

УДК 681.518.3

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ В БОРТОВЫХ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

**Б. А. Алпатов,**

доктор техн. наук, профессор

**О. Е. Балашов,**

канд. техн. наук, доцент

**А. И. Степашкин,**

канд. техн. наук, доцент

Рязанский государственный радиотехнический университет

Предлагается алгоритм прогнозирования направления на сопровождаемый объект, движущийся в пространстве равномерно по линейной траектории, при отсутствии информации о дальности.

**Ключевые слова** — оптико-механическая система, сопровождение объектов, прогнозирование.

### Введение

В последние годы наблюдается значительный интерес к задаче автоматического сопровождения объекта оптико-механическими системами (ОМС). На точностные характеристики системы видеосопровождения влияет множество факторов. Одним из них является возможность кратковременного пропадания информации о положении объекта на изображении, например при заслонении сопровождаемого объекта другими объектами. В данном случае на время пропадания информации требуется организация управления приводами карданного подвеса системы видеосопровождения.

### Постановка задачи

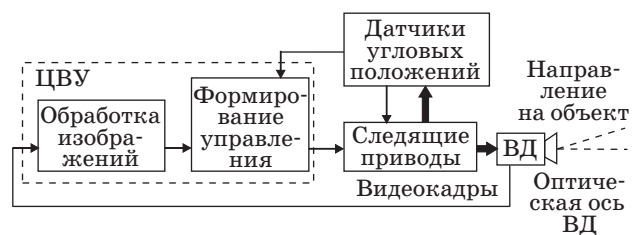
Задача высокоточного автоматического сопровождения движущихся объектов, решаемая в ОМС, является актуальной на современном уровне развития науки и техники. Автоматическое сопровождение объекта по данным видеонаблюдений — это постоянное отслеживание положения объекта в пространстве по последовательности видеок кадров и совмещение оптической оси видеодатчика (ВД) ОМС с направлением на объект [1].

Оптико-механическая система (рис. 1) содержит:

- цифровое вычислительное устройство ЦВУ для оценки координат сопровождаемого объекта на изображении и формирования заданных угловых положений рамок карданного подвеса;
- следящие приводы отработки заданных угловых положений;
- датчики угловых положений рамок опорно-поворотной платформы (карданного подвеса).

Формирование управления приводами ОМС осуществляется по измеренным на изображении, формируемом ВД, координатам сопровождаемого объекта, текущим углам поворота рамок карданного подвеса, а также углам качки носителя (крена, тангажа или дифферента, рыскания) в случае установки системы на подвижном носителе (корабле, летательном аппарате, наземном передвижном носителе и т. п.) и наличия датчиков качки [2].

Для качественного решения задачи непрерывного во времени совмещения оптической оси ВД



■ Рис. 1. Функциональная схема ОМС

с направлением на объект необходимо учесть возможность наличия случаев кратковременного пропадания информации о положении объекта на изображении. В таких ситуациях, чтобы не потерять объект, необходимо переходить в режим управления приводами ОМС по прогнозируемому направлению на объект. Предсказывать угловые координаты объекта можно различными способами:

- путем аппроксимации угловых направлений на объект полиномом невысокой степени, параметры которого определяются по значениям угловых координат в прошлые моменты времени;
- путем вычисления по некоторой математической модели, описывающей пространственное движение объекта относительно носителя ОМС (параметры модели оцениваются по показаниям датчиков угловых координат с учетом положений объекта в последовательности кадров изображений). Данный путь представляется более предпочтительным.

Поскольку практически имеет смысл рассматривать случаи, когда информация о положении объекта на изображении пропадает на непродолжительное время, то будем считать, что это время (с учетом времени предыстории, используемой для определения параметров движения) объект относительно носителя движется по прямолинейной равномерной траектории. В случае отсутствия информации о дальности до объекта условную траекторию движения объекта в пространстве (параллельную действительной с теми же угловыми координатами) можно описать тремя линейными уравнениями, определяющими положение объекта в трехмерном пространстве по начальному положению и проекциям скорости движения объекта вдоль условной траектории на соответствующие координатные оси. При использовании такой математической модели необходимо решать систему линейных алгебраических уравнений для нахождения параметров движения объекта.

