

МАГНИТОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

к.т.н. С.М. Андреев, В.В. Афанасьев
(представил д.т.н., проф. Д.В. Голкин)

Рассматривается навигационная система, предназначенная для повышения безопасности полётов летательных аппаратов в составе групп. Она позволяет определять координаты и угловое положение соседних летательных аппаратов по низкочастотному магнитному полю системы, которой они оборудованы.

Задаче определения координат и углового положения летательных аппаратов (ЛА) посвящен ряд работ, в которых рассматриваются системы, имеющие различные принципы действия [1, 2]. Всем им присущ один общий недостаток – ограничение минимальной дальности возможного сближения самолётов. В работе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой системы, снижающей это ограничение.

В основу системы положен принцип контроля положения ЛА по его постоянному магнитному полю (МП). Исследованию вопроса определения координат и углового положения объекта по МП посвящен ряд работ [3, 4]. В них рассматривался вопрос определения положения объекта, имеющего дипольную модель МП. МП ЛА может быть описано дипольной моделью [5], но напряженность МП диполя изменяется обратно пропорционально кубу расстояния, что приводит к интенсивному снижению уровня МП ЛА при удалении от него. Решение этой задачи возможно при размещении на ЛА искусственного излучателя МП. В качестве его элемента предлагается использовать линейный проводник (ЛП) длиной L [м], с током I [А], напряженность МП которого описывается соотношением [7]:

$$\dot{H}_\varphi = \frac{I \cdot L}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \sin \theta, \quad (1)$$

где r – расстояние от центра ЛП до точки измерения; θ – угол между осью ЛП и r .

Измеренные составляющие вектора напряжённости МП (\vec{H}) несут в себе информацию о расположении ЛП относительно точки измерения. Так как при вращении ЛП вокруг продольной оси вектор \vec{H} не изменяется, а при перемещении ЛП вдоль этой оси изменяется только его величина (H) заключаем, что для решения поставленной задачи одного вектора недостаточно.

Таким образом, в качестве излучателя МП предложено рассматривать два ЛП (ЛП₁ и ЛП₂), расположенных ортогонально, вдоль осей X, Z связанной системы координат (ССК) ЛА [6]. С целью разделения МП элементов излучателя, а также выделения на фоне собственного МП ЛА, ЛП₁ и ЛП₂ запитываются переменным током сверх длинноволнового (СДВ) диапазона электромагнитных волн (ЭМВ). Такое МП может быть описано законами постоянного тока, то есть соотношением (1) [7]. Выбор порядка подключения ЛП должен обеспечивать максимальное перекрытие окружающего пространства своим МП. В связи с этим был проведён расчёт диаграммы направленности (ДН) при подключении обоих ЛП под ток с одинаковой частотой (**f**₁) (рис. 1, а), и с различной (**f**₁ и **f**₂) (рис. 1, б).

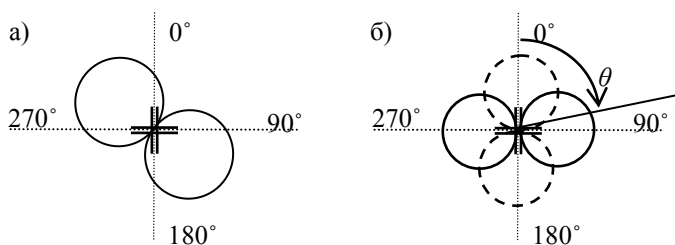


Рис. 1. Диаграмма направленности излучателя МСКОП (в плоскости, проходящей через оси обоих ЛП):
 а – ЛП₁ и ЛП₂ запитаны током частотой **f**₁;
 б – ЛП₁ запитан током частотой **f**₁, ЛП₂ – током частотой **f**₂

Как видно из рис. 1, а, использование тока одной частоты приводит к незначительному увеличению МП излучателя, по сравнению с МП одного ЛП. По форме ДН такого излучателя схожа с ДН ЛП, только развёрнута на 45°. Такой вариант не обеспечивает перекрытия всего пространства вокруг излучателя. ДН, изображённая на рис. 2, б, не имеет такого недостатка. Таким образом, выбираем второй вариант подключения, так как он обеспечивает максимальное перекрытие пространства при минимальном количестве элементов (два ЛП).

