

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПРИОРНОЙ И ИНВАРИАНТНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ФОРМЕ ТЕЛА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ

## THE USE OF A PRIORI AND INVARIANT BODY SHAPE INFORMATION TO SOLVE THE PROBLEM OF CORRECTING NAVIGATION DATA

A. Polokhov

*Summary.* At the present stage of scientific and technical development, the requirements for technical indicators of measuring and control tools are constantly increasing. Improving the accuracy of determining coordinates is a very important task, allowing you to raise the level of automatic control of the vessel (air, sea and river). The proposed approach makes it possible to obtain a more accurate value of the coordinates of vehicles as a whole without imposing additional requirements on the supporting infrastructure of ground and space). At the same time, a 50–100 fold increase in the accuracy of determining the coordinates of the vessel is achieved. The proposed method makes it possible to determine with high accuracy in real time at the above accuracy, i.e. in motion.

*Keywords:* navigation, GPS, GLONASS receiver system, connection of body shape with the behavior of the receiver system, extreme accuracy of coordinate measurement, real-time system.

Полохов Андрей Николаевич

ведущий инженер, Институт проблем управления РАН  
им. В.А. Трапезникова, г. Москва  
nmvgan@yandex.ru

*Аннотация.* На современном этапе научно-технического развития постоянно возрастают требования к техническим показателям средств измерения и управления. Повышение точности определения координат является весьма важной задачей, позволяющие поднять уровень автоматического управления судна (воздушного, морского и речного). Предлагаемый подход позволяет получить более точное значение координат транспортных средств в целом без предъявления дополнительных требований к обеспечивающей инфраструктуре наземной и космической). При этом достигается 50–100 кратное увеличение точности определения координат судна. Предлагаемый метод позволяет определять с высокой точностью в реальном масштабе времени при указанной выше точности, т.е. в движении.

*Ключевые слова:* навигация, ГСН, система приёмников ГЛОНАСС, связь формы тела с поведением системы приёмников, предельная точность измерения координат, система реального времени.

### Введение

Точность измерения высокого уровня достижима в настоящее время только при стационарных измерениях, например геодезии, в строительстве и т.п. В этом случае точность достигается за счёт процесса сходимости координат к величине размеров самого приёмника ГСН (глобальная спутниковая навигационная система). В настоящее время для повышения точности определения координат используется т.н. **дифференциальный метод**, требующий дополнительной наземной инфраструктуры и имеющий большие ограничения.

Целью статьи является рассмотрение коллективного поведения системы приёмников ГСН, связанных в совместной работе общим алгоритмом. И использование полученных результатов с целью построения вычислительной процедуры для получения качественно более точных значений координат твёрдого тела в режиме реального времени (в качестве твёрдого тела использована геометрическая модель самолёта нормальной аэродинамической схемы, поскольку имеет важное прикладное значение, Рис. 1).

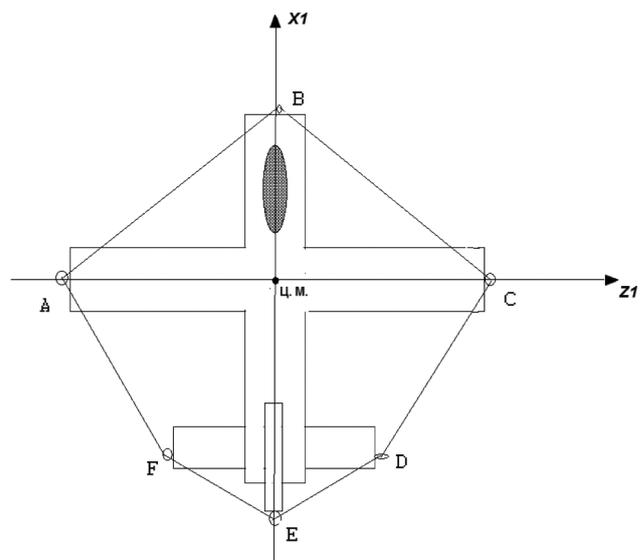


Рис. 1. Условное изображение ЛА

На Рис. 1 выделены маргинальные точки А...F, которые принадлежат телу и в тоже время определяют его габариты. Т.к. эти отрезки принадлежат данному твёрдо-

му телу, то они могут быть измерены до экспериментов (a priori) и при разных эволюциях остаются инвариантами. Т.е. форма твёрдого тела не меняется. На Рис. 2 изображён граф связности вершин A...F — условно в правильной форме. Назовём его графом G<sup>-</sup>. Граф G<sup>-</sup> связан с телом.

