

## Методы применения доверительного интервала локации объекта в задачах обобщения данных от нескольких источников информации

**С. Ю. Самсон**, к. т. н., *samson.sy@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. В. Новиков**, к. т. н., *novikov.av@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. В. Сорокин**, *sorokin.av@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Обработка координатно-трассовой информации о мобильных объектах от нескольких разнотипных источников на центрах обработки информации требует высокой достоверности формируемых результатов. В статье предлагаются методы расчета доверительного интервала локации объекта, методы расчета экстраполированного доверительного интервала локации объекта, зависящие от маневра объекта, и методы вычислений параметров и коэффициентов алгоритмов обобщения данных от нескольких источников информации. Также предлагаются методы вычисления времени хранения трасс, потерянных источниками сопровождения.

Разработанные методы позволяют гибко использовать данные алгоритмы обобщения, расширяя возможность их применения в условиях разрывного поля видимости источников информации, существенной разноточности измерений и неопределенности гипотез движения объектов.

**Ключевые слова:** алгоритмы получения обобщенных данных, интервальная оценка, построение доверительного интервала

## Methods of Applying the Confidence Interval of the Object Location in the Tasks of Data Integration from Several Information Sources

**S. Yu. Samson**, *Cand. Sci. (Engineering)*, *samson.sy@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**A. V. Novikov**, *Cand. Sci. (Engineering)*, *novikov.av@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**A. V. Sorokin**, *sorokin.av@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**Abstract.** Processing of coordinate-trace information on mobile objects from several different sources at data processing centers requires high reliability of the results formed. The paper offers methods for calculating the confidence interval of an object location, methods for calculating the extrapolated confidence interval of an object location depending on the object maneuver, and methods for calculating the parameters and coefficients of data integration algorithms from several sources of information. The paper proposes as well the methods for calculating the storage time of traces lost by tracking sources.

The developed methods allow flexible usage of these integration algorithms expanding the possibility of their application in the conditions of a discontinuous field of information sources visibility, significant variability of measurements, and uncertainty of hypotheses of object movement.

**Keywords:** algorithms for integrated data obtaining, interval estimation, confidence interval construction

Обработка координатно-трассовой информации, предназначенная для оценки текущего состояния объектовой обстановки и формирования в режиме реального времени описания объектовой обстановки в виде единого потока обобщенных трасс объектов, осуществляемая на основе информации от нескольких источников, является задачей третичной обработки информации. Третичная обработка информации применяется на центрах обработки информации, например на центрах обработки радиолокационной информации, принимающих информацию от замкнутых на них радиолокационных станций. Она реализуется путем объединения потоков трасс объектов, поступающих от множества различных источников информации [1, 2], с исключением дублирования информации разных источников и повышением достоверности сформированного описания объектовой обстановки.

Для решения данной задачи привлекаются разнотипные источники информации, работа которых основана на различных физических принципах. Информация, поступающая от них, различается:

- темпом поступления сообщений;
- способом наблюдения объекта — эхолокация, пеленгация, вторичная локация;
- априорной и текущей точностью;
- длительностью сопровождения объекта.

Третичная обработка решает следующие задачи:

- отождествление обобщенной трассы объекта с информацией, приходящей в сообщениях по тому же объекту от нескольких разнородных рассредоточенных источников информации;
- формирование новой обобщенной трассы;
- обновление координат и вектора скорости (оценки положения трассы объекта в пространстве) обобщенной трассы;
- сброс обобщенной трассы в случае прекращения поступления информации по объекту от источников информации.

Цель данной работы — разработка методов третичной обработки информации с использованием интервальных оценок положения объекта, позволяющих повысить достоверность формируемого описания объектовой обстановки в условиях разрывного поля видимости источников информации, их существенной разноточности, а также при неопределенности гипотез движения объектов.

## Интервальная оценка положения трассы объекта

В задачах оценки параметров при небольшом объеме выборки, к которым относится задача оценки положения объекта в пространстве по данным локационных измерителей, более предпочтительна интервальная оценка [5–7]. В отличие от **точечной** оценки интервальная оценка (доверительный интервал  $\text{trust}_{\text{crd}}$ ) представляется интервалом значений, внутри которого с задаваемой доверительной вероятностью ( $\beta$ ) находится истинное значение ( $x$ ) оцениваемого параметра:

$$P(|x - m_x| < \text{trust}_{\text{crd}}) = \beta,$$

где  $m_x$  — математическое ожидание величины  $x$ .

Из неравенства Чебышева

$$P(|x - m_x| \geq k \times \sigma) \leq \frac{1}{k^2},$$

следует, что доверительный интервал приблизительно пропорционален среднеквадратическому отклонению ( $\sigma$ ).

Например, для нормального закона это точная пропорция:

$$\Phi\left(\frac{\text{trust}_{\text{crd}}}{\sigma \cdot \sqrt{2}}\right) = \beta,$$

где  $\Phi(z)$  — функция Лапласа.

Для  $\beta = 0,9$

$$\text{trust}_{\text{crd}} = 1,7 \cdot \sigma.$$

Неопределенность положения экстраполированной обобщенной трассы можно оценить доверительным интервалом ( $\text{trust}_{\text{E\_crd}}$ ), пересчитанным на время экстраполяции.