В качестве измерителя рассматривается трехкомпонентный магнитометр, измеряющий напряжённость МП, жёстко закреплённый на борту ЛА₂. Для однозначного определения координат объекта, векторы напряжённости МП ЛП₁ и ЛП₂ не должны изменять своего направления, для этого элементы излучателя надо запитывать пульсирующим током. Для исключения влияния постоянной составляющей напряжённости МП, элементы излучателя подключаются под ток попеременно.

Задача состоит в определении координат и углового положения ЛА₁ с излучателем МП по составляющим напряжённость МП (**H**_{x1}, **H**_{y1}, **H**_{z1} – МП ЛП₁ и **H**_{x2}, **H**_{y2}, **H**_{z2} – МП ЛП₂), измеренным трехкомпонентным магнитометром. Положение ЛА₁ определяется в нормальной системе координат

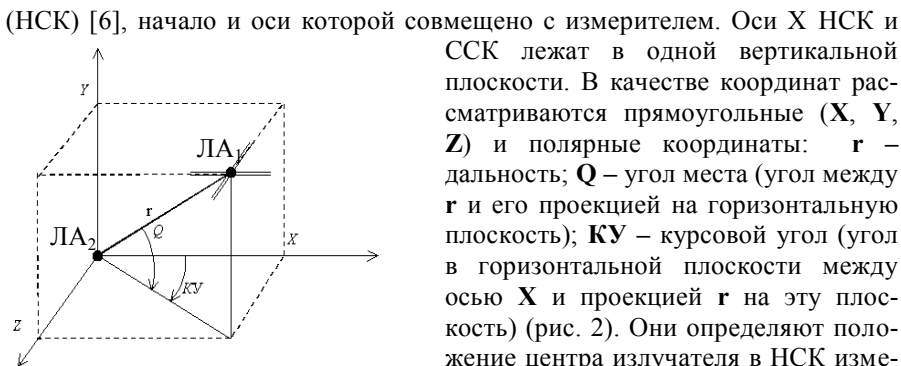


Рис. 2. Координаты, определяющие положение ЛА1 в НСК ЛА2

(НСК) [6], начало и оси которой совмещено с измерителем. Оси X НСК и ССК лежат в одной вертикальной плоскости. В качестве координат рассматриваются прямоугольные (X, Y, Z) и полярные координаты: r – дальность; Q – угол места (угол между r и его проекцией на горизонтальную плоскость); KY – курсовой угол (угол в горизонтальной плоскости между осью X и проекцией r на эту плоскость) (рис. 2). Они определяют положение центра излучателя в НСК измерителя. Угловое положение ЛА1 в НСК измерителя определяют: γ – угол крена; ν – угол тангажа; ϕ – угол рыскания (угол в горизонтальной плоскости между проекцией продольной оси ЛА1 на эту плоскость и осью X НСК ЛП2). Основное условие, которое поставлено при разработке алгоритма магнитометрической системы контроля относительного положения (МСКОП) – это произвольное взаимное и угловое положение контролируемого ЛА1 (ЛА с излучателем) и ЛА2 (ЛА с измерителем), при этом известны крен и тангаж ЛА2.

Таким образом, исходными данными для алгоритма МСКОП являются: длина ЛП1, ЛП2 и значения токов в них; крен и тангаж ЛА2; составляющие напряжённости МП ЛП1 и ЛП2 – $H_{X1}, H_{Y1}, H_{Z1}, H_{X2}, H_{Y2}, H_{Z2}$.

Разработка алгоритма МСКОП. Предлагаемый алгоритм разработан на основе использования математической модели линейного проводника с током (1) и соотношений, определяющих переход от связанной к нормальной системе координат (табл. 1) [8].

Таблица 1

Переход от связанной к нормальной системе координат

Оси нормальной системы координат	Оси связанной системы координат		
	OX	OY	OZ
O_oX_g	$\cos \phi \cos \nu$	$-\sin \nu \cos \phi \cos \gamma + \sin \phi \sin \gamma$	$\sin \nu \cos \phi \sin \gamma + \sin \phi \cos \gamma$
O_oY_g	$\sin \nu$	$\cos \nu \cos \gamma$	$-\cos \nu \sin \gamma$
O_oZ_g	$-\cos \nu \sin \phi$	$\cos \phi \sin \gamma + \sin \nu \sin \phi \cos \gamma$	$\cos \phi \cos \gamma - \sin \nu \sin \phi \sin \gamma$

Так как предлагаемая система работает в дискретном режиме, то алгоритм разрабатывался для условий произвольного фиксированного углового и взаимного расположения ЛА. Взаимное расположение ЛА1 и ЛА2 изображено на рис. 3. Обозначим центр ЛА1 точкой O, а центр ЛА2 – точкой B.

