

УДК 007.52

ББК 32.817

МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ОЦЕНОК КООРДИНАТ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ГРУППОЙ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Белов Р. В.¹

(ОАО АНПП «Темп-Авиа», Арзамас)

Казанин Д. К.², Огородников К. О.³

(ОАО АНПП «Темп-Авиа»,

*Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ),
Арзамас)*

Описывается модель группы подвижных объектов (мультиагентная система). Каждый объект (агент) является материальной точкой на плоскости. Реализуется управление этой системой. Рассматриваются методы коррекции оценок координат.

Ключевые слова: мультиагентная система, коррекция координат, централизованный наблюдатель, распределённый наблюдатель, управление, опорный объект.

1. Введение

Рассматривается модель группы подвижных объектов как мультиагентная система на плоскости. Отдельные объекты (агенты) рассматриваются как материальные точки. Ставится задача оценить возможность формирования строя, рассматри-

¹ Роман Валерьевич Белов, инженер-математик.

² Дмитрий Константинович Казанин, инженер-математик, аспирант (mysterio7@rambler.ru).

³ Кирилл Олегович Огородников, техник, студент.

ваемого как упорядоченное состояние мультиагентной системы, по различной первичной информации.

Строем считать такое состояние системы, при котором минимизируются невязки координат каждого объекта с заданными для каждого момента времени координатами (опорный объект), а дальности между любыми парами объектов не превышают заданного значения.

Предполагается, что агенты обмениваются между собой информацией о дальностях до других агентов и о собственных координатах и скоростях. Для оценки координат вектора состояния по дальностям и скоростям рассматриваются градиентный метод с фиксированным шагом, а также централизованный и распределённый наблюдатели, использующие фильтр Калмана. Управление каждым объектом мультиагентной системы реализуется относительно некоторого опорного (виртуального) объекта с соблюдением ограничения минимальной дальности между агентами.

2. Модель объекта в централизованной системе

Модель объекта характеризуется уравнением состояния в виде:

$$(1) \quad \bar{x}_i(n+1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta T & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta T & 1 \end{bmatrix} \bar{x}_i(n) + \begin{bmatrix} \Delta T & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \Delta T \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \bar{u}_i(n),$$

где вектор состояния $\bar{x}_i$ включает в себя проекции координат и скорости объекта;

$$\bar{x}_i(n+1) = \begin{bmatrix} v_i^{(x)}(n+1) \\ x_i(n+1) \\ v_i^{(y)}(n+1) \\ y_i(n+1) \end{bmatrix} - \text{вектор состояния } i\text{-го объекта на } n+1\text{-ой}$$

итерации;

$$\bar{x}_i(n) = \begin{bmatrix} v_i^{(x)}(n) \\ x_i(n) \\ v_i^{(y)}(n) \\ y_i(n) \end{bmatrix} - \text{вектор состояния } i\text{-го объекта на } n\text{-ой ите-}$$

рации;

$$\bar{u}_i(n) = \begin{bmatrix} u_i^{(x)}(n) \\ u_i^{(y)}(n) \end{bmatrix} - \text{управляющее воздействие, представляющее}$$

собой ускорение объекта;

ΔT – период дискретизации.

Вектор измерения $\bar{z}_i$ включает в себя измерения радиальной дальности между объектами и проекции скорости:

$$(2) \quad \bar{z}_i(n) = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_i(n) - x_j(n))^2 + (y_i(n) - y_j(n))^2} \\ \sqrt{(x_i(n) - x_{j+1}(n))^2 + (y_i(n) - y_{j+1}(n))^2} \\ \vdots \\ \sqrt{(x_i(n) - x_m(n))^2 + (y_i(n) - y_m(n))^2} \\ v_i^{(x)}(n) \\ v_i^{(y)}(n) \end{bmatrix} + \bar{\eta}_i,$$

где $\bar{z}_i(n)$ – выход модели, за счет которого проводится коррекция объекта на n -ой итерации;

$\bar{\eta}_i$ – шум измерения – нормально распределенная величина с параметрами $N(0, \sigma)$, где $\sigma = 100$ м для дальностей и $\sigma = 3$ м/с для скоростей i -го объекта. Нижним индексом обозначен номер объекта.

