



УДК 629.7.016

Д. И. Панченко, Ю. К. Кисин, К. В. Черкисов

## Оценка координат и скорости летательного аппарата по синхроимпульсам телеметрической информации

Предложен новый математический метод построения разностно-дальномерных измерений по синхроимпульсам телеметрической информации, регистрируемой в ходе натурных испытаний летательных аппаратов. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение определения параметров траектории летательных аппаратов по синхроимпульсам телеметрической информации. Алгоритмы и программное обеспечение проверены математическим моделированием и по реальной информации.

*Ключевые слова:* летательный аппарат, параметры траектории, синхроимпульсы телеметрической информации, измерительное средство, разностно-дальномерный метод, дальность, скорость изменения дальности.

При проведении летных экспериментов условия информационной неопределенности, вызванные отсутствием траекторных измерений на отдельных участках или всем интервале полета, могут возникать, если:

- нет технической возможности применения наземных средств;
- в составе телеметрируемых параметров отсутствуют траекторные измерения на основе аппаратуры спутниковой навигации (АПСН);
- произошел срыв слежения АПСН за навигационными спутниками на значительных интервалах времени.

В условиях указанной информационной неопределенности предлагается применять разностно-дальномерный метод определения параметров траектории летательного аппарата (ЛА) по синхроимпульсам телеметрической информации (ТМИ).

Использование телеметрического сигнала в данном методе весьма выгодно, так как система распространения и регистрации сигнала уже существует (передатчик – приемник). Сам же телеметрический сигнал организован так, что содержит в себе периодически повторяющиеся характерные события – маркеры (синхроимпульсы) для определения логической структуры телеметрической информации. В приемной телеметрической аппаратуре маркеры опознаются и регистрируются в файл телеметрической информации.

Таким образом, в процессе обработки телеметрического файла остается определить время регистрации маркера на разных стан-

циях с применением высокоточной системы единого времени (СЕВ) и получить разности времени, а следовательно, и разности дальностей от ЛА до телеметрических станций.

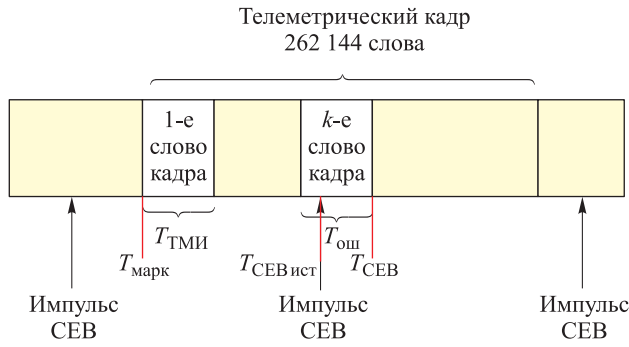
В данной статье показано, что по синхроимпульсам телеметрической информации можно сделать не только опытное определение параметров траектории, но и дать оценку снизу для модуля скорости ЛА по одному измерительному средству. При наличии информации трех и более измерительных средств можно определить составляющие скорости по координатам.

В работах [1, 2] приведен способ определения параметров траектории ЛА по синхроимпульсам ТМИ разностно-дальномерным методом. Точность определения траекторных параметров предлагаемым методом обусловлена величиной случайной погрешности СЕВ, методической ошибкой вычисления времени синхроимпульсов, возможностью учета систематических ошибок СЕВ и геометрическим фактором расположения измерительных средств.

На рис. 1 показана структура телеметрического кадра.

Для определения времени регистрации маркера выбрано событие – начало телеметрического кадра. Установив время начала кадра на каждой телеметрической станции, можно найти разности времени для любой пары станций и, следовательно, разности дальностей.