Для определения **H** МП от ЛП₁ (ЛП₂) в точке **B** необходимо знать угол θ_1 (θ_2). Введём дополнительные углы, определяющие положение точки **B** в ССК ЛА1: α – угол между осью X и проекцией **r** на плоскость XOY и β – угол между осью Y и проекцией **r** на плоскость YOZ. Также эти углы могут выражаться через H_{X1} , H_{Y1} , H_{Z1} , H_{X2} , H_{Y2} , H_{Z2} . В этом случае угол β определяет поворот \bar{H}_1 относительно оси Z по часовой стрелке, если смотреть с конца оси X; угол α определяет поворот \bar{H}_2 относительно оси Y по часовой стрелке, если смотреть с конца оси Z.

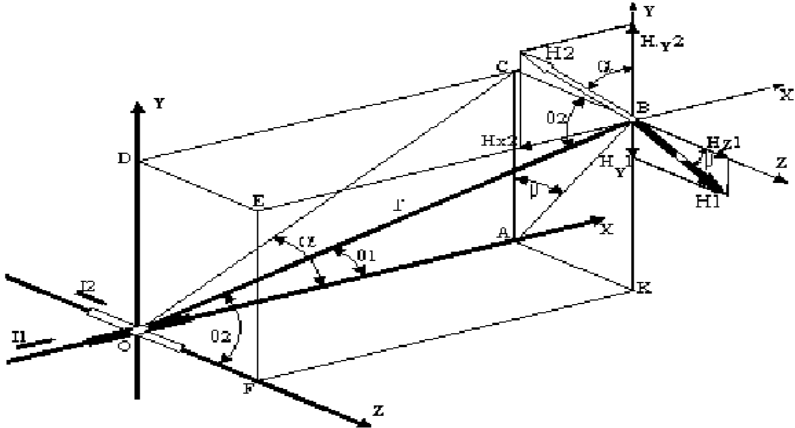


Рис. 3. Схема взаимного положения излучателя (ЛА₁) и измерителя (ЛА₂)

Рассмотрим сначала задачу определения координат при стационарном положении ЛА₁ и ЛА₂, когда оси их ССК параллельны.

1. Определяем абсолютные значения \bar{H}_1 и \bar{H}_2 :

$$H_1 = \sqrt{H_{X1}^2 + H_{Y1}^2 + H_{Z1}^2}; \quad H_2 = \sqrt{H_{X2}^2 + H_{Y2}^2 + H_{Z2}^2}. \quad (2)$$

2. Определяем углы θ_1 , θ_2 :

из ΔOAB определяем, что $AB = AC/\cos\beta$; $OA = AC/\operatorname{tg}\alpha$, откуда

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{AB}{OA} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta}; \quad (3)$$

из ΔOBC определяем, что $BC = AC \cdot \operatorname{tg}\beta$; $OC = AC/\sin\alpha$, откуда

$$\operatorname{tg} \theta_2 = \frac{OC}{BC} = \frac{1}{\sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}. \quad (4)$$

Значения углов α , β (их тригонометрических функций) определяются через составляющие \bar{H}_1 и \bar{H}_2 . Неоднозначность определения значений α и β исключается наличием информации о знаках H_{X1} , H_{Y1} , H_{Z1} , H_{X2} , H_{Y2} , H_{Z2} (табл. 2, первоначальные значения углов определены в интервале $0 \div 90^\circ$).