3. Модель распределенной системы

Взаимодействие объектов в группе предполагает возможность отправки каждым объектом сообщения, содержащего любую известную ему информацию. Остальные объекты могут принять отправленное сообщение с заданной вероятностью и временной задержкой. Принимающий объект получает вместе с ним оценку дальности до отправившего сообщение объекта.

Структура сети связи задается полносвязным графом, то есть каждый объект может принять сообщение, отправленное любым другим объектом.

Модель объекта остается такой же, как и в централизованном случае, за исключением количества измеряемых дальностей и временной задержки.

4. Управление объектами и формирование строя

На рис. 1 и рис. 2, приведенных ниже, показаны траектории и мгновенные позиции объектов, полученные с помощью алгоритма формирования строя. Алгоритм минимизирует невязку координат каждого объекта с опорным объектом с помощью линейного ПД-регулятора. При этом сближение объектов ограничено и управляется отдельным для каждой пары объектов ПД-регулятором. Минимальное расстояние, на которое объекты могут сблизиться, задается постоянным.

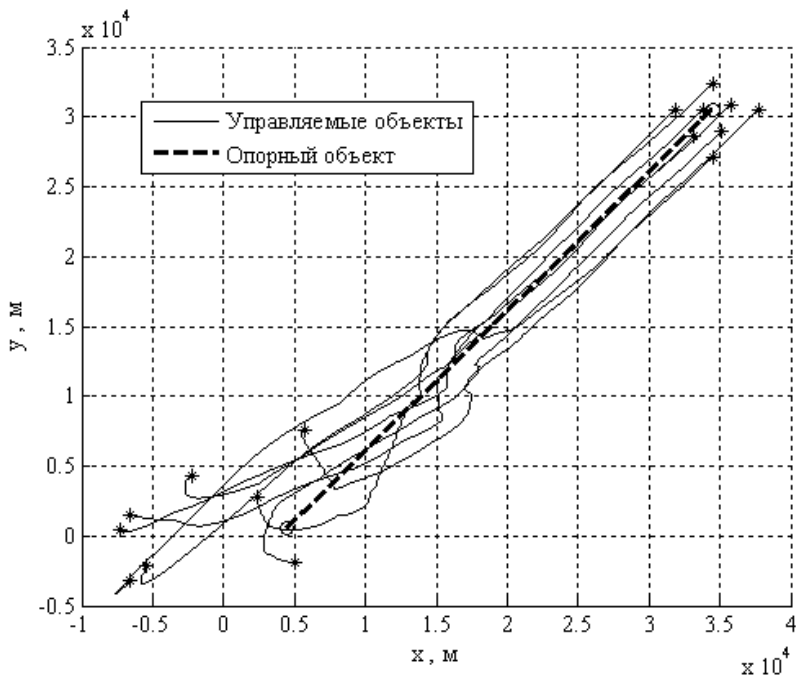


Рис. 1. Траектории управляемых объектов и опорного объекта

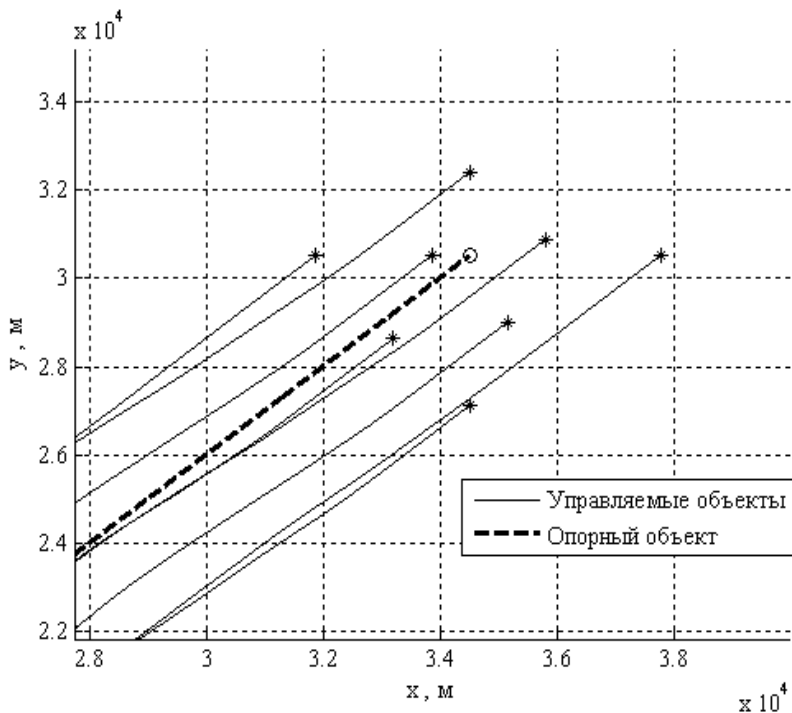


Рис. 2. Траектории управляемых объектов и опорного объекта

На рис. 3 показано минимальное расстояние между объектами в каждый момент моделирования. Время моделирования – 300 с. Шаг моделирования – 0,01 с.