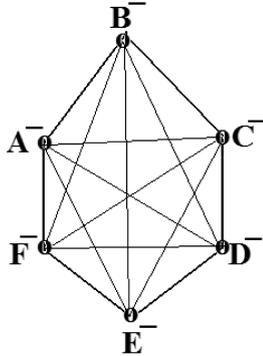


Рис. 2. Граф связей

Где расстояния между вершинами графа означают длину между соответствующими маргинальными точками Рис.1. Множество треугольников, образованных вершинами графа на Рис.2 затруднительно для визуального подсчёта. Для этой цели воспользуемся правилами комбинаторики.

По известной формуле комбинаторики, число таких треугольников получится равным:

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6}{1 \cdot 2 \cdot 3(6-3)!} = \frac{720}{6 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3} = \frac{720}{36} = 20;$$

где m — набор из трёх любых вершин, образующих треугольную грань, а n — общее число вершин ABCDEF. Каждый треугольник может рассматриваться как соответствующая треугольная грань, из которых складывается призма, внутри которой оказывается вписанным модель самолёта, изображённая на Рис. 1. Часть треугольных плоскостей образуют внешнюю поверхность, а остальные находятся внутри и не видны на Рис. 3

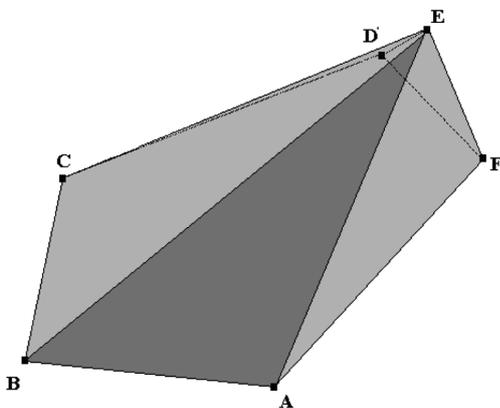


Рис. 3. Призма габаритов ЛА

Поскольку можно путём непосредственного измерения узнать длины рёбер графа на Рис. 2, то с помощью формулы Герона, которая выглядит,

$$S = \sqrt{p(p-a) \cdot (p-b) \cdot (p-c)}, \quad (1)$$

где  $p = \frac{a+b+c}{2}$ , a, p — полупериметр треугольника, а S — площадь треугольника.

Кроме 20 треугольников графа на Рис. 2 образована система рёбер, соединяющая пары вершин графа. Аналогично (1) по формуле комбинаторики

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6}{1 \cdot 2 \cdot 3(6-2)!} = \frac{720}{48} = 15. \quad (2)$$

Площадь каждого из 20 треугольников производится по формуле Герона, путем непосредственного измерения соответствующих рёбер графа на Рис. 2 — геометрическое свойство твёрдого тела. Аналогично измеряются длины между парами вершин. Существует известная и компактная формула, которая определяет площадь треугольника в трёхмерном пространстве по координатам трёх вершин:

$$S_{ABC} = \frac{1}{2} \sqrt{\begin{vmatrix} 1 & A_x & B_y \\ 1 & B_x & B_y \\ 1 & C_x & C_y \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} 1 & A_x & A_z \\ 1 & B_x & B_z \\ 1 & C_x & C_z \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} 1 & A_y & A_z \\ 1 & B_y & B_z \\ 1 & C_y & C_z \end{vmatrix}^2} \quad (3)$$

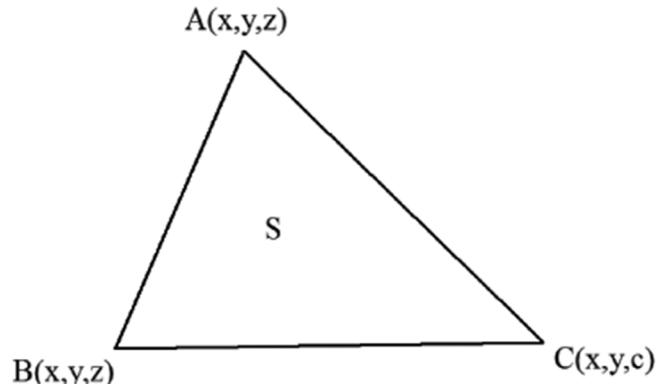


Рис. 4. Треугольник площади S в трёхмерном пространстве

Таким образом осуществляется связь площади треугольника в координатном представлении вершин и длинами его сторон.

Рассмотрим в общих чертах приёмник ГНС. В мире выпускается огромное разнообразие такого рода приборов, которое содержит обязательное подмножество общих функций и множество отличий. В контексте данного материала нас будет интересовать общая возможность таких устройств выдавать с необходимой частотой местоположение данного прибора в двух представлении-

ях: геоцентрической и геодезической, а также точность определения местонахождения. В геоцентрической системе используется декартова система координат с началом координат в центре Земли по ПЗ-90.