3. На основе соотношения (1) определяем r :

$$r = \sqrt{\frac{I_1 \cdot L_1}{4 \cdot \pi \cdot H_1} \cdot \sin \theta_1} \quad \text{или} \quad r = \sqrt{\frac{I_2 \cdot L_2}{4 \cdot \pi \cdot H_2} \cdot \sin \theta_2} \quad (5)$$

Таблица 2

Зависимость значений углов α и β от знаков H_{X1} , H_{Y1} , H_{Z1} , H_{X2} , H_{Y2} , H_{Z2}

α (точное)	H_{X2}	H_{Y2}	β (точное)	H_{Z1}	H_{Y1}
α	-	+	β	+	-
$180^\circ - \alpha$	-	-	$180^\circ - \beta$	-	-
$180^\circ + \alpha$	+	-	$180^\circ + \beta$	-	+
$360^\circ - \alpha$	+	+	$360^\circ - \beta$	+	+

4. Через r и θ_1 (θ_2), α , β определяем координаты измерителя X_i , Y_i , Z_i :

$$X_i = r \cdot \cos \theta_1; \quad Z_i = r \cdot \cos \theta_2; \quad Y_i = X_i \cdot \operatorname{tg} \alpha = Z_i / \operatorname{tg} \beta \quad (6)$$

5. Координаты излучателя (ЛА₁) X_c , Y_c , Z_c определяются путём инвертирования X_i , Y_i , Z_i :

$$X_c = -X_i; \quad Y_c = -Y_i; \quad Z_c = -Z_i \quad (7)$$

Для решения задачи определения координат и углового положения ЛА₁ при произвольном угловом положении ЛА₁ и ЛА₂ было определено два подхода. Первый подход заключается в составлении математической модели (в виде системы уравнений) определяющей связь H_{X1} , H_{Y1} , H_{Z1} , H_{X2} , H_{Y2} , H_{Z2} и углов α , β , γ , ν , ϕ , с последующим её решением. Второй подход состоит из нескольких этапов: определение r и углов α , β ; определение углов Q и KU ; определение углов γ , ν , ϕ ЛА₁. Остановимся на подробном рассмотрении этих подходов.

1. Первый подход.

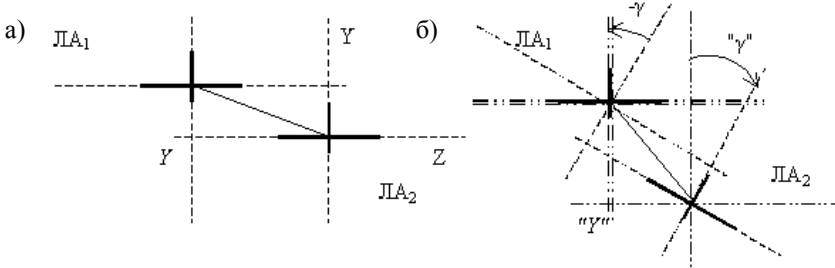
1. Определяем абсолютные значения H_1 и H_2 по соотношениям (2).

2. Изменение углового положения ЛА₂ не приводит к изменению \bar{H}_1 и \bar{H}_2 , а изменяются только их составляющие. Для учёта собственного вращения, измеренные H_{X1} , H_{Y1} , H_{Z1} , H_{X2} , H_{Y2} , H_{Z2} пересчитываем из ССК ЛА₂ в НСК по известным значениям собственного крена и тангажа (в соответствии с табл. 1) и получим $-H_{X10}$, H_{Y10} , H_{Z10} , H_{X20} , H_{Y20} , H_{Z20} . Значение собственного ϕ принимаем равным нулю, так как проекция оси X ССК на горизонтальную плоскость НСК совпадает с осью X НСК.

3. Составление математической модели.

При изменении углового положения излучателя (ЛА₁) в точке расположения измерителя происходит изменение величины и направления векторов \bar{H}_1 и \bar{H}_2 , составляющие этих векторов в НСК и являются исходными данными. Если взаимное расположение ЛА₁ и ЛА₂ рассматривать не в НСК ЛА₂ а в ССК ЛА₁, то получим, что ЛА₂ "мнимо развёрнулся" на те же углы, только с противоположными знаками, и "мнимо переместился" в ССК ЛА₁

(рис. 4). Если развернуть ЛА₂ (измеритель) на углы разворота ЛА₁, то получим "стационарную постановку решаемой задачи", в которой $\mathbf{H}_{X1} = \mathbf{0}$,



$\mathbf{H}_{Z2} = \mathbf{0}$, а другие составляющие определяются через углы α, β .
Оси НСК Оси ССК