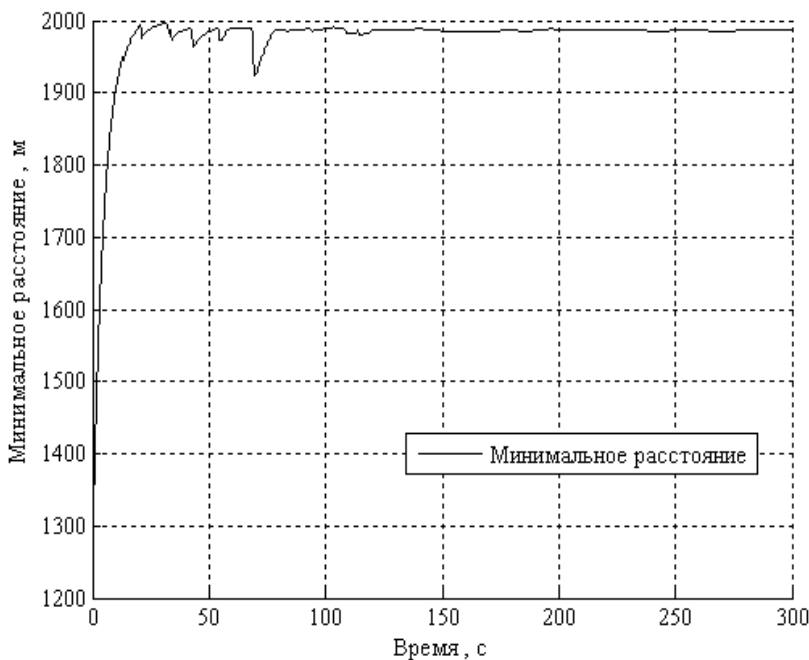


Рис. 3. Минимальное расстояние между объектами

5. Коррекция инерциальных оценок координат по дальностям между объектами в группе

Было произведено численное моделирование работы нескольких алгоритмов коррекции.

Инерциальные оценки формировались по уравнениям объекта, используя известные управляющие воздействия. Начальное состояние каждого объекта формировалось с неопределенностями.

5.1. ГРАДИЕНТНЫЙ МЕТОД С ФИКСИРОВАННЫМ ШАГОМ

Метод осуществляет итеративную минимизацию невязки по дальностям. Каждый объект минимизирует невязки только по дальностям до себя и корректирует только свои координаты (см. рис. 4). Получение дальностей происходит путем постоянной рассылки сообщений от соседних объектов.

В процессе работы распределенной версии у каждого объекта накапливается своя очередь сообщений, которую он, по мере возможности, должен обработать.

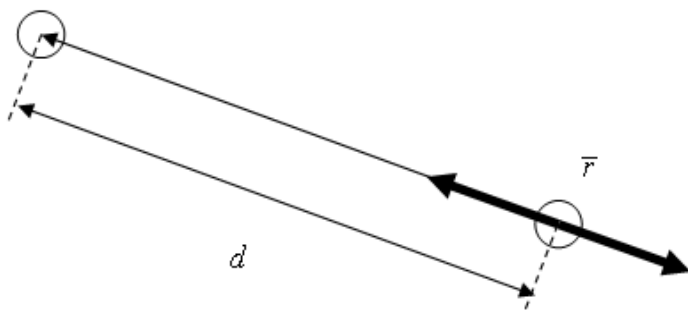


Рис. 4. Корректировка координат объекта

$$(3) \quad \begin{aligned} \bar{x} &= \bar{x} + \bar{r} e c_1, \\ \bar{v} &= \bar{v} + \bar{r} e c_2, \end{aligned}$$

где d – норма исходного объекта;

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \text{ – вектор координат исходного объекта;}$$

$$\bar{v} = \begin{bmatrix} v^{(x)} \\ v^{(y)} \end{bmatrix} \text{ – вектор скоростей исходного объекта;}$$

$\bar{r}$ – вектор направления единичной длины от исходного до соседнего объекта;

e – невязка по дальностям;

$c_1 = -0,1$; $c_2 = -0,01$ – весовые коэффициенты.