## Экстраполяция доверительного интервала

В случае, когда объект движется прямолинейно и равномерно

$$x = x_0 + V \cdot t$$

и гипотеза движения совпадает с движением объекта, экстраполяция производится по формуле

$$x_E = x_i + \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \cdot t_E = x_i \left(1 + \frac{t_E}{\Delta t}\right) - x_{i-1} \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right),$$

где  $x_{i-1}$  и  $x_i$  — измеренные координаты на  $i$ -й и  $(i - 1)$ -й моменты времени;

$\Delta t$  — время, за которое производится подсчет скорости (темп измерения источника);

$t_E$  — время, на которое производится экстраполяция.

Дисперсия экстраполированного значения координаты равна сумме дисперсий независимых измерений:

$$D_E = D_i \cdot \left(1 + \frac{t_E}{\Delta t}\right)^2 + D_{i-1} \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2.$$

Дисперсии  $i$ -го и  $(i - 1)$ -го измерений равны

$$D_i = D_{i-1}.$$

Тогда

$$D_E = D_i \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{t_E}{\Delta t} + 2 \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2\right),$$

$$\sigma_E = \sigma_i \cdot \sqrt{\left(1 + 2 \cdot \frac{t_E}{\Delta t} + 2 \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2\right)}.$$

В случае если  $\text{trust}_{\text{crd}}$  — доверительный интервал обобщенной трассы на момент последнего ее обновления, то экстраполированный доверительный интервал ( $\text{trust}_{E_{\text{crd}}}$ ) подсчитывается по формуле

$$\text{trust}_{E_{\text{crd}}} = \text{trust}_{\text{crd}} \cdot \sqrt{\left(1 + 2 \cdot \frac{t_E}{\Delta t} + 2 \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2\right)}.$$

В случае, когда объект движется прямолинейно и равноускорено:

$$x = x_0 + V \cdot t + U \cdot \frac{t^2}{2},$$

экстраполяция должна производиться по формуле

$$x_E = x_i + \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \cdot t_E + U \cdot \frac{t_E^2}{2} =$$

$$= x_i \left(1 + \frac{t_E}{\Delta t}\right) - x_{i-1} \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right) + U \cdot \frac{t_E^2}{2}.$$

Однако ускорение ( $U$ ) не рассчитывается. Предполагая, что ускорение, с которым может двигаться объект, является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с дисперсией  $D_U$  и нулевым математическим ожиданием, дисперсия экстраполированного значения координаты будет

$$D_E = D_i \cdot \left(1 + \frac{t_E}{\Delta t}\right)^2 + D_{i-1} \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2 + D_U \cdot \left(\frac{t_E^2}{2}\right)^2.$$

Отсюда экстраполированный доверительный интервал ( $\text{trust}_{E_{\text{crd}}}$ ) подсчитывается по формуле:

$$\text{trast}_{E_{\text{crd}}} = \left( \text{trast}_{\text{crd}}^2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{t_E}{\Delta t} + 2 \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2\right) + \text{trast}_U^2 \cdot \left(\frac{t_E^2}{2}\right)^2 \right)^{1/2}. \quad (1)$$

На рис. 1 приведены результаты расчета значения экстраполированного доверительного интервала в метрах (ось ординат) в зависимости от времени (ось абсцисс) в секундах. Графики построены при параметрах, указанных в табл. 1.

Таблица 1. Параметры зависимостей экстраполированного доверительного интервала от времени

Номер графика	$\Delta$ (с)	$\text{trust}_U$ (м/с <sup>2</sup> )	$\text{trust}_{\text{crd}}$ (м)
1	5	0.0	500
2	5	5 · 9,8	500
3	5	3 · 9,8	500
4	5	2 · 9,8	500

Траектория движения объекта состоит из отрезков, когда объект не маневрирует (прямолинейное равномерное движение), и отрезков, когда объект совершает маневр. Пусть  $P_M$  — вероятность того, что объект находится на отрезке траектории маневра. Тогда плотность распределения случайной величины  $U$  будет определяться выражением для смеси вероятностных распределений [3]

$$f(U) = (1 - P_M) \cdot f_0(U) + P_M \cdot f_M(U),$$

где  $f_0(U)$  — плотность распределения случайной величины  $U$  на отрезке траектории без маневра