Рис. 4. Схема "мнимого разворота и перемещения" ЛА₂ в ССК ЛА₁:
а – до разворота ЛА₁, б – после разворота ЛА₁

Таким образом, $\bar{\mathbf{H}}_1$ и $\bar{\mathbf{H}}_2$ можно представить с одной стороны, через $\mathbf{H}_{X10}, \mathbf{H}_{Y10}, \mathbf{H}_{Z10}, \mathbf{H}_{X20}, \mathbf{H}_{Y20}, \mathbf{H}_{Z20}$ в НСК, с другой стороны, через составляющие в ССК ЛА₁ и углы α, β . Составим уравнения, описывающие связь составляющих $\bar{\mathbf{H}}_1$ и $\bar{\mathbf{H}}_2$ и углов $\alpha, \beta, \gamma, \nu, \phi$, используя табл. 1. Составляющие $\bar{\mathbf{H}}_1$ и $\bar{\mathbf{H}}_2$ в ССК ЛА₁ выразим ~~через их абсолютные~~ абсолютные величины и углы α, β :

$$\begin{aligned}
 \text{а) } \mathbf{H}_{X10} &= -\mathbf{H}_1 \cdot \sin \beta \cdot (-\sin \nu \cdot \cos \phi \cdot \cos \gamma + \sin \phi \cdot \sin \gamma) + \\
 &\quad + \mathbf{H}_1 \cdot \cos \beta \cdot (\sin \nu \cdot \cos \phi \cdot \sin \gamma + \sin \phi \cdot \cos \gamma); \\
 \text{б) } \mathbf{H}_{Y10} &= -\mathbf{H}_1 \cdot \sin \beta \cdot \cos \nu \cdot \cos \gamma - \mathbf{H}_1 \cdot \cos \beta \cdot \cos \nu \cdot \sin \gamma; \\
 \text{в) } \mathbf{H}_{Z10} &= -\mathbf{H}_1 \cdot \sin \beta \cdot (\cos \phi \cdot \sin \gamma + \sin \nu \cdot \sin \phi \cdot \cos \gamma) + \\
 &\quad + \mathbf{H}_1 \cdot \cos \beta \cdot (\cos \phi \cdot \cos \gamma - \sin \nu \cdot \sin \phi \cdot \sin \gamma); \\
 \text{г) } \mathbf{H}_{X20} &= -\mathbf{H}_2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \phi \cdot \cos \nu + \mathbf{H}_2 \cdot \cos \alpha \cdot (-\sin \nu \cdot \cos \phi \cdot \cos \gamma + \\
 &\quad + \sin \phi \cdot \sin \gamma); \\
 \text{д) } \mathbf{H}_{Y20} &= -\mathbf{H}_2 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \nu + \mathbf{H}_2 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \nu \cdot \cos \gamma; \\
 \text{е) } \mathbf{H}_{Z20} &= \mathbf{H}_2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \nu \cdot \sin \phi + \mathbf{H}_2 \cdot \cos \alpha \cdot (\cos \phi \cdot \sin \gamma + \sin \nu \cdot \sin \phi \cdot \cos
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Полученная система уравнений описывает связь измеренных параметров МП ЛП₁ и ЛП₂ (в НСК) и углов, определяющих угловое (γ, ν, ϕ) и взаимное (α, β) расположения ЛА₁ и ЛА₂. Несмотря на избыток уравнений (6 уравнений и 5 неизвестных) аналитически её решить достаточно сложно, поэтому предложено углы α, β определить из других соотношений.

4. Определение углов α, β .

Расстояние r можно выразить как через \mathbf{H}_1 , так и через \mathbf{H}_2 (5). Приравняв правые части этих соотношений и получим

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}. \quad (9)$$

Преобразуем выражение (9) с помощью выражений (3) и (4), получим

$$H_1^2 / H_2^2 = 1 + \left(\frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\cos \beta} \right)^2 \bigg/ 1 + \left(\frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{\sin \alpha} \right)^2. \quad (10)$$

В уравнении (10) присутствуют два угла, чтобы их найти, необходимо составить второе уравнение, содержащее эти же углы.