На рис. 5 показано функционирование только для пары объектов. Корректировка остальных пар объектов происходит аналогично.

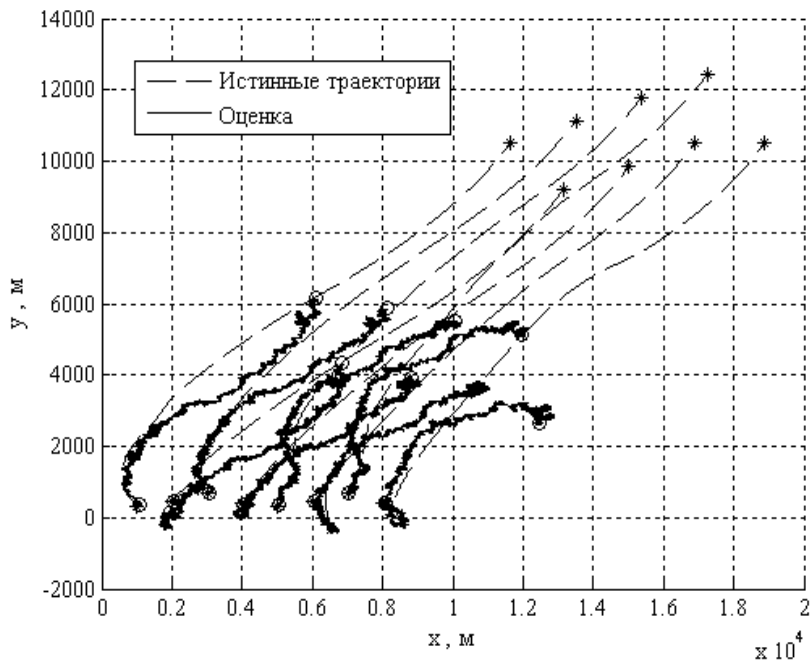


Рис. 5. Градиентный метод с фиксированным шагом

Предлагаемый градиентный метод определяет координаты с точностью до преобразований поворота и переноса. Истинные траектории заданы с помощью алгоритма управления строем.

Минимальное расстояние, на которое могут приблизиться объекты, было задано равным 2000 м. Время моделирования – 100 с. Шаг моделирования – 0,001 с.

5.2. ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ ФИЛЬТР КАЛМАНА

В данном варианте, используя модели каждого из объектов, записывается модель всей системы, а по ней строится наблюдатель, основанный на фильтре Калмана.

Предлагаемый метод находит координаты с точностью до преобразований, сохраняющих расстояния. Если траектории объектов таковы, что относительные координаты (и дальности) значительно изменяются в процессе наблюдения, то неопределенность по повороту может быть устранена.

Управление формируется следующим образом:

$$(4) \quad \bar{u}_i^{(n)} = \begin{bmatrix} \frac{(-1e+5) \cdot x_i^{(n)}}{x_i^{(n)} \cdot x_i^{(n)} + y_i^{(n)} \cdot y_i^{(n)}} \\ \frac{(-1e+5) \cdot y_i^{(n)}}{x_i^{(n)} \cdot x_i^{(n)} + y_i^{(n)} \cdot y_i^{(n)}} \end{bmatrix}.$$

Фильтр Калмана использует следующие матрицы преобразования:

$$(5) \quad A = \begin{bmatrix} \hat{A} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \hat{A} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \hat{A} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \hat{A} \end{bmatrix},$$

$$\text{где } \hat{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta T & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta T & 1 \end{bmatrix},$$

A – матрица перехода между состояниями (динамическая модель системы);

ΔT – период дискретизации.

$$(6) \quad P = \begin{bmatrix} \hat{P} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \hat{P} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \hat{P} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \hat{P} \end{bmatrix},$$

$$\text{где } \hat{P} = \begin{bmatrix} a^{(vx)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a^{(x)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^{(vy)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a^{(y)} \end{bmatrix},$$

P – матрица ковариации вектора состояния;

$a^{(vx)} = a^{(vy)} = 30^2$, $a^{(x)} = a^{(y)} = (3e + 3)^2$ – начальные неопределенности по скоростям и координатам соответственно.