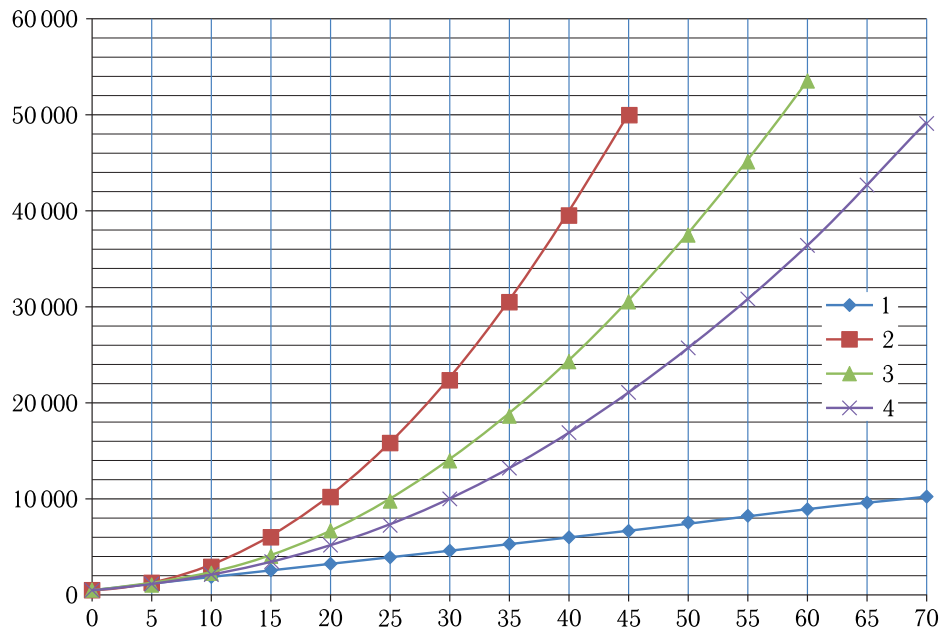


Рис. 1.

с дисперсией  $D_{U0}$ ,  $f_M(U)$  — плотность распределения случайной величины  $U$  на отрезке траектории с маневром  $D_{UM}$ .

Предполагая, что ускорение, с которым может двигаться объект, как при маневре, так и без маневра является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с дисперсией  $D_U$  и нулевым математическим ожиданием, получим

$$D_U = \int U^2 [(1 - P_M) \cdot f_0(U) + P_M \cdot f_M(U)] dU =$$

$$= \int U^2 ((1 - P_M) \cdot f_0(U)) dU + \int U^2 P_M \cdot f_M(U) dU,$$

$$D_U = (1 - P_M) \cdot D_{U0} + P_M \cdot D_{UM}.$$

Подставляя в (2) данные результаты, получим

$$\text{trast}_{E\_crd} = \left( \text{trast}_{crd}^2 \cdot \left( 1 + 2 \cdot \frac{t_E}{\Delta t} + 2 \cdot \left( \frac{t_E}{\Delta t} \right)^2 \right) + \right.$$

$$\left. + ((1 - P_M) \cdot \text{trast}_{U0}^2 + P_M \cdot \text{trast}_{UM}^2) \cdot \left( \frac{t_E^2}{2} \right)^2 \right)^{1/2}.$$

(2)

Или

$$\text{trast}_{E\_crd} = \left( \text{trast}_{crd}^2 \cdot \left( 1 + 2 \cdot \frac{t_E}{\Delta t} + 2 \cdot \left( \frac{t_E}{\Delta t} \right)^2 \right) + \right.$$

$$\left. + \text{trast}_{\tilde{U}}^2 \cdot \left( \frac{t_E^2}{2} \right)^2 \right)^{1/2},$$

где

$$\text{trast}_{\tilde{U}} = \sqrt{(1 - P_M) \cdot \text{trast}_{U0}^2 + P_M \cdot \text{trast}_{UM}^2}.$$

На рис. 2 приведены результаты расчета значения экстраполированного доверительного интервала в метрах (ось ординат) в зависимости от времени (ось абсцисс) в секундах в случае обнаружения маневра ( $\text{manevt} = 1$ ) и в случае, когда маневр не обнаружен ( $\text{manevt} = 0$ ).

Расчеты сделаны при следующих значениях параметров:  $\text{trast}_{crd} = 250$ ,  $\text{trast}_{U0} = 0,2 \cdot g$ ,  $\text{trast}_{UM} = 3 \cdot g$ .

## Использование доверительных интервалов в алгоритме отождествления

Идентификация информации источника с обобщенной информацией решается методами отождествления на основе сравнения информации, пришедшей от источника ( $x_{msg}, y_{msg}$ ), с информацией обобщенной трассы ( $x_{genTrcE}, y_{genTrcE}$ ), экстраполированной на тот же момент времени. В случае, когда гипотеза движения объекта совпадает с реальным его перемещением, отклонение

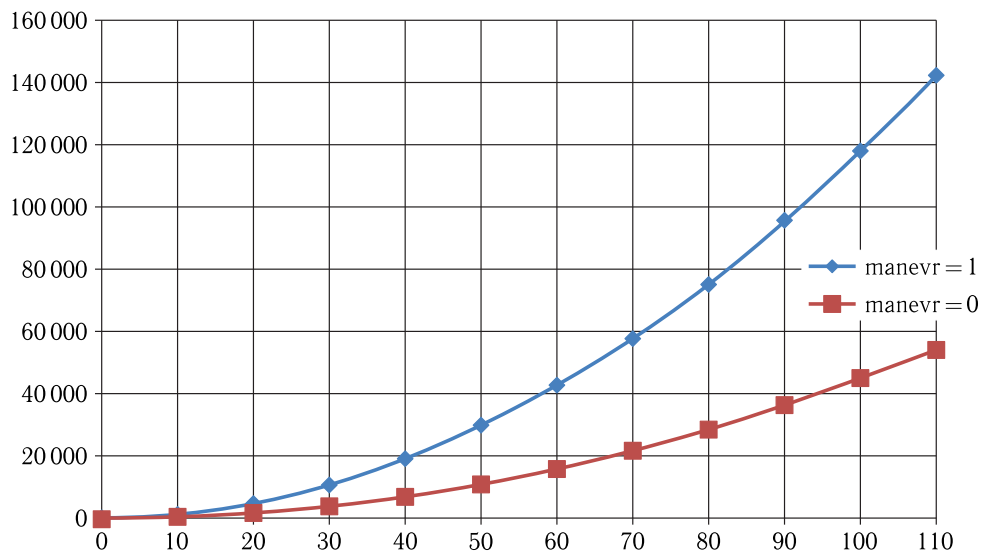


Рис. 2.