Векторы \bar{H}_1 и \bar{H}_2 образуют между собой угол (ψ), который определяется через их скалярное произведение. Значение этого угла можно определить, с одной стороны, через составляющие этих векторов (в НСК), с другой стороны, через их составляющие в ССК ЛА₁, выраженные с помощью углов α , β и абсолютных значений H_1 , H_2 , а так как H_{x1} и H_{z2} в ССК равны нулю, то получим соотношение

$$\cos \psi = \frac{-H_1 \cdot \sin \beta \cdot H_2 \cdot \cos \alpha}{H_1 \cdot H_2}. \quad (11)$$

Составив систему уравнений из (10) и (11). После преобразований получаем:

$$\begin{aligned} H_1^2 / H_2^2 &= \sin^2 \alpha / (1 - \sin^2 \beta); \\ \cos^2 \psi &= \sin^2 \beta \cdot (1 - \sin^2 \alpha). \end{aligned} \quad (12)$$

Решая систему уравнений (12), определяем α , β в интервале $0 \div 90^\circ$. Точные значения этих углов определяются по табл. 2. Полученные углы определяют относительное положение ЛА₂ в ССК ЛА₁. Чтобы перейти к НСК, необходимо решить систему уравнений (8) с целью определения углов γ , ν , ϕ , а затем пересчитать координаты ЛА₂ из ССК в НСК в соответствии с табл. 1. Особенность такого подхода состоит в определении сначала углового положения ЛА₁, а затем его координат.

II. Второй подход решения поставленной задачи.

Определение углов α , β основано на их зависимости от угла ψ , который определялся через скалярное произведение векторов \bar{H}_1 и \bar{H}_2 . Дополнительно было проведено исследование векторного произведения этих векторов. Известно, что результатом векторного произведения \bar{H}_1 и \bar{H}_2 является третий вектор \bar{Hr} , перпендикулярный плоскости, в которой они лежат. В результате выявлено, что направление \bar{Hr} совпадает с направлением на ЛА₁ в НСК, но возможна неоднозначность на 180° . При этом необходимо отметить, что изменение углового положения ЛА₁ не приводит к изменению направления \bar{Hr} в НСК. Таким образом, координаты ЛА₁ могут быть определены без информации о его угловом положении. Останемся подробнее на порядке определения координат.

- 1) По H_{x10} , H_{z10} , H_{x20} , H_{y20} , H_{z20} определяем составляющие \bar{Hr}
 $H_{rx} = H_{y20} \cdot H_{z10} - H_{z20} \cdot H_{y10}$;

$$\begin{aligned} \mathbf{Hr}_Y &= \mathbf{H}_{Z20} \cdot \mathbf{H}_{X10} - \mathbf{H}_{X20} \cdot \mathbf{H}_{Z10}; \\ \mathbf{Hr}_Z &= \mathbf{H}_{X20} \cdot \mathbf{H}_{Y10} - \mathbf{H}_{Y20} \cdot \mathbf{H}_{X10}. \end{aligned} \quad (13)$$

2) Определяем абсолютное значение $\overline{\mathbf{Hr}}$.

3) Из системы уравнений (12) находим α , β для последующего определения \mathbf{r} по соотношениям (3, 4, 5).

4) Для пересчёта \mathbf{Hr}_X , \mathbf{Hr}_Y , \mathbf{Hr}_Z в X , Y , Z вводим коэффициент пропорциональности \mathbf{k} :

$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{r}}{\overline{\mathbf{Hr}}} \quad (14)$$

и определяем:

$$\mathbf{X} = \mathbf{Hr}_X \cdot \mathbf{k}; \quad \mathbf{Y} = \mathbf{Hr}_Y \cdot \mathbf{k}; \quad \mathbf{Z} = \mathbf{Hr}_Z \cdot \mathbf{k}. \quad (15)$$

5) Уточняем неоднозначность определения координат.