Следующей важной величиной является точность местоопределения. В качестве модели точности использована формула среднеквадратичного отклонения. Это связано с тем, что весьма затруднительно учесть все виды помех и данная модель является компромиссной. При этом неявно предполагается, что источником ошибок является исключительно приёмник ГНС, а остальная часть инфраструктуры работает с высокой точностью.

Приёмник ГНС обладает всеми свойствами измерительных приборов. Будучи установленными в вершинах графа на Рис. 2 (аналогично, установленными в маргинальных местах на Рис. 1) указывает не точку установки, а несколько иную, в соответствии с величиной  $\delta$ . На Рис. 6 это будут одноименные фрагменты графа  $G$  и  $G^*$  в виде двух треугольников, лежащих в разных плоскостях.

На Рис. 5 показана импульсная помеха по каналу высоты для одного и того же места в режиме — широта, долгота, высота.

На Рис. 6 показаны один виртуальный треугольник как часть графа  $G$ , построенного на показаниях шести приёмников ГНС и другой (виртуальный) треугольник, как часть графа  $G^*$ , расположенные в разных плоскостях.

Шесть приёмников ГНС, закреплённых в маргинальных точках летательного аппарата, передают измеренные значения с погрешностью  $\delta$ . Это ведёт к виртуальному искажению формы тела. А именно, призмы на Рис. 3.

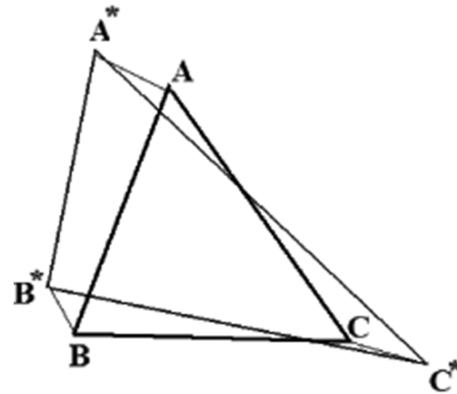


Рис. 6. Реальный и виртуальный треугольники

Напомним, что призма получена заранее, путём измерений обычным измерительным инструментом. Как это было описано выше. Искажения площади каждого из треугольников можно получить путём использования формулы 3, которая определяет площадь треугольника по значению координат вершин того или иного треугольника или их совокупности. Можно потребовать, чтобы погрешность  $\delta$ , сгенерированной ГНС, заменить неким приближением, которое назовём «скорректированным значением ошибки измерения координаты», путём сравнения соответствующих площадей треугольников.

Если обратиться к Рис. 1, то можно отметить, что вершины  $A, B, C, D, E, F$  соединяются несколько необычным способом. Получить их численные значения из Рис. 1 невозможно, а отсюда невозможность подсчёта площадей треугольников по Рис. 2. Для решения этой был выбрано следующее решение: была собрана геометрическая модель летательного аппарата ТУ-160, выполненная в масштабе 1:144, на которой были проведены необходимые физические измерения с учётом масштаба. На Рис. 7 показана эта модель.