информации источника от экстраполированной информации обобщенной трассы зависит только от случайных ошибок измерения источниками информации. В случае, когда гипотеза экстраполяции не соответствует действительному движению объекта, к случайной ошибке измерения прибавляется ошибка экстраполяции, зависящая от динамических характеристик объекта. Это обстоятельство чрезвычайно важно учитывать при отождествлении высокоскоростных, маневренных объектов. Поэтому достоверное решение задачи отождествления возможно лишь в пределах ограниченного времени экстраполяции ( $t_E$ ), рассчитываемого на основе случайной погрешности измерений, определяемого маневра, скорости и типа объекта и др.

При отождествлении трассы источника, сообщение о котором пришло впервые, в качестве кандидатов на отождествление могут быть отобраны те обобщенные трассы, доверительный интервал которых, экстраполированный на время пришедшего сообщения, имеет пересечение с доверительным интервалом отождествляемой трассы источника. Доверительный интервал отождествляемой трассы источника определяется источником в зависимости от применяемых им методов и приходит в сообщении.

Доверительный интервал отбираемых обобщенных трасс, экстраполированный на время пришедшего сообщения, рассчитывается по формуле (2).

## Использование доверительных интервалов в алгоритме обновления координат

### Фильтрация

Пусть  $x_{msg}, y_{msg}$  — координаты объекта, пришедшие в сообщении от источника информации,  $x_{genTrcE}, y_{genTrcE}$  — координаты обобщенной трассы, экстраполированные на время сообщения источника.

Обновление координат обобщенной трассы  $x_{genTrc}, y_{genTrc}$  и параметров движения  $Vx_{genTrc}, Vy_{genTrc}$  производится методами фильтрации по формулам:

$$\begin{aligned} x_{genTrc} &= x_{genTrcE} + \alpha \times (x_{msg} - x_{genTrcE}); \\ y_{genTrc} &= y_{genTrcE} + \alpha \times (y_{msg} - y_{genTrcE}); \\ Vx_{genTrc} &= Vx_{genTrcS} + \frac{x_{msg} - x_{genTrcE}}{\Delta t + T_V}; \\ Vy_{genTrc} &= Vy_{genTrcS} + \frac{y_{msg} - y_{genTrcE}}{\Delta t + T_V}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Delta t$  — разница между временем последнего обновления координат обобщенной трассы и временем сообщения источника;

$\alpha$  — коэффициент фильтрации координат (значение зависит от признака наличия маневра объекта);

$T_V$  — коэффициент фильтрации скорости (значение зависит от признака наличия маневра объекта);

$Vx_{\text{genTrcS}}, Vy_{\text{genTrcS}}$  — параметры движения обобщенной трассы при предыдущем обновлении.

### Расчет доверительного интервала при фильтрации обобщенной трассы

Координаты обобщенной трассы (например,  $x_{\text{genTrc}}$ ) можно представить (см. формулы (3)) в виде суммы двух случайных величин  $x_{\text{genTrcE}}$  и  $x_{\text{msg}}$ :

$$x_{\text{genTrc}} = x_{\text{genTrcE}} \times (1 - \alpha) + x_{\text{msg}} \times \alpha.$$

Тогда дисперсия случайных величин будет вычисляться по формуле

$$D_{\text{genTrc}} = D_{\text{genTrcE}} \times (1 - \alpha)^2 + D_{\text{msg}} \times \alpha^2.$$

А доверительный интервал —

$$\text{trast}_{\text{genTrc}} = \sqrt{\text{trast}_{\text{genTrcE}}^2 \times (1 - \alpha)^2 + \text{trast}_{\text{msg}}^2 \times \alpha^2}. \quad (4)$$

### Расчет оптимального значения коэффициента фильтрации

Определим значение коэффициента фильтрации координат ( $\alpha$ ), обеспечивающего наименьшее значение  $\text{trast}_{\text{genTrc}}$ , рассчитанное по формуле (4).

Для этого найдем производную  $d(\text{trast}_{\text{genTrc}})/d\alpha$ .

$$\begin{aligned} d(\text{trast}_{\text{genTrc}})/d\alpha &= \\ &= d\left(\sqrt{\text{trast}_{\text{genTrcE}}^2 \times (1 - \alpha)^2 + \text{trast}_{\text{msg}}^2 \times \alpha^2}\right)/d\alpha = \\ &= \frac{\text{trast}_{\text{msg}}^2 \times \alpha - \text{trast}_{\text{genTrcE}}^2 \times (1 - \alpha)}{\sqrt{\text{trast}_{\text{msg}}^2 \times \alpha^2 + \text{trast}_{\text{genTrcE}}^2 (1 - \alpha)^2}}. \end{aligned}$$