В горизонтальном полёте оси ССК ЛА₁ и НСК совпадают, откуда следует, что знаки координат определённых соотношением (15) должны быть такие же, как и знаки координат определённых соотношениями (7). Для этого достаточно определить наибольшую по модулю координату из (15), допустим это \mathbf{X} , и сравнить её с такой же $-\mathbf{X}_c$ из (7). Если их знаки противоположны, то координаты \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{Z} из (15) необходимо инвертировать. Такой подход справедлив так же для γ , ν , $\phi < |\pm 45^\circ|$. Отклонениям на углы больше $|\pm 45^\circ|$ предшествуют углы меньше $|\pm 45^\circ|$, в этом случае неоднозначность определяется путём слежения за положением ЛА₁ и исключения явно неверного направления на него. Это обусловлено тем, что относительное положение ЛА не может мгновенно измениться на противоположное, т. е. ЛА₁, находясь сзади ЛА₂, не может мгновенно оказаться впереди него.

6) Положение ЛА₁ в НСК определяется также полярными координатами – \mathbf{r} , \mathbf{Q} , \mathbf{KY} . Расстояние определено в подпункте 3), а \mathbf{Q} , \mathbf{KY} , после уточнения неоднозначности, определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{KY} &= \arccos \frac{\mathbf{Hr}_x}{\sqrt{\mathbf{Hr}_x^2 + \mathbf{Hr}_z^2}} \quad \text{или} \quad \mathbf{KY} = \arcsin \frac{\mathbf{Hr}_z}{\sqrt{\mathbf{Hr}_x^2 + \mathbf{Hr}_z^2}}; \\ \mathbf{Q} &= \arctg \frac{\mathbf{Hr}_y}{\sqrt{\mathbf{Hr}_x^2 + \mathbf{Hr}_z^2}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Закключаем, что предложенный второй подход позволяет на первом этапе вычислений определять направление на ЛА₁, затем расстояние и прямоугольные координаты.

Рассмотрим теперь определение углового положения ЛА₁.

1) Решаем систему из уравнений б) и д) из системы уравнений (8) с целью определения тангажа ν . В результате получаем 4-е значения ν .

Наличие неоднозначности определения как ν , так и γ , ϕ затруднений не представляет. Это утверждение основано на том, что соотношения табл. 1 однозначно определяют связь координат ССК, НСК и углов ν , γ , ϕ , т. е. существует только одна тройка значений ν , γ , ϕ , которые определяют переход

от координат в ССК к НСК и наоборот.

Для определения γ , ϕ используем координаты ЛА₂ в НСК (X_{ig} , Y_{ig} , Z_{ig}) и ССК (X_i , Y_i , Z_i) ЛА1 и табл. 1.

X_{ig} , Y_{ig} , Z_{ig} – определяем путём инвертирования X , Y , Z ;

X_i , Y_i , Z_i – определяем по соотношениям (6).

Крен вычисляем из уравнения

$$Y_{ig} = X_i \cdot \sin v + Y_i \cdot \cos v \cdot \cos \gamma - Z_i \cdot \cos v \cdot \sin \gamma, \quad (17)$$

а тангаж вычисляем из уравнения

$$X_i = X_{ig} \cdot \cos \phi \cdot \cos v + Y_{ig} \cdot \sin v - Z_{ig} \cdot \cos v \cdot \sin \phi. \quad (18)$$

В результате получаем четыре пары значений γ , ϕ для каждого v из которых необходимо найти правильные (всего 16 вариантов). Выбор верной тройки значений определяется следующим образом.

1) Записываем уравнения, определяющие X_{ig} , Y_{ig} , Z_{ig} по известным X_i , Y_i , Z_i и v , γ , ϕ . Приравняем уравнения к нулю, переместив все слагаемые по одну сторону от знака равенства, например,

$$X_i \cdot \sin v + Y_i \cdot \cos v \cdot \cos \gamma - Z_i \cdot \cos v \cdot \sin \gamma - Y_{ig} = 0. \quad (19)$$

2) Подставляем по очереди варианты значений γ , ϕ , v . Та тройка углов γ , ϕ , v , которая даст во всех уравнениях нули, и будет верной. Это правило можно назвать "правилом трёх нулей".

Таким образом оба предложенных варианта алгоритма позволяют определять координаты и угловое положения ЛА₁.