В реальных ОМС в силу ошибок измерения координат объекта на изображении для нахождения оценок параметров движения можно применить методы оценки зашумленных измерений параметров траектории движения с использованием сглаживающих фильтров, описанных, например, в книге [3].

В дальнейшем будем полагать, что угловые направления на объект  $\theta$  (азимут),  $\varphi$  (угол места) определяются в системе сопровождения как

$$\theta = \theta_d + \varepsilon_\theta + \zeta_\theta^\theta; \varphi = \varphi_d + \varepsilon_\varphi + \zeta_\theta^\varphi,$$

где  $\theta_d, \varphi_d$  — измеренные датчиком значения углов соответственно  $\theta$  и  $\varphi$  поворота рамки двухосного карданного подвеса;  $\varepsilon_\theta, \varepsilon_\varphi$  — ошибки сопровожде-

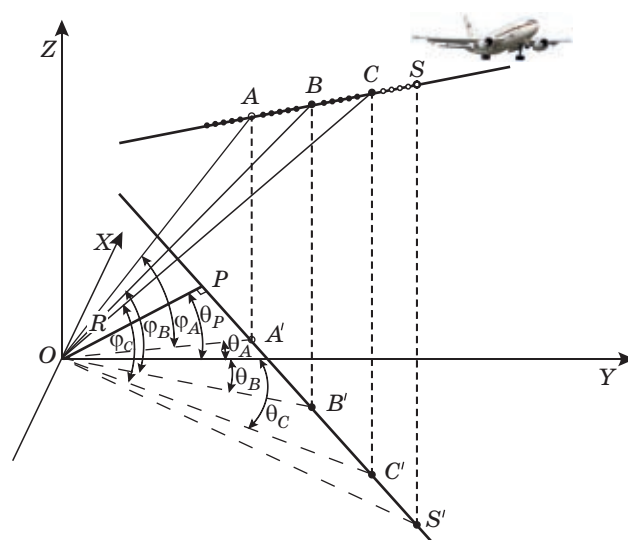
ния объекта системой;  $\zeta_\theta^\theta, \zeta_\theta^\varphi$  — ошибки измерений угловых координат объекта. Значения  $\theta, \varphi$  без учета ошибок измерения можно определить по выражениям, приведенным в работах [1, 4].

### Алгоритм прогнозирования угла азимута объекта

Предлагается алгоритм прогнозирования угла азимута направления на объект относительно носителя ОМС в предположении, что объект и носитель движутся в пространстве равномерно и прямолинейно. В этом случае можно говорить о таком же характере движения объекта в системе координат, жестко связанной с носителем. Рассмотрим модель прямолинейного равномерного движения объекта в трехмерном пространстве с измерением без ошибок его угловых координат (азимута  $\theta$  и угла места  $\varphi$ ) относительно ОМС. В случае отсутствия информации о расстоянии до объекта (неизмеряемая координата) при наличии измеряемых угловых координат объекта можно говорить о бесконечном множестве параллельных прямых в пространстве траекторий, имеющих в моменты измерения  $n_1 = nT, n = 1, 2, \dots$  ( $n$  — номер измерения,  $T$  — интервал времени между двумя соседними измерениями ( $T = \text{const}$ )) одинаковые значения измеряемых координат.

Из бесконечного множества траекторий с совпадающими угловыми координатами за основу для дальнейшего рассмотрения примем одну из них (рис. 2). Проекция траектории на плоскость  $OXY$  проходит на расстоянии  $R$  от начала системы координат  $OXYZ$ , привязанной к строительным осям носителя ОМС.