Приравняем нулю полученное выражение для производной и найдем значение  $\alpha$ , обеспечивающее данное равенство:

$$\frac{\text{trast}_{\text{msg}}^2 \times \alpha - \text{trast}_{\text{genTrcE}}^2 \times (1 - \alpha)}{\sqrt{\text{trast}_{\text{msg}}^2 \times \alpha^2 + \text{trast}_{\text{genTrcE}}^2 (1 - \alpha)^2}} = 0.$$

Таким образом, наименьшее значение  $\text{trast}_{\text{genTrc}}$  обеспечивается при значении  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\text{trast}_{\text{genTrcE}}^2}{\text{trast}_{\text{genTrcE}}^2 + \text{trast}_{\text{msg}}^2}.$$

На рис. 3 приведены результаты расчета значения коэффициента фильтрации координат (ось ординат) в зависимости от времени (ось абсцисс) в секундах в случае обнаружения маневра ( $\text{manevr} = 1$ ) и в случае, когда маневр не обнаружен ( $\text{manevr} = 0$ ). Расчеты сделаны при следующих значениях параметров:  $\text{trast}_{\text{crd}} = 250$ ,  $\text{trast}_{U0} = 0,2 \cdot g$ ,  $\text{trast}_{UM} = 3 \cdot g$ .

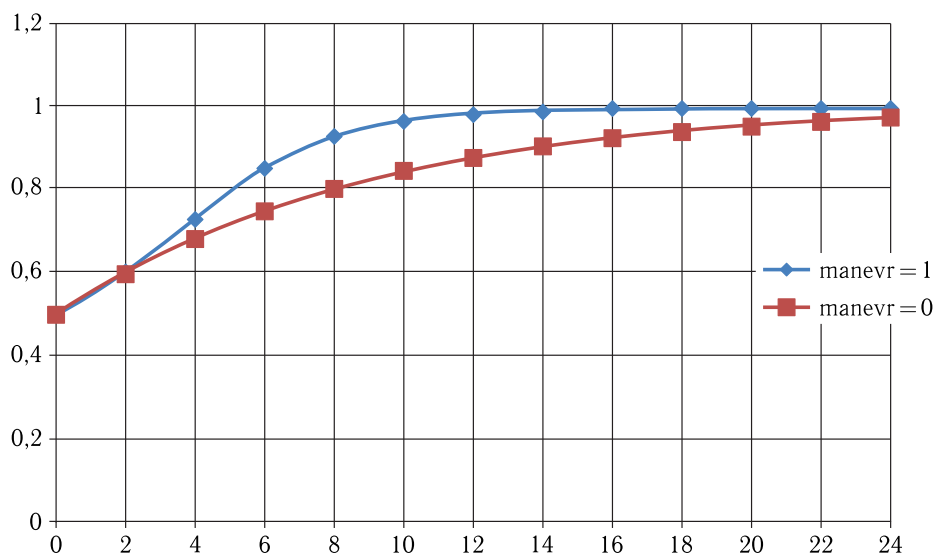


Рис. 3. Результаты расчета значения коэффициента фильтрации координат



### Расчет времени хранения трасс, потерянных источниками сопровождения, на основе доверительного интервала

Обобщенная трасса, потерянная источниками сопровождения, должна храниться в системе обработки информации до тех пор, пока значение экстраполированного доверительного интервала по координатам обобщенной трассы не превысит порог, при котором отождествление с вновь поступившей трассой источника станет недоверительным.

В качестве меры неопределенности информации используется понятие информационной энтропии. Тогда, допуская, что оцениваемые величины имеют непрерывные значения и распределены по нормальному закону (характеризующемуся наибольшей энтропией), получаем из [4] следующие выражения: для энтропии экстраполированной обобщенной трассы

$$H_{\text{genTrcE}} = \frac{1}{2} \frac{\ln(2\pi\sigma_{\text{genTrcE}}^2 e)}{\ln(2)}$$

и энтропии входного сообщения о трассе источника

$$H_{\text{msg}} = \frac{1}{2} \frac{\ln(2\pi\sigma_{\text{msg}}^2 e)}{\ln(2)}.$$

Количественная мера, которую может внести информация обобщенной трассы в процесс отожд-

ествления с вновь поступившим входным сообщением о трассе, будет определяться по формуле

$$\begin{aligned} I &= H_{\text{msg}} - H_{\text{genTrcE}} = \\ &= \frac{1}{2} \frac{\ln(2\pi\sigma_{\text{msg}}^2 e)}{\ln(2)} - \frac{1}{2} \frac{\ln(2\pi\sigma_{\text{genTrcE}}^2 e)}{\ln(2)} = \\ &= \frac{1}{\ln(2)} \ln\left(\frac{\sigma_{\text{msg}}}{\sigma_{\text{genTrcE}}}\right). \end{aligned}$$

Отношение дисперсий можно заменить отношением доверительных интервалов. Тогда

$$I = \frac{1}{\ln(2)} \ln\left(\frac{\text{trast}_{\text{msg}}}{\text{trast}_{\text{genTrcE}}}\right).$$

Учитывая значение экстраполированного доверительного интервала (1), получим:

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{\ln(2)} \ln\left(\text{trast}_{\text{msg}} / \left(\text{trast}_{\text{crd}}^2 \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. \left(1 + 2 \cdot \frac{t_E}{\Delta t} + 2 \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2\right) + \text{trast}_{\tilde{U}}^2 \cdot \left(\frac{t_E}{2}\right)^2\right)^{1/2}\right). \end{aligned} \quad (5)$$

На рис. 4 приведена зависимость количественной меры информации ( $-I$ ), которую может внести информация обобщенной трассы в процесс отождествления с вновь поступившим входным сообщением о трассе, от времени ее необновления (экстраполяции), при значениях  $\text{trast}_{\text{crd}} = 500$ ,  $\Delta t = 10$  с и  $\text{trast}_{\tilde{U}} = g$ .

