

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ГРУППЕ ПРИ ИХ МАНЕВРИРОВАНИИ

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

*В статье исследовано влияние маневрирования самолётов при выполнении группового полёта на работу магнитометрической системы определения их относительного положения в группе на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований.*

Основой безопасного выполнения групповых полётов летательных аппаратов (ЛА) является наличие информации об их взаимном расположении. Данная информация может быть получена с помощью специальных технических систем, решающих задачи межсамолётной навигации, либо визуально. Одна из таких систем была предложена в работе [1] – магнитометрическая система определения относительного положения (МСООП). Принцип её работы основан на определении относительных координат и углового положения контролируемого ЛА группы на основе измерения напряжённости  $H_1$ ,  $H_2$  низкочастотного переменного магнитного поля (МП) излучателя, в виде двух ортогональных линейных проводников с током  $I_1$ ,  $I_2$  и длиной  $L_1$ ,  $L_2$  установленного на нём. Модель излучателя описывается системой уравнений:

$$H_1 = \frac{I_1 \cdot L_1}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \sin \theta_1 ; \quad (1)$$

$$H_2 = \frac{I_2 \cdot L_2}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \sin \theta_2 ,$$

где  $r$  – расстояние между центром излучателя и измерителем МП;  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  – углы между осями линейных элементов излучателя (по направлению движения тока и направлением на ЛА).

Алгоритмы этой системы разрабатывались при условии, что в момент измерения параметров МП излучателя ЛА были неподвижны. Это условие обусловлено дискретным характером обработки измеренных параметров, так как линейные элементы излучателя создают МП различной частоты по-переменно.

Процесс выполнения группового полёта можно разделить на два этапа:  
– маневрирование ЛА группы для решения задач построения и роспус-

ка группы, выполнения полёта по заданному маршруту, занятия заданного места в группе – именно из-за ошибок, допущенных при маневрировании ЛА, происходят их столкновения;

– установившийся полёт группы, при котором относительное положение ЛА группы не изменяется и безопасность от столкновения обеспечивается их расположением на безопасных дистанциях, интервалах, превышениях (принижениях).

Разработанные алгоритмы справедливы для второго этапа. В данной работе проведено исследование работы МСОП при использовании её в условиях первого этапа. Исследовалось влияние маневрирования ЛА на алгоритмическую и техническую стороны системы.

Исследование алгоритмической стороны системы заключается в определении особенностей вычисления координат и углового положения соседних ЛА при их маневрировании.

Исследование технической стороны системы заключается в определении влияния динамики ЛА группы на работу системы.

Рассмотрим подробнее эти моменты.

**Исследование алгоритмической стороны системы.** Особой зоной системы является плоскость расположения излучателя контролируемого ЛА (ЛА<sub>1</sub>). Она характеризуется коллинеарностью векторов напряжённости МП излучателя, а также нулевой величиной одного из векторов при расположении ЛА с измерителем (ЛА<sub>2</sub>) на оси одного из линейных элементов излучателя (рис. 1).

Для учёта этого момента при определении относительного положения ЛА в группе необходимо производить проверку, которая состоит из нескольких этапов.

1. По измеренным составляющим напряжённости МП излучателя  $H_{x1}$ ,  $H_{y1}$ ,  $H_{z1}$ ,  $H_{x2}$ ,  $H_{y2}$ ,  $H_{z2}$  определяются абсолютные величины  $H_1$  и  $H_2$ . Определяем возможность расположения ЛА<sub>2</sub> на одной из осей линейных элементов излучателя путём сравнения  $H_1$ ,  $H_2$  с нулём. Если один из них равен нулю, тогда дальнейшая работа вычислительной части системы происходит по алгоритму "А", который рассмотрим ниже.

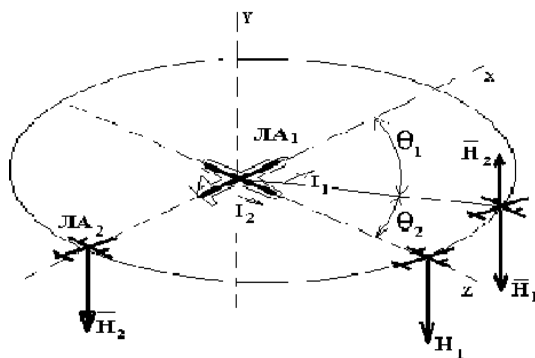


Рис. 1. Направление векторов напряжённости МП излучателя МСОП в зависимости от взаимного расположения ЛА<sub>1</sub> и ЛА<sub>2</sub>

2. Если  $H_1$ ,  $H_2$  не равны нулю, тогда производится определение возможности относительного положения ЛА<sub>2</sub> в плоскости излучателя ЛА<sub>1</sub> путём

определения угла  $\psi$  между векторами  $\bar{\mathbf{H}}_1$  и  $\bar{\mathbf{H}}_2$ . Если  $\psi = 0^\circ$  или  $180^\circ$ , то ЛА<sub>2</sub> расположен в плоскости излучателя ЛА<sub>1</sub> и дальнейшие вычисления осуществляются по алгоритму "В".

3. Если угол  $\psi$  не равен  $0^\circ$  или  $180^\circ$ , тогда дальнейшие вычисления производятся в соответствии с уже разработанными алгоритмами.