Пусть к моменту пропадания информации о положении объекта имеется последователь-



■ Рис. 2. Условная траектория движения объекта

ность вычисленных значений угловых координат  $\theta_{n-i}, \varphi_{n-i}, i = \overline{0, N}$ , где  $N$  — четное число. На рисунке отмечены точки  $A, B, C$  траектории, соответствующие начальному, среднему и конечному измерениям из рассматриваемого множества  $i = \overline{0, N}$ . Закрашенные кружки на траектории соответствуют измеренным значениям координат, незакрашенные — прогнозируемым координатам.

Расстояния между точками траектории, соответствующими соседним измерениям угловых координат объекта, равны в силу прямолинейности и равномерности движения объекта в системе координат носителя. Точка  $B$ , соответствующая измерению  $N/2$ , делит отрезок траектории объекта между измерениями, обозначенными точками  $A$  и  $C$ , пополам. На рисунке отмечены угловые координаты по азимуту  $\theta_A, \theta_B, \theta_C$ . Предполагается, что измерение углов азимута осуществляется от оси  $OY$ . Точка  $P$  на рисунке — ближайшая точка проекции траектории объекта на горизонтальную плоскость от начала системы координат. Точки  $A', B', C'$  являются проекциями точек  $A, B, C$  и в случае прямолинейности траектории объекта лежат на одной прямой.

Проекцию траектории движения в горизонтальной плоскости можно описать двумя линейными уравнениями:

$$\begin{aligned} X(n-i) &= X(n) - \delta_X i = X_0^n - \delta_X i, \\ \delta_X &= X_i - X_{i-1} = \text{const}, \quad i = \overline{0, N}; \\ Y(n-i) &= Y(n) - \delta_Y i = Y_0^n - \delta_Y i, \\ \delta_Y &= Y_i - Y_{i-1} = \text{const}, \quad i = \overline{0, N}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $X_0^n, Y_0^n$  — координаты конечной точки (точка  $C$ ) на  $n$ -м кадре;  $\delta_X, \delta_Y$  — проекции изменения координат за интервал измерения (период поступления кадров изображения) на координатные оси  $OX$  и  $OY$  соответственно. Тогда для координат  $X, Y$  точек  $A, B, C$  можно записать выражения:

$$\begin{aligned} X_C &= X_0^n, \quad Y_C = Y_0^n; \quad X_B = X_0^n - \Delta_X, \quad Y_B = Y_0^n - \Delta_Y; \\ X_A &= X_0^n - 2\Delta_X, \quad Y_A = Y_0^n - 2\Delta_Y; \\ \Delta_X &= \frac{N}{2} \delta_X, \quad \Delta_Y = \frac{N}{2} \delta_Y. \end{aligned} \quad (2)$$

Из (2) следует система трех уравнений

$$\begin{cases} \text{tg}(\theta_C) = \frac{X_0^n}{Y_0^n} \\ \text{tg}(\theta_B) = \frac{X_0^n - \Delta_X}{Y_0^n - \Delta_Y} \\ \text{tg}(\theta_A) = \frac{X_0^n - 2\Delta_X}{Y_0^n - 2\Delta_Y} \end{cases} \quad (3)$$

Из бесконечного множества параллельных прямых в пространстве траекторий с заданными угловыми координатами  $\theta_A, \theta_B, \theta_C$  выберем одну траекторию объекта, задавшись некоторым положительным значением координаты  $Y_C$ . Координата

$$X_C = Y_C \text{tg}(\theta_C). \quad (4)$$

Из характера движения объекта в пространстве (равномерное и прямолинейное) справедливо выражение

$$\frac{Y_C - Y_A}{X_C - X_A} = \frac{\Delta_Y}{\Delta_X} = \text{tg}\alpha, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — угол между осью  $OX$  и проекцией траектории объекта на плоскость  $OXY$ . Для отношения  $\Delta_Y/\Delta_X$  можно с использованием системы уравнений (3) получить следующее выражение:

$$\frac{\Delta_Y}{\Delta_X} = \frac{\text{tg}(\theta_A) - 2\text{tg}(\theta_B) + \text{tg}(\theta_C)}{2T_1 T_2 + \text{tg}(\theta_B) T_3}, \quad (6)$$

где  $T_1 = \text{tg}(\theta_A) - \text{tg}(\theta_B)$ ;  $T_2 = \text{tg}(\theta_C) - \text{tg}(\theta_B)$ ;  $T_3 = \text{tg}(\theta_A) - 2\text{tg}(\theta_B) + \text{tg}(\theta_C)$ .