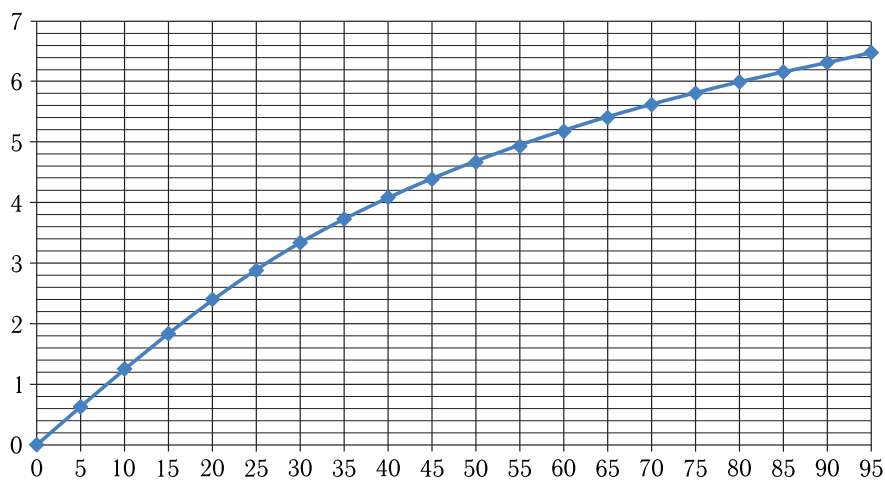


Рис. 4. Зависимость количественной меры информации от времени ее необновления

Задавая критическое значение количественной меры  $I = I_C$ , можно получить значение порога по доверительному интервалу  $\text{trust}_C$ , при достижении которого обобщенная трасса не вносит более достоверной информации и сбрасывается с сопровождения.

$$I_C = \frac{1}{\ln(2)} \ln \left( \frac{\text{trust}_{\text{msg}}}{\text{trust}_C} \right). \quad (6)$$

Таким образом, для каждой обобщенной трассы, потерянной источниками сопровождения, можно рассчитать время ее хранения  $t_{\text{Hold}}$ , после истечения которого данная трасса сбрасывается.

На рис. 5 приведены результаты табличного расчета значения времени хранения (ось ординат), соответствующего достижению доверительного интервала  $\text{trust}_C = 20$  км, в зависимости от доверительного интервала по ускорению (ось абсцисс) и доверительного интервала по координатам обобщенной трассы на момент последнего ее обновления (параметр графиков).

На рис. 6 приведены результаты табличного расчета значения времени хранения, соответствующего достижению доверительного интервала  $\text{trust}_C = 40$  км, в зависимости от доверительного интервала по ускорению и доверительного интервала по координатам обобщенной трассы на момент последнего ее обновления.

На рис. 5 и рис. 6 графики построены при значениях параметров доверительного интервала, указанных в табл. 2.

Таблица 2. Доверительный интервал по координатам обобщенной трассы как параметр зависимостей времени хранения от доверительного интервала по ускорению

Номер графика	$\text{trust}_{\text{crd}}$ (м)
1	250
2	500
3	750
4	1000
5	1250
6	1500

Значение времени хранения вычисляется из уравнения

$$I_C = I.$$

Учитывая выражения (5) и (6), получаем

$$\begin{aligned} \frac{1}{\ln(2)} \ln \left( \frac{\text{trust}_{\text{msg}}}{\text{trust}_C} \right) = \\ = \frac{1}{\ln(2)} \ln \left( \text{trust}_{\text{msg}} / \left( \text{trust}_{\text{crd}}^2 \cdot \left( 1 + 2 \cdot \frac{t_{\text{Hold}}}{\Delta t} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + 2 \cdot \left( \frac{t_{\text{Hold}}}{\Delta t} \right)^2 \right) + \text{trust}_{\text{U}}^2 \cdot \left( \frac{t_{\text{Hold}}^2}{2} \right)^2 \right)^{1/2} \right). \end{aligned}$$

Или

$$\begin{aligned} \text{trust}_C = \left( \text{trust}_{\text{crd}}^2 \cdot \left( 1 + 2 \cdot \frac{t_{\text{Hold}}}{\Delta t} + 2 \cdot \left( \frac{t_{\text{Hold}}}{\Delta t} \right)^2 \right) + \right. \\ \left. + \text{trust}_{\text{U}}^2 \cdot \left( \frac{t_{\text{Hold}}^2}{2} \right)^2 \right)^{1/2}. \end{aligned}$$