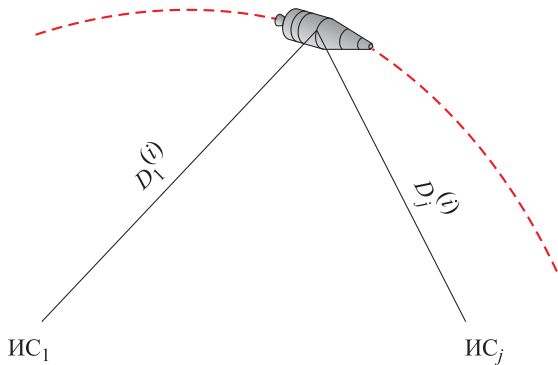
Возможно вычисление двух типов разностей дальностей: в выбранный момент измерений на нескольких измерительных средствах и по каждому измерительному средству для



**Рис. 1.** Структура телеметрического кадра:  $T_{\text{марк}}$  – время начала телеметрического кадра;  $T_{\text{ТМИ}}$  – длительность телеметрического слова;  $T_{\text{СЕВ}}$  – время секундного импульса СЕВ;  $T_{\text{СЕВ ист}}$  – истинный период следования телеметрических слов;  $T_{\text{ош}}$  – методическая ошибка определения времени начала телеметрического кадра

выбранной пары моментов измерений – приращения дальностей.

Способ определения разностей дальностей первого типа представлен на рис. 2.



**Рис. 2.** Способ определения разностей дальностей первого типа ИС<sub>1</sub> – измерительное средство с номером 1; ИС<sub>j</sub> – измерительное средство с номером j

Разности времени регистрации начала кадра рассчитываются по формуле

$$T_{j1}^{(i)} = t_j^{(i)} - t_1^{(i)}; \quad (1)$$

а разности измеренных дальностей –

$$\Delta D_{j1}^{(i)} = cT_{j1}^{(i)} = D_j^{(i)} - D_1^{(i)}, \quad (2)$$

где  $t_j^{(i)}$  – время начала телеметрического кадра;  $c$  – скорость света;

$D_j^{(i)}$  – расстояние от ЛА до измерительного средства;

$j$  – номер измерительного средства;

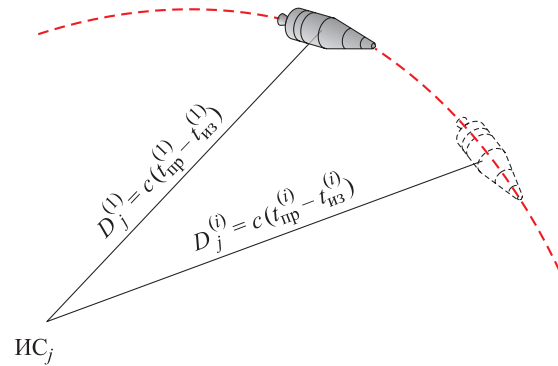
$i = 1, \dots, N$  – номер измерения;

$N$  – число измерений.

Для каждого измерительного средства может быть определена разность дальностей (приращений):

$$\Delta D_j^{(i)} = c(t_j^{(i)} - t_j^{(1)}) = D_j^{(i)} - D_j^{(1)}, \quad i = 2, \dots, N. \quad (3)$$

Схема определения приращений дальностей представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Определение приращений дальностей

Разность дальностей  $\Delta D_j^{(i)}$  в соответствии с (3) реализуется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta D_j^{(i)} &= c(t_{\text{пр}}^{(i)} - t_{\text{из}}^{(i)}) - c(t_{\text{пр}}^{(1)} - t_{\text{из}}^{(1)}) = \\ &= c(t_{\text{пр}}^{(i)} - t_{\text{пр}}^{(1)}) - c(t_{\text{из}}^{(i)} - t_{\text{из}}^{(1)}), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $t_{\text{пр}}^{(i)}$  – время приема события для  $i$ -й точки траектории;

$t_{\text{из}}^{(i)}$  – время передачи события для  $i$ -й точки траектории;

$t_{\text{пр}}^{(1)}$  – время приема события для первой точки траектории;

$t_{\text{из}}^{(1)}$  – время передачи события для первой точки траектории.

Величина  $t_{\text{из}}^{(i)} - t_{\text{из}}^{(1)}$  определяется выражением

$$t_{\text{из}}^{(i)} - t_{\text{из}}^{(1)} = ndt,$$

$$n = \text{Round}((t_{\text{пр}}^{(i)} - t_{\text{пр}}^{(1)}) / dt),$$

где  $\text{Round}$  – функция округления вещественного аргумента до ближайшего целого числа;

$dt$  – бортовой цикл передачи телеметрических кадров.

