messages.

Keywords: radar data, data system, probability, tertiary network processing, radar monitoring.

References

1. *Ermolaev V.T., Morozov K.A., Solonitsyna A.A.* Distributed reception based on correlation processing of signals. Proceedings of higher educational institutions. Radiophysics. 2017. No. 12. Pp. 1109–1116.
2. Multi-radar tracker (MRT). [Electronic source]. URL: <http://www.es.northropgrumman.com/> (access date: 12.03.2020).
3. *Luchkov N.V.* Analysis of combining radar data, their temporal and spatial reference. *Avtomatizaciya processov upravleniya*. 2015. No. 1 (39). Pp. 21–26.
4. *Khomyakov A.V., Filipchenkov V.I., Mamon Yu.I.* Algorithms for joint trajectory processing in a multi-position radar complex. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2016. No. 2. Pp. 305–314.
5. *Archimandritov I.B., Belov S.G., Verba V.S., Lipatov A.A., Milyakov D.A., Sidorov I.A., Chetyrkin D.Yu.* The Task of developing a model of a digital platform for collecting, processing and distributing spatial data built using a network-centric aviation monitoring system. *Journal of Radioelectronics*. 2018. No. 5. P. 8.
6. *Konovalov A.* Algorithm for tying the target trajectory in an asynchronous multi-position radar system. *Radio-tehnika*. 2012. No. 7. Pp. 50–55.
7. *Kiryushkin V.V., Volkov N.S.* Inter-position identification of measurement results and determination of coordinates of air targets in a multi-position radar system on unmanned aerial vehicles. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*. 2019. No. 1. Pp. 107–116.
8. *Zhuravlev A.V., Kiryushkin V.V., Korovin A.V.* Algorithm for inter-position identification of measurement results in a total-range multi-position radar system in a multi-purpose environment. *Radiotekhnika*. 2019. Vol. 83. No. 6 (8). Pp. 180–189.
9. *Zyabirov E.V., Aravin A.V., Mikhailov S.V., Filyushkin I.P.* Selection of the type and parameters of strobes when identifying coordinate information from air target detection devices in the complex of battery command post automation tools. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki*. 2018. No. 4 (48). Pp. 88–95.
10. *Voronina N.G., Shafranyuk A.V.* Problematic issues of solving problems in secondary and tertiary data processing in lighting systems. Proceedings of the conference "Management in marine systems" (UMS-2018). 2018. Pp. 215–221.
11. *Morozov G.V., Davydov A.V., Maltsev A.A.* Coordinated spatial signal processing at base stations of cellular communication systems with adaptive polarization selection. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. 2012. Vol. 55. No. 8. P. 586.
12. *Kuzmin S.Z.* Fundamentals of digital processing of radar information. *Radio*, 1974. 432 p.
13. *Okhrimenko A.E.* Fundamentals of processing and transmitting information. Minsk: the higher school of air defense, 1990. 180 p.
14. *Korenkov V., Moiseenko P., Semenov S.* Time for a new approach. Aggregation of information is an effective way to deal with information overload. *Vozdushno-kosmicheskaya oborona*. 2006. No. 3 (28).
15. *Kontorov D.S., Golubev-Novozhilov Yu.S.* Introduction to radar system engineering. Moscow: Sov. radio, 1971. 368 p.
16. Pat. RU No. 2461843, IPC G01S 13/91 (2006.01). Method of processing radar information in the network information structure of an automated control system. *Palguev D.A., Tanygin A.A.* Appl. 29.04.2011; publ. 20.09.2012. Bul. No. 26.
17. Pat. RU 102269, IPC G01S 13/91 (2006.01). Automated system for transmitting radar information. *Palguev D.A., Tanygin A.A.* Appl. 07.09.2010; publ. 20.02.2011. Bul. No. 5.
18. *Wentzel E.S., Ovcharov L.A.* Probability Theory and its engineering applications. Moscow: Nauka, 1988, 480 p.
19. *Tikhonov V.I.* Statistical radio engineering, Moscow: Radio i svyaz', 1982, 624 p.