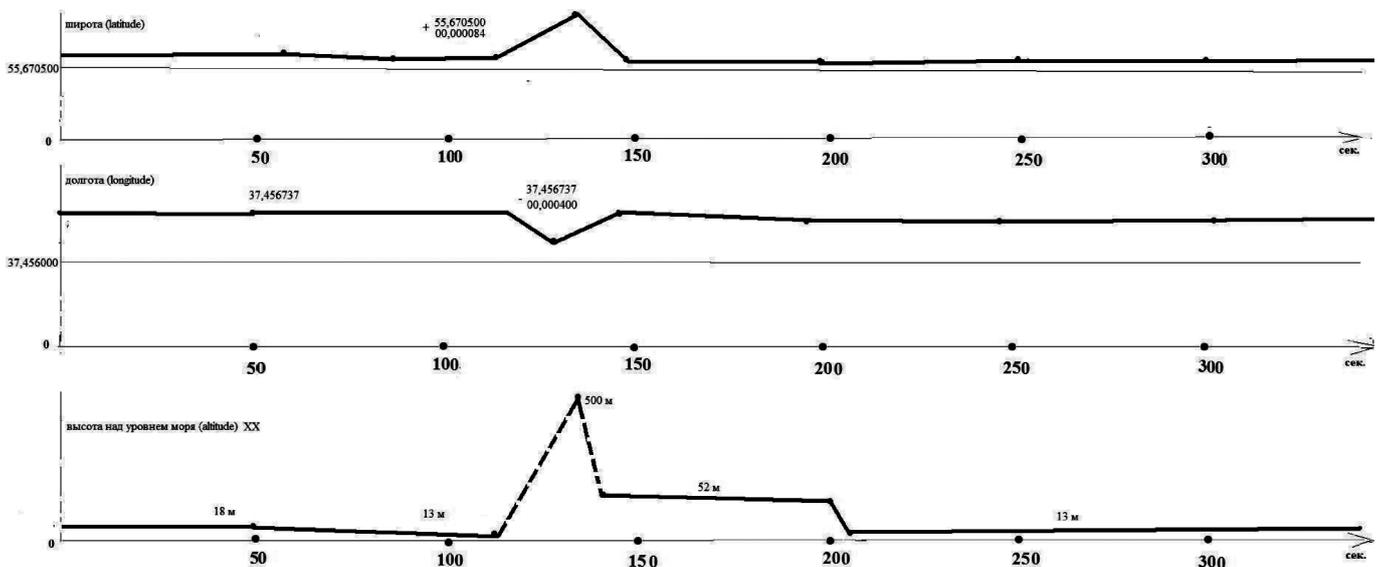


Рис. 5. Временная диаграмма помехи сигнала



Рис. 7. Геометрическая копия в масштабе реального ЛА

Ниже приведены полученные описанным способом реальные длины рёбер на Рис. 1 и Рис. 2.

$$\begin{aligned}
 AB &= 310 \cdot \frac{144}{1000}; BC = 310 \cdot \frac{144}{1000}; BE = 354 \cdot \frac{144}{1000}; \\
 AE &= 227 \cdot \frac{144}{1000}; CE = 225 \cdot \frac{144}{1000}; \\
 BF &= 367 \cdot \frac{144}{1000}; BD = 367 \cdot \frac{144}{1000}; AC = 382 \cdot \frac{144}{1000}; \\
 AD &= 267 \cdot \frac{144}{1000}; CF = 265 \cdot \frac{144}{1000}; \\
 FD &= 93 \cdot \frac{144}{1000}; AF = 187 \cdot \frac{144}{1000}; CD = 187 \cdot \frac{144}{1000}; \\
 FE &= 59 \cdot \frac{144}{1000}; ED = 59 \cdot \frac{144}{1000}.
 \end{aligned}$$

Первый множитель получен путём измерения на физической модели по Рис. 7. Размер задан в миллиметрах. В числителе задан масштаб модели и реального аппарата. В знаменателе указано число миллиметров в одном метре.

Имея реалистические значения длин рёбер графа и используя формулу Герона (1) можно получить значения площадей треугольников призмы на Рис. 3. Ниже перечислены эти значения.

$$\begin{aligned}
 S_{ABC} &= 967,05; S_{FED} = 35,02; S_{AFE} = 92,13; \\
 S_{CED} &= 95,40; S_{ACE} = 478,47; \\
 S_{FBD} &= 149,97; S_{FBC} = 835,70; S_{AED} = 110,27; \\
 S_{FBE} &= 214,38; S_{AFC} = 468,40; \\
 S_{ABD} &= 839,68; S_{BED} = 215,33; S_{ABE} = 720,37; \\
 S_{FCD} &= 116,13; S_{ACD} = 475,07; \\
 S_{FCE} &= 109,37; S_{AFD} = 109,25; S_{BCD} = 600,93; \\
 S_{ABF} &= 600,74; S_{BCE} = 714,60.
 \end{aligned}$$

Площадь треугольников задана в метрах квадратных. Совокупность представленных выше данных описывает с достаточной для обозначенных целей твёрдое тело, в конкретном случае летательный аппарат.

Далее описаны уравнения и неравенства зависимостей, рассмотренных в первой главе.

$L_{**}$  — расстояние между соответствующими вершинами графа  $G^-$ . Смысл представленных ниже уравнений следующий: потребуем, чтобы расстояние между вершинами отыскиваемых приближений должны быть равными соответствующим значениям, полученным путём измерения на модели.