Дальность и скорость изменения дальности определяются (опуская индекс измерительного средства) по формулам

$$D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \quad D' = \frac{v_x x + v_y y + v_z z}{D}. \quad (5)$$



Обозначив вектор координат и вектор скорости ЛА соответственно

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix},$$

можно записать

$$DD' = (\mathbf{q}, \mathbf{v}) = |\mathbf{q}||\mathbf{v}|\cos\varphi,$$

где  $\varphi$  – угол между векторами  $\mathbf{q}$  и  $\mathbf{v}$ .

Следовательно,  $D \cdot |D'| \leq |\mathbf{q}| \cdot |\mathbf{v}|$ .

Учитывая, что  $D = |\mathbf{q}|$ , получается оценка снизу для значения модуля скорости ЛА:

$$|\mathbf{v}| \geq |D'|. \quad (6)$$

При наличии данных по трем измерительным средствам могут быть получены оценки скоростей изменения дальностей для каждого:

$$D'_j(t_i) \approx \frac{\Delta D_{ji}}{(t_i - t_{i-1})}, \quad (7)$$

где  $j=1, 2, 3$  – номер измерительного средства,  $i=2, \dots, N$ .

Погрешность скоростей изменения дальностей в соответствии с выражением (7) обусловлена погрешностью определения приращений дальностей и погрешностью численного дифференцирования. Погрешности определения приращений дальностей в свою очередь зависят от погрешности определения времени начала кадров и бортового цикла передачи телеметрических кадров в соответствии с формулой (4).

В данном случае могут быть получены оценки составляющих вектора скорости ЛА.

Координаты траектории вычисляются по трем дальностям по алгоритму, приведенному в работе [3].

В гринвичской системе координат (ГСК) уравнения измерений имеют вид

$$D_j = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2};$$

$$D'_j = \frac{v_x(x - x_j) + v_y(y - y_j) + v_z(z - z_j)}{D_j}. \quad (8)$$

В соответствии с [3], определив матрицу

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} (x - x_1) & (y - y_1) & (z - z_1) \\ (x - x_2) & (y - y_2) & (z - z_2) \\ (x - x_3) & (y - y_3) & (z - z_3) \end{pmatrix},$$

где  $(x_j, y_j, z_j)$  – координаты измерительных средств в ГСК, уравнение для вычисления составляющих скорости имеет вид

$$\mathbf{A}\mathbf{v} = \mathbf{u}, \quad (9)$$

$$\text{где } \mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}, \quad u_j = D'_j D_j.$$

В итоге вектор скорости рассчитывается по формуле

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{u}. \quad (10)$$

Схема определения параметров траектории по приращениям дальностей на основе применения синхрои импульсов телеметрической информации представлена на рис. 4.

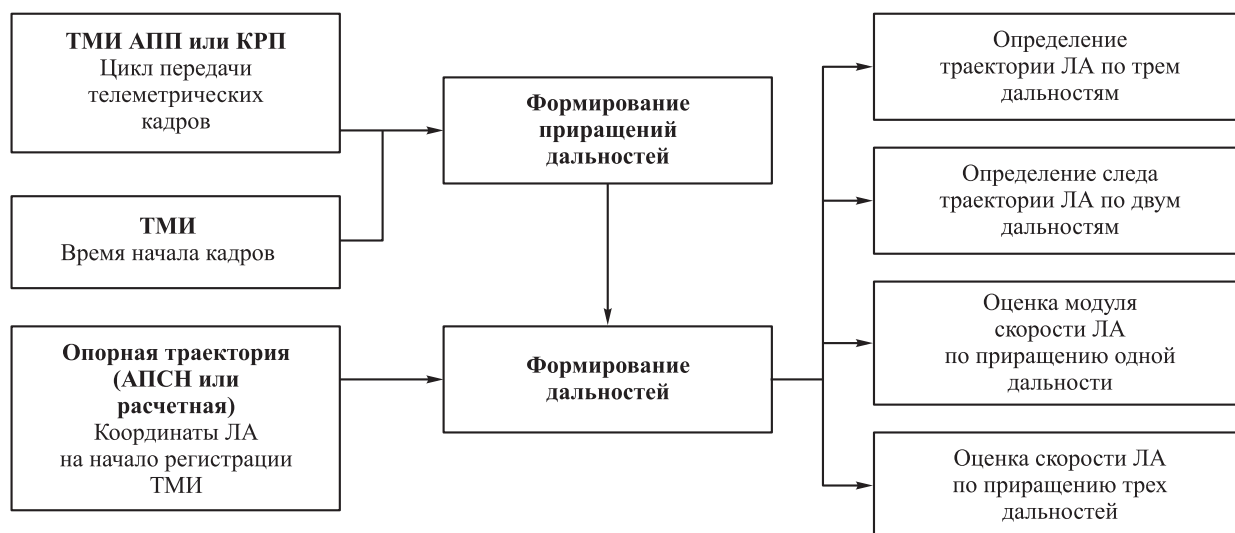
В настоящей статье в отличие от работ [1, 2] предлагается способ вычисления разностей дальностей второго типа – приращений дальностей во времени по каждому измерительному средству с последующим определением дальностей. Наилучшие результаты данный метод показывает при нахождении станции регистрации ТМИ вблизи стартовой позиции или при малых отличиях фактической и опорной траекторий ЛА на начальном участке полета.