С учетом (4)–(6) координаты точки  $A$  могут быть вычислены по выражениям

$$\begin{aligned} Y_A &= \frac{Y_C - X_C \frac{\Delta_Y}{\Delta_X}}{1 - \text{tg}(\theta_A) \frac{\Delta_Y}{\Delta_X}}; \\ X_A &= Y_A \text{tg}(\theta_A). \end{aligned}$$

Значения  $\Delta_X, \Delta_Y$  вычисляются как

$$\Delta_X = \frac{X_C - X_A}{2}; \quad \Delta_Y = \frac{Y_C - Y_A}{2}.$$

При пропадании информации об измеряемых координатах объекта (последнее измерение получено в момент времени  $n$  (точка  $C$  на траектории)) прогнозировать угол азимута направления на объект для момента времени  $(n+k)$  можно по выражению

$$\begin{aligned} \theta_{(n+k)} &= \text{atg} \frac{X_{\text{пр}}^{n+k}}{Y_{\text{пр}}^{n+k}} = \text{atg} \frac{X_0^n + k\delta_X}{Y_0^n + k\delta_Y}; \\ \delta_X &= \frac{2\Delta_X}{N}; \quad \delta_Y = \frac{2\Delta_Y}{N}, \end{aligned}$$

где  $X_{\text{пр}}^{n+k}, Y_{\text{пр}}^{n+k}$  — прогнозируемые координаты объекта в плоскости  $OXY$ ;  $X_0^n, Y_0^n$  — значения, вычисленные по данным, полученным на момент поступления последнего видеокadra к моменту потери информации об объекте.

Данный алгоритм применим для прогнозирования направления на объект, если последний движется прямолинейно и равномерно. В других

случаях траектория объекта может быть аппроксимирована отрезками прямых линий.

На практике информация об измеренных угловых координатах объекта поступает в ОМС с некоторой ошибкой, величина которой зависит от точности алгоритма измерения координат объекта на изображении, точности датчиков углов поворота рамок кардана ОМС и т. п. Ошибки измерения угловых координат объекта оказывают значительное влияние на точность вычисления параметров траектории объекта. Особенно это проявляется при небольших изменениях угловых координат объекта в течение  $N$  отсчетов. Для повышения точности вычисления параметров движения объекта можно:

- увеличить количество измерений  $N$  для расчета параметров движения;
- произвести фильтрацию параметров траектории движения объекта.

Основным параметром, влияющим на точность предсказания угловых координат равномерной прямолинейной траектории объекта, является угол наклона траектории в плоскости  $OXY$ , определяемый выражением (6). Для оценки постоянных во времени параметров  $\Delta_Y/\Delta_X$ ,  $\delta_X$ ,  $\delta_Y$  может использоваться экспоненциальный фильтр [4].

Для сдвинутых на один кадр точек  $A, B, C$  значение  $Y_C$  на  $(n + 1)$ -м кадре должно вычисляться с учетом полученной на  $n$ -м кадре оценки величины  $\delta_Y$ .

### Алгоритм прогнозирования угла места объекта

При пропадании информации об объекте для указания направления на объект, кроме угла азимута, необходимо вычислить угол места  $\varphi$ . Из рис. 2 вытекают следующие выражения:

$$OA' = \frac{R}{\cos(\theta_P - \theta_A)}; \quad OC' = \frac{R}{\cos(\theta_P - \theta_C)}.$$

Угол  $\theta_P$  между осью  $OY$  и отрезком  $OP$ , перпендикулярным к проекции условной траектории объекта на горизонтальную плоскость, можно вычислить по формуле

$$\theta_P = \text{atg} \left( -\frac{\Delta_Y}{\Delta_X} \right),$$

в которой используется сглаженная оценка отношения  $\Delta_Y/\Delta_X$ .