$$\begin{aligned}
 (1) & (A_x^* - B_x^*)^2 + (A_y^* - B_y^*)^2 + (A_z^* - B_z^*)^2 = L_{A^-B^-}^2; \\
 (2) & (A_x^* - D_x^*)^2 + (A_y^* - D_y^*)^2 + (A_z^* - D_z^*)^2 = L_{A^-D^-}^2; \\
 (3) & (A_x^* - F_x^*)^2 + (A_y^* - F_y^*)^2 + (A_z^* - F_z^*)^2 = L_{A^-F^-}^2; \\
 (4) & (A_x^* - E_x^*)^2 + (A_y^* - E_y^*)^2 + (A_z^* - E_z^*)^2 = L_{A^-E^-}^2; \\
 (5) & (A_x^* - C_x^*)^2 + (A_y^* - C_y^*)^2 + (A_z^* - C_z^*)^2 = L_{A^-C^-}^2; \\
 (6) & (B_x^* - F_x^*)^2 - (B_y^* - F_y^*)^2 - (B_z^* - F_z^*)^2 = L_{B^-F^-}^2; \\
 (7) & (B_x^* - E_x^*)^2 + (B_y^* - E_y^*)^2 + (B_z^* - E_z^*)^2 = L_{B^-E^-}^2; \\
 (8) & (B_x^* - D_x^*)^2 + (B_y^* - D_y^*)^2 + (B_z^* - D_z^*)^2 = L_{B^-D^-}^2; \\
 (9) & (B_x^* - C_x^*)^2 + (B_y^* - C_y^*)^2 + (B_z^* - C_z^*)^2 = L_{B^-C^-}^2; \\
 (10) & (C_x^* - D_x^*)^2 + (C_y^* - D_y^*)^2 + (C_z^* - D_z^*)^2 = L_{C^-D^-}^2; \\
 (11) & (C_x^* - E_x^*)^2 + (C_y^* - E_y^*)^2 + (C_z^* - E_z^*)^2 = L_{C^-E^-}^2; \\
 (12) & (C_x^* - F_x^*)^2 + (C_y^* - F_y^*)^2 + (C_z^* - F_z^*)^2 = L_{C^-F^-}^2; \\
 (13) & (D_x^* - F_x^*)^2 + (D_y^* - F_y^*)^2 + (D_z^* - F_z^*)^2 = L_{D^-F^-}^2; \\
 (14) & (D_x^* - E_x^*)^2 + (D_y^* - E_y^*)^2 + (D_z^* - E_z^*)^2 = L_{D^-E^-}^2; \\
 (15) & (E_x^* - F_x^*)^2 + (E_y^* - F_y^*)^2 + (E_z^* - F_z^*)^2 = L_{E^-F^-}^2.
 \end{aligned}$$

Ниже приведены неравенства, отсылающие к Рис. 6, на котором ради упрощения рисунка показаны два треугольника, относящиеся к графам  $G$  и  $G^*$ . Граф  $G$  формируется по показаниям физических приёмников ГСНС. Граф  $G^-$  — это совокупность вершин и рёбер, проходящих через маргинальные точки твёрдого тела, в конкретном случае летательного аппарата. Граф  $G^*$  с соответствующими вершинами является целью поиска искомого приближения. Исходя из целей задачи, потребуем, чтобы соответствующие разницы между значениями, вершины графа  $G$  и  $G^*$  были меньше или равно величине  $\delta$ . Ниже приведены эти шесть неравенств.

$$(16) (A_x^* - A_x^*)^2 + (A_y^* - A_y^*)^2 + (A_z^* - A_z^*)^2 \leq \sigma^2;$$

$$(17) (B_x^* - B_x^*)^2 + (B_y^* - B_y^*)^2 + (B_z^* - B_z^*)^2 \leq \sigma^2;$$

$$(18) (C_x^* - C_x^*)^2 + (C_y^* - C_y^*)^2 + (C_z^* - C_z^*)^2 \leq \sigma^2;$$

$$(19) (D_x^* - D_x^*)^2 + (D_y^* - D_y^*)^2 + (D_z^* - D_z^*)^2 \leq \sigma^2;$$

$$(20) (E_x^* - E_x^*)^2 + (E_y^* - E_y^*)^2 + (E_z^* - E_z^*)^2 \leq \sigma^2;$$

$$(21) (F_x^* - F_x^*)^2 + (F_y^* - F_y^*)^2 + (F_z^* - F_z^*)^2 \leq \sigma^2.$$

Далее приведена система ещё из 20 уравнений. Левые части уравнений содержат координаты разыскиваемых вершин и равны квадратам площади соответствующего треугольника графа  $G^*$ . В правых частях находятся числовые значения квадратов площади соответствующего треугольника, полученных непосредственным измерением и с помощью формулы Герона на модели.