Для снижения влияния случайных погрешностей на приращения дальностей  $\Delta D_j^{(i)}$ , определяемых в соответствии с (3), полученные приращения сглаживаются полиномами по каждому измерительному средству.

Сглаживание дальностей и скоростей изменения дальностей осуществляется полиномами  $P(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_m t^m$  на основе метода наименьших квадратов (МНК):

$$F(a_0, a_1, \dots, a_m) \rightarrow \min \left( \sum_{i=1}^n (q_j(t_i) - P_j(t_i))^2 \right), \quad (11)$$

где  $\{t_1, \dots, t_n\}$  – множество моментов измерений, для которых осуществляется аппроксимация;  $m$  – степень полинома.



**Рис. 4.** Определение параметров траектории по приращениям дальностей:

КРП – комплексные регламентные проверки (проверки ЛА перед летным экспериментом с применением системы телеметрических измерений); АПП – автоматическая предстартовая подготовка

При этом проверяется условие

$$|(t_n - t_1) - n\Delta t| \leq \epsilon, \quad (12)$$

где  $n$  – число измерений сглаживания;

$\Delta t$  – дискретность измерений;

$\epsilon$  – допустимый уровень пропуска отдельных измерений в интервале сглаживания.

Данные величины и степень полинома являются управляющими параметрами программы.

Сглаживание осуществляется независимо по каждой составляющей вектора  $\mathbf{s} = (D_1 \ D_2 \ D_3 \ D'_1 \ D'_2 \ D'_3)^T$ .

При вычислении неравенства (12) в соответствии с формулой (11) определяется итоговое значение в текущей выборке для середины интервала сглаживания. Следующая выборка формируется исключением первого значения и добавлением нового измерения. Процедура сглаживания повторяется в соответствии с формулами (12), (11) до достижения конца измерений. При невыполнении выражения (12), а также для первых и последних измерений предусмотрена особая процедура сглаживания.

Для расчета коэффициентов сглаживающих полиномов из условия (11) необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которая может оказаться плохо обусловленной. Вычисление такой СЛАУ относится к некорректным задачам, методы решения которых рассмотрены в [4–7].