Учитывая, что  $t_{\text{Hold}} > 1$  и  $t_{\text{Hold}} > \Delta t$ , упрощаем уравнение

$$\begin{aligned} \text{trust}_C = \sqrt{\text{trust}_{\text{crd}}^2 \cdot 2 \cdot \left( \frac{t_{\text{Hold}}}{\Delta t} \right)^2 + \text{trust}_{\text{U}}^2 \cdot \left( \frac{t_{\text{Hold}}^2}{2} \right)^2}, \\ \frac{\text{trust}_{\text{U}}^2}{4} \cdot \left( t_{\text{Hold}}^2 \right)^2 + \frac{\text{trust}_{\text{crd}}^2 \cdot 2}{\Delta t^2} \cdot t_{\text{Hold}}^2 - \text{trust}_C^2 = 0. \end{aligned}$$

Решая данное биквадратное уравнение, получаем

$$t_{\text{Hold}} = \sqrt{2 \cdot \frac{\left( -\frac{\text{trust}_{\text{crd}}^2 \cdot 2}{\Delta t^2} + \sqrt{D} \right)}{\text{trust}_{\text{U}}^2}}, \quad (7)$$

где

$$D = \left( \frac{\text{trust}_{\text{crd}}^2 \cdot 2}{\Delta t^2} \right) + \text{trust}_{\text{U}}^2 \cdot \text{trust}_C^2.$$

На рис. 7 приведены результаты расчета по формуле (7) значения времени хранения (ось ординат), соответствующие достижению доверительным интервалам  $\text{trust}_C = 20$  км и  $\text{trust}_C = 40$  км, в зависимости от доверительного интервала по ускорению (ось абсцисс). Доверительный интервал по координатам обобщенной трассы на момент последнего ее обновления принят равным 250 м.



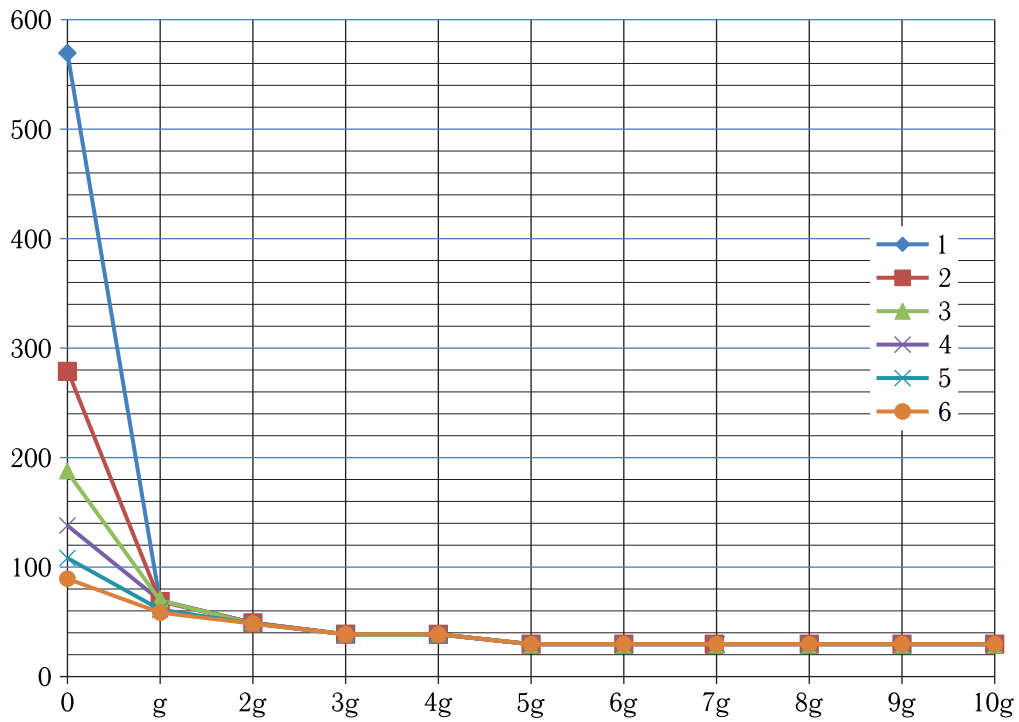


Рис. 5. Результаты табличного расчета значения времени хранения, соответствующего достижению доверительного интервала  $trast_C = 20$  км