$$(22) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} A_y^* & A_z^* & 1 \\ B_y^* & B_z^* & 1 \\ C_y^* & C_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_z^* & A_x^* & 1 \\ B_z^* & B_x^* & 1 \\ C_z^* & C_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_x^* & A_y^* & 1 \\ B_x^* & B_y^* & 1 \\ C_x^* & C_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{A^*B^*C^*}^2$$

$$(23) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} D_y^* & D_z^* & 1 \\ E_y^* & E_z^* & 1 \\ F_y^* & F_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} D_z^* & D_x^* & 1 \\ E_z^* & E_x^* & 1 \\ F_z^* & F_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} D_x^* & D_y^* & 1 \\ E_x^* & E_y^* & 1 \\ F_x^* & F_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{F^*E^*D^*}^2$$

$$(24) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} A_y^* & A_z^* & 1 \\ E_y^* & E_z^* & 1 \\ F_y^* & F_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_z^* & A_x^* & 1 \\ E_z^* & E_x^* & 1 \\ F_z^* & F_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_x^* & A_y^* & 1 \\ E_x^* & E_y^* & 1 \\ F_x^* & F_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{A^*F^*E^*}^2$$

$$(25) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} C_y^* & C_z^* & 1 \\ D_y^* & D_z^* & 1 \\ E_y^* & E_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} C_z^* & C_x^* & 1 \\ D_z^* & D_x^* & 1 \\ E_z^* & E_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} C_x^* & C_y^* & 1 \\ D_x^* & D_y^* & 1 \\ E_x^* & E_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{C^*E^*D^*}^2$$

$$(26) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} A_y^* & A_z^* & 1 \\ C_y^* & C_z^* & 1 \\ E_y^* & E_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_z^* & A_x^* & 1 \\ C_z^* & C_x^* & 1 \\ E_z^* & E_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_x^* & A_y^* & 1 \\ C_x^* & C_y^* & 1 \\ E_x^* & E_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{A^*C^*E^*}^2$$

$$(27) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} B_y^* & B_z^* & 1 \\ D_y^* & D_z^* & 1 \\ F_y^* & F_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} B_z^* & B_x^* & 1 \\ D_z^* & D_x^* & 1 \\ F_z^* & F_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} B_x^* & B_y^* & 1 \\ D_x^* & D_y^* & 1 \\ F_x^* & F_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{B^*D^*F^*}^2$$

$$(28) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} B_y^* & B_z^* & 1 \\ C_y^* & C_z^* & 1 \\ F_y^* & F_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} B_z^* & B_x^* & 1 \\ C_z^* & C_x^* & 1 \\ F_z^* & F_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} B_x^* & B_y^* & 1 \\ C_x^* & C_y^* & 1 \\ F_x^* & F_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{B^*C^*F^*}^2$$

$$(29) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} A_y^* & A_z^* & 1 \\ D_y^* & D_z^* & 1 \\ E_y^* & E_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_z^* & A_x^* & 1 \\ D_z^* & D_x^* & 1 \\ E_z^* & E_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_x^* & A_y^* & 1 \\ D_x^* & D_y^* & 1 \\ E_x^* & E_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{A^*D^*E^*}^2$$

$$(30) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} B_y^* & B_z^* & 1 \\ E_y^* & E_z^* & 1 \\ F_y^* & F_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} B_z^* & B_x^* & 1 \\ E_z^* & E_x^* & 1 \\ F_z^* & F_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} B_x^* & B_y^* & 1 \\ E_x^* & E_y^* & 1 \\ F_x^* & F_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{B^*E^*F^*}^2$$

$$(31) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} A_y^* & A_z^* & 1 \\ C_y^* & C_z^* & 1 \\ F_y^* & F_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_z^* & A_x^* & 1 \\ C_z^* & C_x^* & 1 \\ F_z^* & F_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_x^* & A_y^* & 1 \\ C_x^* & C_y^* & 1 \\ F_x^* & F_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{A^*C^*F^*}^2$$

$$(32) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} A_y^* & A_z^* & 1 \\ B_y^* & B_z^* & 1 \\ D_y^* & D_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_z^* & A_x^* & 1 \\ B_z^* & B_x^* & 1 \\ D_z^* & D_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_x^* & A_y^* & 1 \\ B_x^* & B_y^* & 1 \\ D_x^* & D_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{A^*B^*D^*}^2$$

$$(33) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} B_y^* & B_z^* & 1 \\ D_y^* & D_z^* & 1 \\ E_y^* & E_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} B_z^* & B_x^* & 1 \\ D_z^* & D_x^* & 1 \\ E_z^* & E_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} B_x^* & B_y^* & 1 \\ D_x^* & D_y^* & 1 \\ E_x^* & E_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{B^*D^*E^*}^2$$