Отметим, что полученные координаты определяют взаимное положение центров измерителя и излучателя. При размещении предлагаемой МСКОП на объектах, в частности ЛА, задача состоит в контроле расстояния до соседнего ЛА (R), а также дистанции (D), бокового интервала (I_B), превышения (принижения) (dH). Для определения этих параметров необходимо учитывать геометрические размеры обоих ЛА, путём ввода поправок Δx_1 , Δy_1 , Δz_1 , Δr_1 , Δx_2 , Δy_2 , Δz_2 , Δr_2 , которые зависят от места расположения излучателя, измерителя на ЛА и их взаимного расположения:

$$\begin{aligned} D &= X - (\Delta x_1 + \Delta x_2); & I_B &= Z - (\Delta z_1 + \Delta z_2); \\ dH &= Y - (\Delta y_1 + \Delta y_2); & R &= r - (\Delta r_1 + \Delta r_2). \end{aligned} \quad (20)$$

Определим поправки для условий (20):

- координаты ЛА₁ известны;
- центры излучателя и измерителя совмещены с геометрическими центрами ЛА;
- центр масс и геометрический центр ЛА совпадают;
- пространство, которое занимает ЛА₁, ограничивается вертикальным цилиндром в НСК высотой h_1 , с радиусом r_{L1} , а пространство, которое занимает ЛА₂, ограничено соответственно вертикальным цилиндром в НСК высотой h_2 , r_{L2} . Параметры h_1 , r_{L1} , h_2 , r_{L2} зависят от размеров ЛА и их углового положения в НСК.

Определим угол $\chi_i = \arctg \frac{h_i}{2 \cdot r_{Li}}$, где i - 1 или 2 (для ЛА1, ЛА2).

Сравниваем Q и χ_i , если $Q \leq \chi_i$ тогда $\Delta r_i = r / \cos Q$, если $Q > \chi_i$, тогда:
 $\Delta r_i = h_i / 2 \cdot \sin Q$; $\Delta x_1 = \Delta z_1 = r_{L1}$; $\Delta y_1 = 0,5 \cdot h_1$; $\Delta x_2 = \Delta z_2 = r_{L2}$; $\Delta y_2 = 0,5 \cdot h_2$.

Направление на ЛА₁ (Q и KY) уточняется в зависимости от выбранных точек наблюдения и контроля.

Таким образом, в данной работе предложена магнитометрическая система контроля относительного положения ЛА, обоснована конструкция её излучателя, принцип его работы. Разработаны:

- 1) математическая модель вычислительной части системы;
- 2) алгоритмы определения координат и углового положения контролируемого ЛА:
 - при начальном определении углов ν , γ , ϕ , а затем координат X , Y , Z ;
 - при начальном определении X , Y , Z , а затем углов ν , γ , ϕ ;
- 3) предложен порядок уточнения координат с учётом геометрических размеров ЛА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бычков С.И., Пахолков Г.А., Яковлев В.Н. Радиотехнические системы предупреждения столкновений самолётов. – М.: Сов. радио, 1977. – 272 с.
2. Тарасов В.Г. Межсамолётная навигация. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.
3. Яроцкий В.А. Методы обнаружения и определения местоположения объектов по их постоянному магнитному полю // Зарубежная радиоэлектроника. – 1984. – №3. – С. 45 - 56.
4. А.с. 1064251 СССР, МКИ G⁰¹ R33/02. Способ определения магнитного момента дипольного источника поля и координат точки приложения этого момента / Смирнов Б. М. - Опубл. 30.12.83, Бюл. №48.
5. Чёрный С.В., Афанасьев В.В. Про возможность построения магнитометрической системы межсамолётной навигации по магнитному полю летательного аппарата / Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2001. – Вып.26(3). – С. 22 - 26.
6. Микеладзе В.Г., Титов В.М. Основные геометрические и аэродинамические характеристики самолётов и ракет: Справочник. – М.: Машиностроение, 1982. – 149 с.
7. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. – М.: Сов. радио, 1971. – 664 с.
8. Мхитарян А.М., Лазнюк П.С., Максимов В.С. и др. Динамика полёта. – М.: Машиностроение, 1978. – 424 с.

Поступила 20.05.2002

АНДРЕЕВ Сергей Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедры Харьковского института ВВС. В 1986 году окончил Харьковское ВВАУРЭ. Область научных интересов – обработка информации, беспилотные летательные аппараты.

АФАНАСЬЕВ Владимир Владимирович, адъюнкт Харьковского института ВВС. В

1995 году окончил Луганское ВВАУШ. Область научных интересов – навигационные системы летательных аппаратов.