$$(7) \quad Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

где Q – ковариация шума процесса.

$$(8) \quad C = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\delta(z_i - z_{i+1})}{\delta x} & 0 & \frac{\delta(z_i - z_{i+1})}{\delta y} & 0 & \frac{\delta(z_{i+1} - z_i)}{\delta x} & 0 & \frac{\delta(z_{i+1} - z_i)}{\delta y} & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\delta(z_i - z_{i+2})}{\delta x} & 0 & \frac{\delta(z_i - z_{i+2})}{\delta y} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\delta(z_i - z_{i+3})}{\delta x} & 0 & \frac{\delta(z_i - z_{i+3})}{\delta y} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ & & & & \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\delta(z_n - z_{n-1})}{\delta y} \end{bmatrix},$$

где C – матрица измерений, отображающая отношение измерений и состояний.

Матрица C строится следующим образом:

- каждый объект имеет ровно 4 ячейки в каждой строке;
- каждая строка матрицы – два отдельно рассмотренных объекта;
- в последующих строках не могут рассматриваться те пары объектов, которые рассмотрены ранее.

$$(9) \quad R = \begin{bmatrix} D_1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & D_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & D_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & D_2 \end{bmatrix},$$

где R – ковариация шума измерения;

D_1 и D_2 – параметры, определяющие погрешности измерений. В данной версии погрешности имеют нормальные распределения с нулевыми математическими ожиданиями и среднеквадратическими отклонениями $\sqrt{D_1}$ и $\sqrt{D_2}$. Количество D_1 и D_2 в матрице определяется количеством ребер неориентированного графа моделируемой системы.

Величина R как ошибка измерения может быть определена испытанием измерительных приборов и определением погрешности их измерения.

Для реализации фильтра Калмана были использованы следующие уравнения:

(10) $P = APA^T + Q$ – предсказание ошибки ковариации;

(11) $K = PC^T(CPC^T + R)^{-1}$ – вычисление усиления Калмана;

(12) $P = P - KCP$ – обновление ошибки ковариации.

На рис. 6 видно, что неопределенность по повороту отсутствует. Время моделирования – 250 с. Шаг моделирования – 1 с.

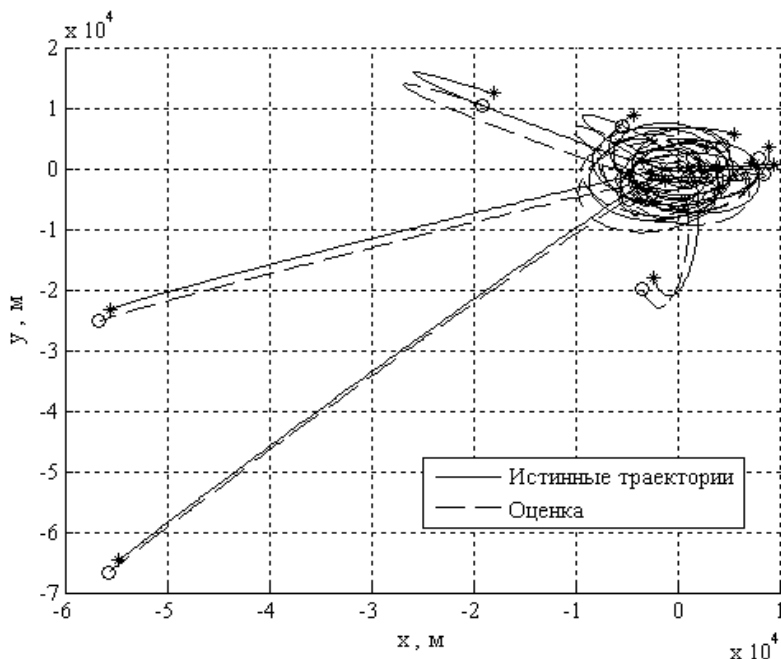


Рис. 6. Централизованный наблюдатель, использующий фильтр Калмана

5.3. РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ ФИЛЬТР КАЛМАНА

В вектор состояния записываются только координаты одного объекта. Имеются отдельные наблюдатели для каждого из объектов. Данный метод должен обеспечивать большую скорость сходимости, чем градиентный метод. Неопределенность по повороту устраняется введением искусственных колебаний, при этом изменяется минимальная дальность между объектами.