$$(34) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} A_y^* & A_z^* & 1 \\ B_y^* & B_z^* & 1 \\ E_y^* & E_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_z^* & A_x^* & 1 \\ B_z^* & B_x^* & 1 \\ E_z^* & E_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_x^* & A_y^* & 1 \\ B_x^* & B_y^* & 1 \\ E_x^* & E_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{A^*B^*E^*}^2$$

$$(35) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} C_y^* & C_z^* & 1 \\ D_y^* & D_z^* & 1 \\ F_y^* & F_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} C_z^* & C_x^* & 1 \\ D_z^* & D_x^* & 1 \\ F_z^* & F_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} C_x^* & C_y^* & 1 \\ D_x^* & D_y^* & 1 \\ F_x^* & F_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{C^*D^*F^*}^2$$

$$(36) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} A_y^* & A_z^* & 1 \\ C_y^* & C_z^* & 1 \\ D_y^* & D_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_z^* & A_x^* & 1 \\ C_z^* & C_x^* & 1 \\ D_z^* & D_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_x^* & A_y^* & 1 \\ C_x^* & C_y^* & 1 \\ D_x^* & D_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{A^*C^*D^*}^2$$

$$(37) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} C_y^* & C_z^* & 1 \\ E_y^* & E_z^* & 1 \\ F_y^* & F_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} C_z^* & C_x^* & 1 \\ E_z^* & E_x^* & 1 \\ F_z^* & F_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} C_x^* & C_y^* & 1 \\ E_x^* & E_y^* & 1 \\ F_x^* & F_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{C^*E^*F^*}^2$$

$$(38) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} A_y^* & A_z^* & 1 \\ D_y^* & D_z^* & 1 \\ F_y^* & F_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_z^* & A_x^* & 1 \\ D_z^* & D_x^* & 1 \\ F_z^* & F_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_x^* & A_y^* & 1 \\ D_x^* & D_y^* & 1 \\ F_x^* & F_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{A^*D^*F^*}^2$$

$$(39) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} B_y^* & B_z^* & 1 \\ C_y^* & C_z^* & 1 \\ D_y^* & D_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} B_z^* & B_x^* & 1 \\ C_z^* & C_x^* & 1 \\ D_z^* & D_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} B_x^* & B_y^* & 1 \\ C_x^* & C_y^* & 1 \\ D_x^* & D_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{B^*C^*D^*}^2$$

Избыточные уравнения

$$(40) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} A_y^* & A_z^* & 1 \\ B_y^* & B_z^* & 1 \\ F_y^* & F_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_z^* & A_x^* & 1 \\ B_z^* & B_x^* & 1 \\ F_z^* & F_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_x^* & A_y^* & 1 \\ B_x^* & B_y^* & 1 \\ F_x^* & F_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{A^*B^*F^*}^2$$

$$(41) \frac{1}{4} \left\{ \begin{vmatrix} B_y^* & B_z^* & 1 \\ C_y^* & C_z^* & 1 \\ E_y^* & E_z^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} B_z^* & B_x^* & 1 \\ C_z^* & C_x^* & 1 \\ E_z^* & E_x^* & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} B_x^* & B_y^* & 1 \\ C_x^* & C_y^* & 1 \\ E_x^* & E_y^* & 1 \end{vmatrix}^2 \right\} = S_{B^*C^*E^*}^2$$

Система содержит 18 переменных, а число уравнений — 20. Данная избыточность объясняется тем, что часть треугольников содержит смежные стороны. Из уравнений (1)–(36) можно составить много систем уравнений и неравенствами, содержащих 18 искомым приближений с 18 уравнениями или/и неравенствами. Сделаем выбор системы из уравнений (22) по (39) для решения задачи, исходя при этом из соображений однородности.

В настоящее время считается обоснованным использование для прикладных вычислений использование специализированных математических программных пакетов, таких как MathCad и подобных других. Для численного решения системы уравнений (22)–(39) был использован вариант MathCad версии 15. В процессе решения программа анализирует предложенную для решения систему уравнений и подбирает эффективный метод решения. В качестве начального приближения берутся данные с приёмников ГСНС, устанавливается точность приближенного решения 0,1 метра. Показания приёмников ГСНС получены имитационным способом в программе. Считается, что предлагаемый метод относится к системам реального времени. Предполагается, что компьютерная система обладает достаточной производительностью, чтобы успевать произвести получение результата до поступления очередного кадра сообщений.

Далее рассматриваются некоторые аспекты влияния рассматриваемого метода коррекции показаний приёмников ГСНС на задачи управления подвижным объектом. Среди таких задач есть задача определения пространственной ориентации летательного аппарата относительно земной вертикали как одной из осей и остальных двух координат (север — юг, запад — восток), путём пересчёта скорректированных координат в координату плоскости летательного аппарата (или иного судна), проходящего через центр масс (для случая ЛА).