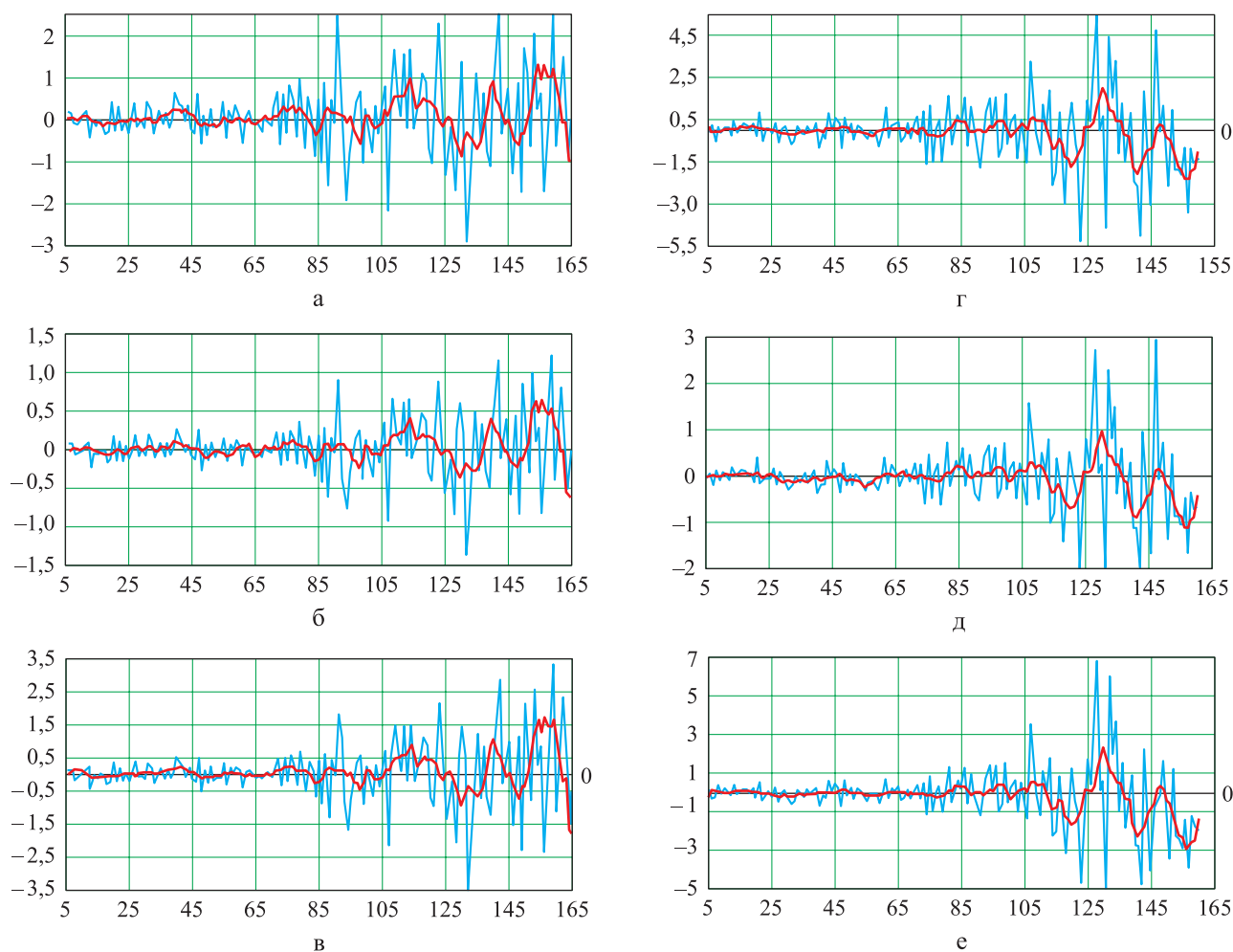
Поэтому в программном обеспечении для решения задачи (11) применяется сингулярное разложение [4, 5] матрицы линейного уравнения для нахождения коэффициентов полиномов.

Ниже приведены результаты моделирования.

Для определения скоростей проводится численное дифференцирование по координатам расчетной траектории. Координаты и скорости принимаются за истинные значения. По данным параметрам рассчитываются дальности для трех измерительных средств. В дальности вносятся случайные ошибки с нормальным распределением датчиком псевдослучайных чисел. Случайные ошибки измерений дальности моделируются со среднеекватратическим отклонением 20 м. По полученным «измеренным» дальностям численным дифференцированием определяются «измеренные» скорости изменения дальностей. Осуществляется сглаживание «измеренных» дальностей и скоростей изменения дальностей.

В соответствии с формулами (8)–(10) и работой [3] определяются координаты и скорости ЛА по «измеренным» и сглаженным дальностям и скоростям изменения дальностей.

На рис. 5, а-е приведены отклонения от «истинных» значений координат и скоростей



**Рис. 5.** Отклонение измеренных (—) и сглаженных (—) значений от истинных:

а – по координате  $X$ ; б – по координате  $Y$ ; в – по координате  $Z$ ; г – по скорости  $V_x$ ; д – по скорости  $V_y$ ;  
е – по скорости  $V_z$

ЛА, определенных по «измеренным» и сглаженным дальностям и скоростям изменения дальностей. По горизонтальной оси представлена временная шкала в секундах, по вертикальной – отклонения координат и скоростей ЛА в км и км/с соответственно.