Координаты объекта по оси  $OZ$  в точках  $A$  и  $C$  равны соответственно

$$Z_A = OA' \text{tg}(\varphi_A) = \frac{R \cdot \text{tg}(\varphi_A)}{\cos(\theta_P - \theta_A)};$$

$$Z_C = OC' \text{tg}(\varphi_C) = \frac{R \cdot \text{tg}(\varphi_C)}{\cos(\theta_P - \theta_C)}.$$

Приращение координаты  $Z$  за один видеокадр может быть определено как

$$\delta_Z = \frac{Z_C - Z_A}{N} = \frac{R}{N} \left[ \frac{\text{tg}(\varphi_C)}{\cos(\theta_P - \theta_C)} - \frac{\text{tg}(\varphi_A)}{\cos(\theta_P - \theta_A)} \right].$$

Прогнозируемое значение координаты  $Z$  на  $k$  интервалов времени можно представить как

$$Z_{n+k}^{\text{np}} = Z_C + k\delta_Z = R \left[ \frac{\text{tg}(\varphi_C)}{\cos(\theta_P - \theta_C)} + \frac{k}{N} \left( \frac{\text{tg}(\varphi_C)}{\cos(\theta_P - \theta_C)} - \frac{\text{tg}(\varphi_A)}{\cos(\theta_P - \theta_A)} \right) \right].$$

Обозначим точкой  $S$  прогнозируемую точку на пространственной условной траектории движения объекта, а  $S'$  — ее проекцию на горизонтальную плоскость. Длина отрезка  $OS'$  может быть выражена как

$$(OS')_{n+k}^{\text{np}} = \frac{R}{\cos(\theta_P - \theta_{n+k}^{\text{np}})}.$$

Для прогнозируемого значения угла места справедливым будет выражение

$$\begin{aligned} \text{tg} \varphi_{n+k}^{\text{np}} &= \frac{Z_{n+k}^{\text{np}}}{(OS')_{n+k}^{\text{np}}} = \\ &= \left[ \frac{\text{tg}(\varphi_C)}{\cos(\theta_P - \theta_C)} + \frac{k}{N} \left( \frac{\text{tg}(\varphi_C)}{\cos(\theta_P - \theta_C)} - \frac{\text{tg}(\varphi_A)}{\cos(\theta_P - \theta_A)} \right) \right] \times \\ &\quad \times \cos(\theta_P - \theta_{n+k}^{\text{np}}). \end{aligned}$$

### Пример работы алгоритма прогнозирования направления на объект

Рассмотрим в качестве примера движение объекта в пространстве по траектории, описываемой уравнениями:

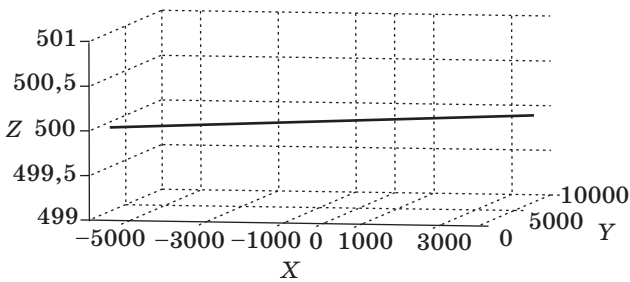
$$X(n) = X_0 + n\delta_X; \quad Y(n) = Y_0 + n\delta_Y;$$