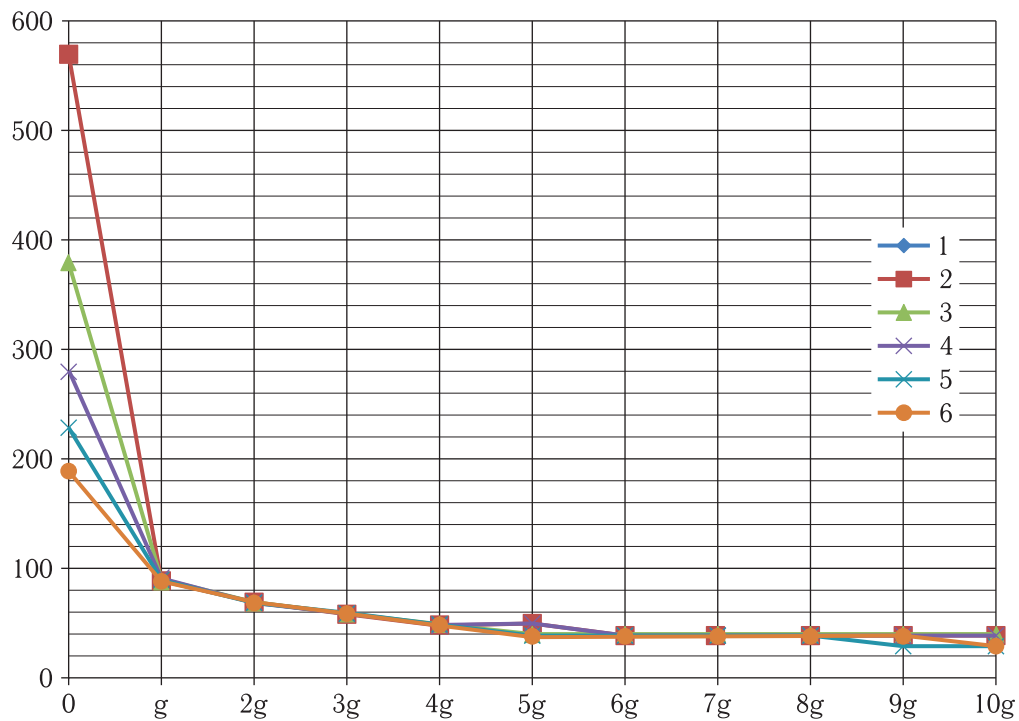


Рис. 6. Результаты табличного расчета значения времени хранения, соответствующего достижению доверительного интервала  $trast_C = 40$  км

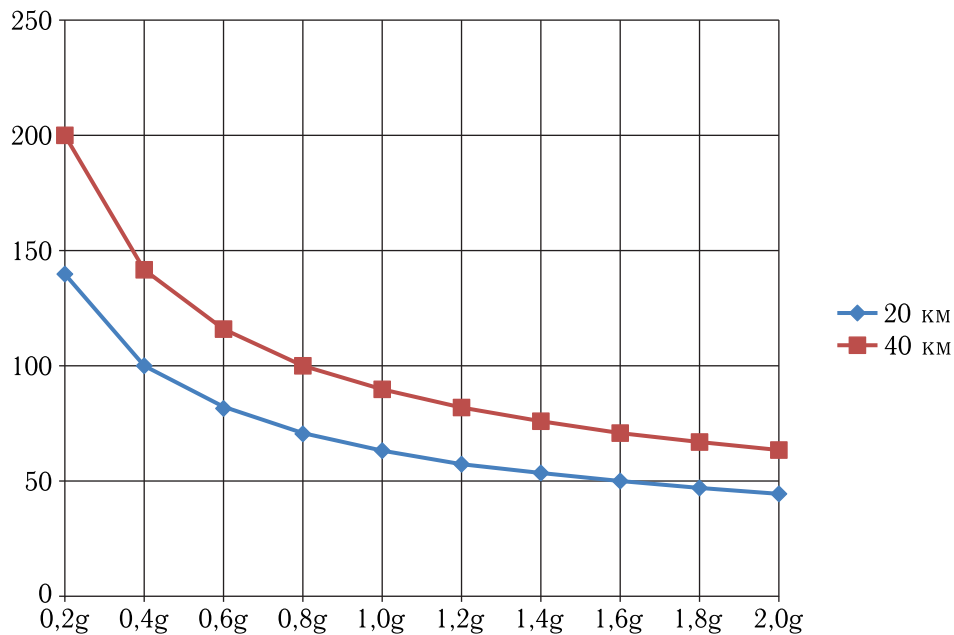


Рис. 7. Результаты расчета по формуле (7) значения времени хранения по достижению доверительного интервала  $\text{trast}_C = 20$  км и  $\text{trast}_C = 40$  км в зависимости от доверительного интервала по ускорению

Сравнение данных, приведенных на рис. 7 с данными, приведенными на рис. 6 и 5, показывает практическое совпадение результатов, полученных табличным методом и методом приближенных расчетов по формуле (7).

## Заключение

Результаты расчетов параметров и коэффициентов программ третичной обработки информации, приведенные в работе, близки к эмпирическим значениям данных параметров и коэффициентов, принятым в реализованных системах обработки информации для частных ограниченных условий применения.

Полученные методы позволяют гибко использовать программы третичной обработки информации, расширяя возможность их применения в условиях разрывного поля видимости источников информации, их существенной разноточности и неопределенности гипотез движения объектов. Использование данных методов в специальном программном обеспечении перспективных центров обработки информации повысит достоверность формируемого описания текущей объектовой обстановки.

## Список литературы

1. Самсон С.Ю. Принципы разработки алгоритмов, формирующих описание воздушной обстановки на командных пунктах различного уровня иерархии // Вопросы радиоэлектроники. Сер. СОИУ, 2000, вып. 1.
2. Справочник офицера воздушно-космической обороны // Под общей ред. С.К. Бурмистрова. Тверь: ВА ВКО, 2006. 564 с.
3. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
4. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Гос. издательство физико-математической литературы, 1960. 883 с.
5. Fisher R.A. Statistical Methods and Scientific Inference. N.Y.-L., 1973.
6. Kendall M.G. and Stuart A. The Advanced of a Theory of Statistics, vol. 2: Inference and Relationship (3rd Edition). Griffin, London, 1973.
7. Meeker W.Q., Hahn G.J. and Escobar L.A. Statistical Intervals: A Guide for Practitioners and Researchers (2nd Edition). John Wiley & Sons, 2017.