Графики на рис. 5, а–е показывают эффективность процедуры сглаживания.

В приведенном примере увеличение погрешностей определения параметров движения ЛА с течением времени вызвано увеличением геометрического фактора для взаимного расположения измерительных средств и ЛА.

Метод определения скорости и параметров траектории ЛА по синхроимпульсам телеметрической информации проверен математическим моделированием и по реальной информации.

Следует отметить, что в условиях аварийных и нештатных ситуаций, даже при отсутствии информации в структуре ТМИ, указанный метод по структуре кадра ТМИ позволяет определить разности дальностей, а следовательно, и параметры траектории ЛА.

### Выводы

1. Разработан математический метод определения разностей дальностей по синхроимпульсам телеметрической информации.

2. Созданы алгоритмы и программное обеспечение вычисления скорости и параметров траектории ЛА по синхроимпульсам телеметрической информации.

3. Алгоритмы и программное обеспечение расчета скорости и параметров траектории ЛА по синхроимпульсам телеметрической информации проверены результатами математи-



ческого моделирования и информацией летных испытаний.

4. Данный математический метод позволяет оценить параметры траектории движения ЛА и определить его место падения в условиях аварийных и нештатных ситуаций.

5. Главным достоинством предлагаемого в настоящей статье метода является возможность определения траектории ЛА по трем станциям и следа траектории в горизонтальной плоскости по двум станциям, а также получение оценки снизу скорости ЛА по одной станции.

#### Список литературы

1. *Кисин Ю. К.* Методы пассивной радиолокации летательных аппаратов по сигналам телеметрических систем // Морская радиоэлектроника. 2008. № 2. С. 30–35.

2. *Кисин Ю. К.* Определение координат летательных аппаратов по разностно-дально-

мерным измерениям при наличии индивидуальных систематических погрешностей // Стохастическая оптимизация в информатике. 2013. Т. 9. Вып. 1. С. 59–67.

3. *Жданюк Б. Ф.* Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Советское радио, 1978. 384 с.

4. *Тихонов А. Н., Уфимцев М. В.* Статистическая обработка результатов экспериментов. М.: Изд-во Московского университета, 1988. 174 с.

5. *Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К.* Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1984. 280 с.

6. *Лоусон Ч., Хенсон Р.* Численное решение задач метода наименьших квадратов. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 232 с.

7. *Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. 288 с.

**Поступила 21.03.18**

---

**Панченко Денис Иванович** – кандидат технических наук, начальник научно-испытательного отдела войсковой части 09703, г. Северодвинск.

Область научных интересов: методы полигонных испытаний летательных аппаратов.

**Кисин Юрий Константинович** – кандидат технических наук, академический советник РАРАН, старший научный сотрудник научно-испытательного отдела войсковой части 09703, г. Северодвинск.

Область научных интересов: методы полигонных испытаний летательных аппаратов.

**Черкисов Кирилл Владимирович** – научный сотрудник научно-испытательного отдела войсковой части 09703, г. Северодвинск.

Область научных интересов: методы полигонных испытаний летательных аппаратов.



## Estimation of aircraft coordinates and speed by telemetry information clock pulses

The study introduces a new mathematical method for time difference measurements by telemetry information clock pulses recorded during aircraft field tests. We developed the algorithms and software for determining the aircraft trajectory parameters by telemetry information clock pulses and verified the algorithms and software by mathematical simulation and real information.

*Keywords:* aircraft, trajectory parameters, telemetry information clock pulses, measuring tool, time difference method, range, range rate.

**Panchenko Denis Ivanovich** – Candidate of Engineering Sciences, Head of the Research and Testing Department, military unit 09703, Severodvinsk.

Science research interests: ground test methods for aircraft.

**Kisin Yuriy Konstantinovich** – Candidate of Engineering Sciences, Academic Adviser, Russian Academy of Missile and Ammunition Sciences, Senior Research Fellow, Research and Testing Department, military unit 09703, Severodvinsk.

Science research interests: ground test methods for aircraft.

**Cherkisov Kirill Vladimirovich** – Research Fellow, Research and Testing Department, military unit 09703, Severodvinsk.

Science research interests: ground test methods for aircraft.