$$Z(n) = Z_0 + n\delta_Z;$$

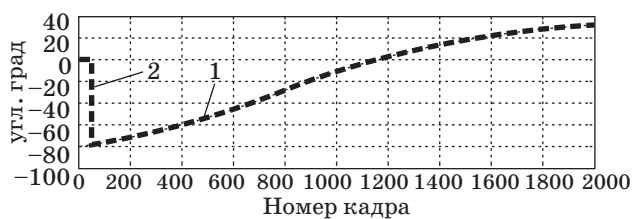
$$\delta_Z = V \sin(\beta_0); \quad \delta_X = V \cos(\beta_0) \cos(\alpha_0);$$

$$\delta_Y = V \cos(\beta_0) \sin(\alpha_0),$$

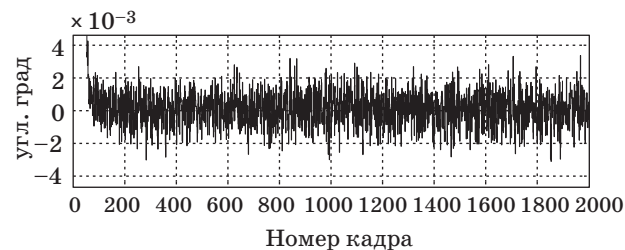
где  $X_0 = -5700$  м;  $Y_0 = 1000$  м;  $Z_0 = 500$  м;  $V = 5,7$  м/кадр — скорость объекта;  $\beta_0 = 30^\circ$  — угол наклона траектории объекта к горизонтальной плоскости;  $\alpha_0 = 0^\circ$  — угол между проекцией траектории объекта на горизонтальную плоскость и осью  $OX$ ;  $\delta_X, \delta_Y, \delta_Z$  — проекции изменения координат за интервал измерения (период поступления кадров изображения) на координатные оси  $OX, OY, OZ$  соответственно;  $n$  — номер видеокадра. Результаты моделирования представлены на рис. 3–9. На этих рисунках строб прогнозирована



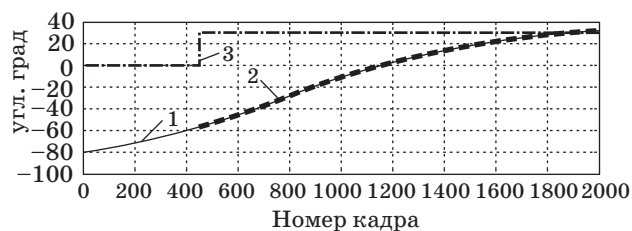
■ Рис. 3. Траектория объекта в системе координат OXYZ (носитель ОМС находится в точке O с координатами (0, 0, 0))



■ Рис. 4. Графики изменения истинного угла азимута объекта (кривая 1) и прогнозируемого на 1 отсчет (кривая 2)

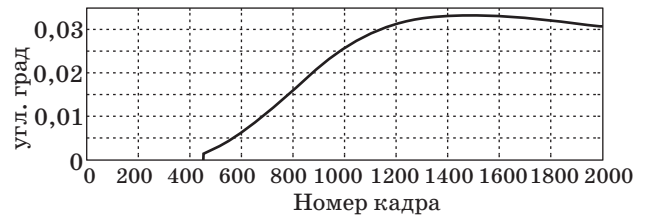


■ Рис. 5. Ошибка прогнозирования угла азимута объекта на 1 отсчет

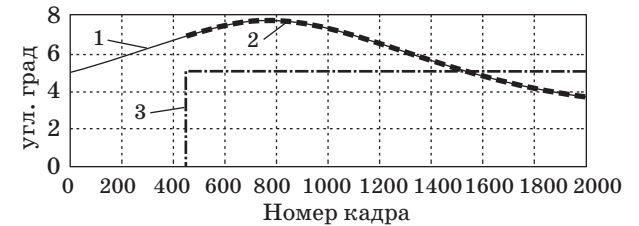


■ Рис. 6. Графики изменения истинного угла азимута объекта (кривая 1), прогнозируемого (кривая 2) и строб прогнозирования (кривая 3)