Для построения фильтра Калмана используются следующие матрицы линеаризованной модели объекта.

$$(13) \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta T & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta T & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \Delta T & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \Delta T \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\delta(z_2 - z_1)}{\delta x} & 0 & \frac{\delta(z_2 - z_1)}{\delta y} \\ 0 & \frac{\delta(z_3 - z_1)}{\delta x} & 0 & \frac{\delta(z_3 - z_1)}{\delta y} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \frac{\delta(z_n - z_1)}{\delta x} & 0 & \frac{\delta(z_n - z_1)}{\delta y} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Отправка сообщений объектам проводится случайным образом, интервал времени между 2-мя рассылками составляет 5-25 итераций (в зависимости от сформированной случайной величины).

На рис. 7 и рис. 8 показаны истинные траектории и их оценки. При $t = 250$ с происходит смена направления движения опорного объекта (скорости по осям x и y меняются с 200 м/с и 100 м/с на -300 м/с и 20 м/с соответственно). При $t = 100$ с

управление начинает замыкаться по координатам оценок объектов (при $t < 100$ с ускорение задавалось с помощью истинных координат).

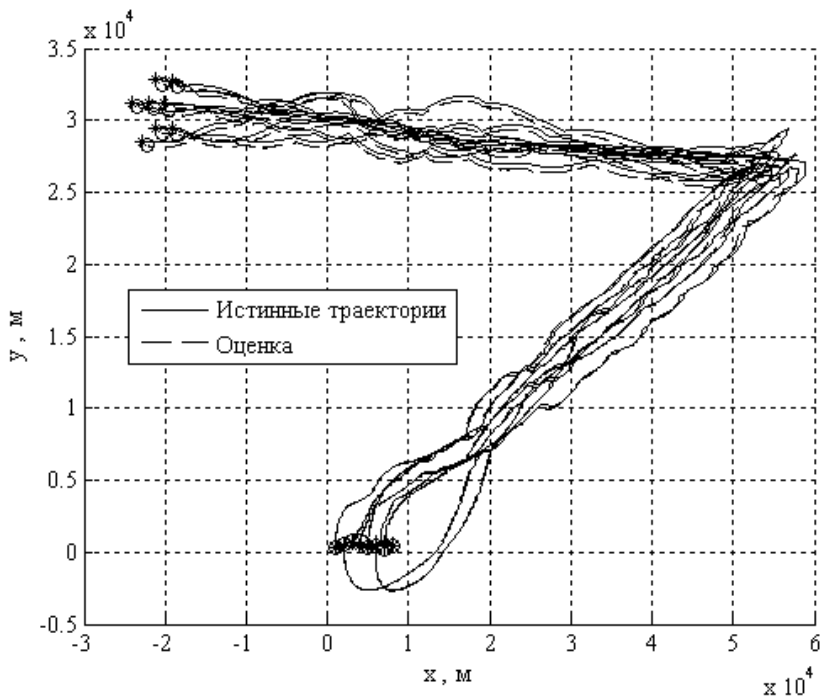


Рис. 7. Распределенный наблюдатель, использующий фильтр Калмана

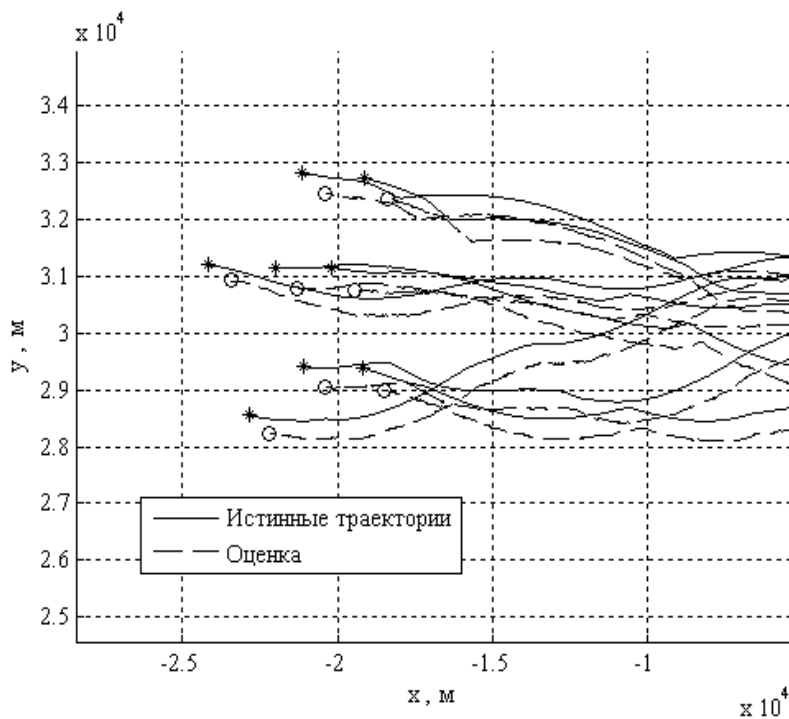


Рис.8. Распределенный наблюдатель, использующий фильтр Калмана

На рис. 9 показано минимальное расстояние между объектами в каждый момент моделирования. Время моделирования – 500 с. Шаг моделирования – 0,01 с.

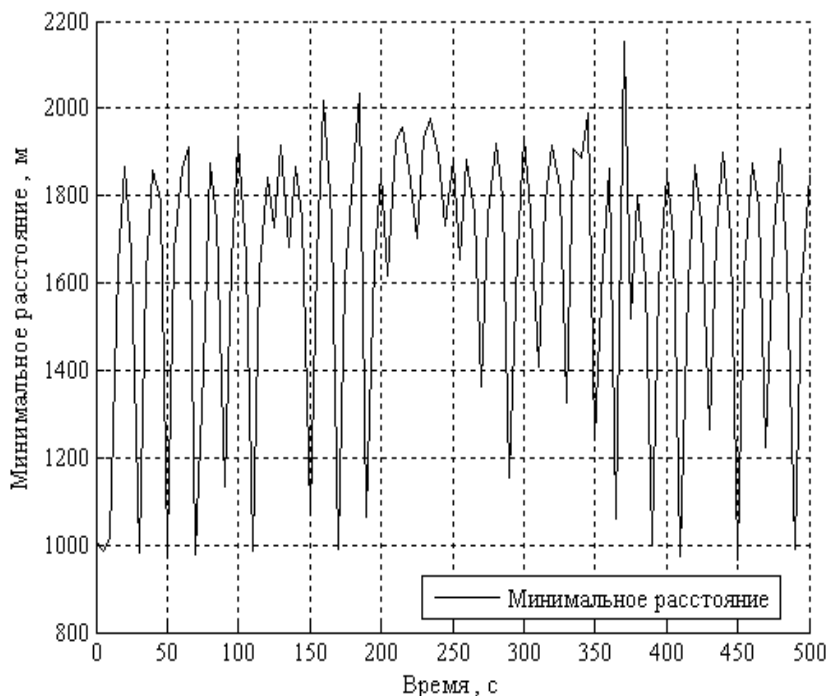