### Материалы и методы

Для получения результатов работы использовалось компьютерное моделирование и решение систем урав-

нений численным методом средствами MathCad 15. Методы комбинаторики. Теории вероятности.

### Литературный обзор

Предлагаемая технология относится к инновациям. На данный момент отсутствуют материалы, развивающие данный метод.

### Результаты

В качестве оценки точности приёмника ГСНС используется модель средне-квадратичного отклонения  $\sigma$ . По этой причине ошибки могут быть весьма велики. Предлагаемая технология позволяет предельно снизить ошибку до 0,1 метра.

### Заключение

Одним из самых сложных этапов полёта ЛА является взлёт и особенно посадка, которые с трудом удаётся решить, применяя разнообразные радиотехнические и лазерные средства при отсутствии стандартизации в мировом масштабе. С помощью современных технических средств можно заранее спроектировать трассу движения судна и с высокой точностью ей следовать, используя предлагаемый метод коррекции. Благодаря высокой точности определения координат местоположения, можно повысить уровень автоматизации судовождения. Связь с бортовой системой судна обеспечивает управление вождением с учётом полученных значений коррекции для обеспечения точного следования заранее спроектированной траектории. При этом могут возникать задачи, обычные для систем регулирования: точности, стабилизации и т.п. К описанному материалу можно обоснованно применить термин «цифровизация», что соответствует мировой тенденции. Спроектированная трасса представляет собой массив координат, который заносится в память соответствующей системы управления судном до начала движения. Массив из координат образует трассу, по которой происходит движение судна.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Полохов А.Н. Алгоритмический метод коррекции показаний системы датчиков ГЛОНАСС/NAVSTAR, расположенных особым образом на поверхности летательного аппарата // Датчики и системы. 2015. № 9–10. С. 24–30.
2. Полохов А.Н. Метод повышения точности определения координат беспилотного летательного аппарата на основе геометрической модели для датчиков ГЛОНАСС/NAVSTAR // Биржа интеллектуальной собственности. 2015. том XIV №6 . С. 53–58.
3. Полохов А.Н. Датчик для измерения вектора напряженности электростатического поля // Датчики и системы. 2011. № 3. С. 27–29.
4. Полтавский А.В., Маклаков В.В., Бородуля В.М., Полохов А.Н., Мошников А.С. Контроль координат модулей нежесткой фазированной решётки // Датчики и системы. 2011. № 11. С. 52–54
5. Полтавский А.В., Семёнов С.С., Бурба А.А. Аверкин А.Е., Полохов А.Н. Роль разведывательно-ударных и ударных комплексов беспилотных летательных аппаратов в системе вооружения ВВС и ВМС ведущих стран мира. Боеприпасы. 2013. №1. С.54–63

6. Семёнов С.С., Полтавский А.В., Бурба А.А., Аверкин А.Е., Полохов А.Н. Роль Разведывательно-ударных и ударных комплексов беспилотных летательных аппаратов в системе вооружения ВВС и ВМС ведущих стран мира// Боеприпасы. 2013. № 3. С.26–44.
7. Семёнов С.С., Полтавский А.В., Бурба А.А., Аверкин А.Е., Полохов А.Н. Концептуальные вопросы развития ударных комплексов беспилотных летательных аппаратов. Боеприпасы 2013. №4. С. 20–28.
8. Полтавский А.В., Бурба А.А., Аверки А.Е., Семёнов С.С., Полохов А.Н., Седых Ю.Н. Системные принципы создания и применения многоцелевых комплексов беспилотных летательных аппаратов. М.: ИПУ РАН, 2010. — 102 с.
9. Полтавский А.В., Бурба А.А., Семёнов С.С., Маклаков В.В., Полохов А.Н., Аверкин А.Е., Бородуля В.М. Оценка эффективности управления комплексами беспилотных летательных аппаратов ударного назначения. М.: ИПУ РАН, 2009. — 48 с.
10. Semionov S.S., Poltavskiy A.V., Burba A.A., Polokhov A.N., Evaluating technical level of complex technical systems//journal of mechanics of continual and mathematical sciences. 2020. № 10, pp. 212–230.
11. Черкасова А.А., Салахов Р.Ф., Астахов Д.А. Создание аппаратно-программного динамического имитатора сигналов модернизированной межспутниковой радиолинии системы ГЛОНАСС. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. Том 8. Выпуск 3. 2021 стр. 63–71

---

© Полохов Андрей Николаевич (nmvgan@yandex.ru)  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»