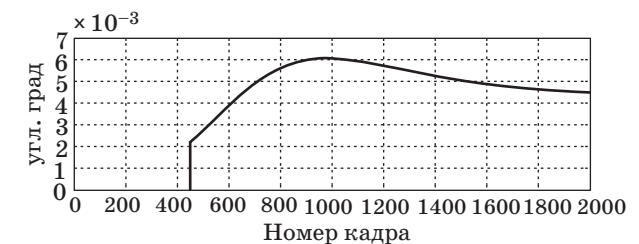
ния указывает на момент времени, в который пропадает информация об объекте, и на интервал времени, внутри которого вычисляются прогнозируемые значения угловых координат объекта. До момента пропадания информации осуществляется текущая оценка параметров условной пространственной траектории объекта, начиная с номера кадра  $N$ .



■ Рис. 7. Ошибка прогнозирования угла азимута объекта



■ Рис. 8. Графики изменения истинного угла места объекта (кривая 1), прогнозируемого (кривая 2) и строб прогнозирования (кривая 3)



■ Рис. 9. Ошибка прогнозирования угла места объекта

При моделировании использовались следующие данные:

- шум с нормальным законом распределения, нулевым математическим ожиданием ( $m = 0$ ) и среднеквадратическим отклонением  $\sigma = 0,001^\circ$ , моделирующий ошибки измерения углов поворота рамок карданного подвеса шестнадцатиразрядными датчиками;

- количество кадров  $N = 50$ ;

- эффективная память экспоненциального фильтра равна 10 отсчетам.

Результаты экспериментов представлены для одной реализации шума, моделирующего ошибки измерения. Однако исследования были проведены для нескольких различных реализаций шума. При этом ошибки прогнозирования имели примерно тот же порядок малости.

## Заключение

Результаты моделирования дают основание говорить об эффективности предложенного алгоритма прогнозирования угловых координат сопровождаемого объекта, пространственную траекторию которого на ограниченном интервале

времени с достаточной точностью можно представить прямолинейным равномерным движением. При этом не требуется информация о дальности до сопровождаемого объекта.

Исследования выполнены при поддержке государственного контракта № П1002 от 27.05.2010 г., заключенного с Министерством образования и науки.

## Литература

1. Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. — М.: Радиотехника, 2008. — 176 с.
2. Алпатов Б. А., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Повышение точности сопровождения объектов бортовой оптико-механической системой с двухосным карданным подвесом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. Вып. 9. С. 20–23.
3. Расчет и проектирование цифровых сглаживающих и преобразующих устройств / Под ред. Ю. М. Коршунова. — М.: Энергия, 1976. — 336 с.
4. Алпатов Б. А., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Формирование управления приводами трехосного карданного подвеса в системе сопровождения объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 5. С. 24–28.

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

При подготовке рукописей статей редакция просит Вас руководствоваться следующими рекомендациями.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала в Word шрифтом Times New Roman размером 13.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание, полное название организации, аннотация (7–10 строк) и ключевые слова на русском и английском языках, подписанные подписи.

**Формулы** в текстовой строке набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), только в том случае, если средства Word не позволяют набрать формулу или символ (например, простая дробь, символы с «крышками» и т. д.), используйте имеющийся в Word формульный редактор Mathtype или Equation; формулы, стоящие в отдельной строке, могут быть набраны как угодно; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте вкладку Define; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

**Иллюстрации** в текст не заверстываются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

- рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы изготавливаются в векторных программах: Visio 4, 5, 2002–2003 (\*.vsd); Coreldraw (\*.cdr); Excel; Word; AdobeIllustrator; AutoCad (\*.dxf); Компас; Matlab (экспорт в формат \*.ai);
- фото и растровые — в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

**В редакцию предоставляются:**

- сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, факс, эл. адрес), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40 × 55 мм;
- экспертное заключение.

**Список литературы** составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

- для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;
- для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;
- ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;
- при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Более подробную информацию см. на сайте: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)