Рис. 9. Минимальное расстояние между объектами

6. Выводы

1. Показана принципиальная возможность формирования группы объектов по измерениям дальностей между объектами и скорости их движения. При этом показана возможность компенсации ошибок задания местоположения и скорости.

2. Наблюдаемость по повороту при коррекции по дальностям достигается только при относительном движении объектов группы. Это может потребовать постоянного преобразования строя и означать невозможность удержания неизменной формации длительное время.

3. Все рассмотренные методы используют одну идею линейного рекуррентного наблюдателя, а отличаются лишь опти-

мальностью коэффициентов обратной связи и возможностью децентрализованной работы.

4. Задача управления и формирования строя в такой упрощенной постановке может быть решена.

INERTIAL COORDINATE ESTIMATE CORRECTION METHODS WITH CONTROL OF THE MOVING OBJECT GROUP

Roman Belov, «Temp-Avia», Arzamas, engineer-mathematician.

Dmitriy Kazanin, «Temp-Avia», Arzamas Polytechnical institute, Arzamas, engineer-mathematician, post-graduate student (mysterio7@rambler.ru).

Kirill Ogorodnikov, «Temp-Avia», Arzamas Polytechnical institute, Arzamas, technik, student.

Abstract: A model of the moving object group (multi-agent system) is described. Each object (agent) is a material point on the plane. Control of the system is implemented. Coordinate estimate correction methods are discussed.

Keywords: multi-agent system, coordinate correction, centralized observer, distributed observer, control, virtual object.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии ...*

*Поступила в редакцию ...
Опубликована ...*