"А" – ЛА<sub>2</sub> расположен на одной из осей линейных элементов излучателя ЛА<sub>1</sub>. Такое положение характеризуется нулевым  $\mathbf{H}_1$  и максимальным значением  $\mathbf{H}_2$ , если ЛА<sub>2</sub> расположен на оси  $\mathbf{X}$  излучателя ЛА<sub>1</sub> или наоборот. В этом случае расстояние до ЛА<sub>1</sub> определяется соотношением

$$\mathbf{r} = \sqrt{\frac{\mathbf{I}_2 \cdot \mathbf{L}_2}{4 \cdot \pi \cdot \mathbf{H}_2}}, \text{ так как } \theta = 90^\circ. \quad (2)$$

Сторона расположения ЛА<sub>2</sub> в связанной системе координат (ССК) ЛА<sub>1</sub> [2] определяется через знаки составляющих  $\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$  (табл. 1).

Таблица 1

Положение измерителя относительно излучателя  
в зависимости от знака составляющих МП

$\mathbf{H}_1$			$\mathbf{H}_2$		
составляющая	знак	положение	составляющая	знак	положение
$\mathbf{H}_{y1}$	+	слева	$\mathbf{H}_{y2}$	+	вперед
	-	справа		-	сзади
$\mathbf{H}_{z1}$	+	сверху	$\mathbf{H}_{x2}$	+	снизу
	-	снизу		-	сверху

Задача определения координат и углового положения ЛА<sub>1</sub> для этого случая относится к решению задач ориентации по одному вектору по известным его составляющим в ССК и нормальной системе координат (НСК). В НСК ЛА<sub>2</sub> имеем измеренные составляющие  $\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$ , полученные с учётом собственного углового положения (крена –  $\gamma$  и тангажа –  $\nu$ ). Если ЛА<sub>2</sub> "развернуть" на те же углы, что и ЛА<sub>1</sub>, то получим составляющие  $\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$  в ССК ЛА<sub>2</sub> –  $\mathbf{H}_{x2c}$ ,  $\mathbf{H}_{y2c}$ ,  $\mathbf{H}_{z2c}$ , где  $\mathbf{H}_{x2c}$  и  $\mathbf{H}_{z2c} = 0$ . В результате связь составляющих  $\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$  в ССК и НСК и углового положения ЛА<sub>1</sub> можно записать через направляющие косинусы [3] в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{x2} &= -\mathbf{H}_{y2c} \cdot \sin \nu \cdot \cos \phi \cdot \cos \gamma + \mathbf{H}_{y2c} \cdot \sin \phi \cdot \sin \gamma; \\ \mathbf{H}_{y2} &= \mathbf{H}_{y2c} \cdot \cos \nu \cdot \cos \gamma; \\ \mathbf{H}_{z2} &= \mathbf{H}_{y2c} \cdot \cos \phi \cdot \sin \gamma + \mathbf{H}_{y2c} \cdot \sin \nu \cdot \sin \phi \cdot \cos \gamma. \end{aligned} \quad (3)$$

Такая задача аналитического решения не имеет, но наличие информации о знаках составляющих  $\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$  даёт однозначное определение сектора расположения ЛА<sub>1</sub> по высоте и по положению – впереди или сзади при  $\mathbf{H}_1 = \mathbf{0}$ , по стороне – слева или справа при  $\mathbf{H}_2 = \mathbf{0}$ . При этом информация о расстоянии между ЛА не исчезает.

Попадание ЛА<sub>2</sub> в рассмотренную "нулевую" зону можно считать устойчивым, так как в горизонтальном полёте это исключается разнесением ЛА по дистанции, интервалу и высоте, а при маневрировании причиной такого положения ЛА<sub>2</sub> в ССК ЛА<sub>1</sub> является изменение его углового положения, которое также приводит к изменению относительных координат ЛА и, в результате, выходу ЛА<sub>2</sub> из "нулевой" зоны ЛА<sub>1</sub>. Для исключения временной потери информации об относительном положении ЛА<sub>1</sub> необходимо производить вычисления совместно со счислением координат ЛА<sub>1</sub>. Также данный момент можно устранить использованием в измерительной части МСООП нескольких (двух-трёх) разнесённых измерителей МП.

"В" – ЛА<sub>2</sub> расположен в плоскости излучателя ЛА<sub>1</sub>. Такое положение характеризуется коллинеарностью векторов  $\bar{\mathbf{H}}_1$  и  $\bar{\mathbf{H}}_2$ . Попадание в эту плоскость возможно при полёте ЛА на одной высоте – такое положение можно рассматривать как устойчивое. Также это возможно при изменении углового положения ЛА<sub>1</sub> и при изменении относительного положения ЛА. В этом случае это положение можно рассматривать как неустойчивое, так как изменение углового и относительного положения характеризуется временным попаданием ЛА<sub>2</sub> в плоскость излучателя ЛА<sub>1</sub>.

Выполнение полёта в горизонтальной плоскости, который приводит к устойчивому положению ЛА<sub>2</sub> в плоскости излучателя ЛА<sub>1</sub> и характеризуется полётом ЛА на одной высоте, является нарушением порядка выполнения группового полёта. Исключение такого взаимного положения ЛА обеспечивается соблюдением правил выполнения таких полётов – разнесение ЛА по высоте. Рассмотрим ситуацию, когда полёт ЛА выполняется с нарушением – на одной высоте.

Признаки:  $\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$  не равны нулю,  $\mathbf{H}_{x1}$ ,  $\mathbf{H}_{z1}$ ,  $\mathbf{H}_{x2}$ ,  $\mathbf{H}_{z2}$  – равны нулю, угол  $\psi = 0^\circ$  или  $180^\circ$ . Величины  $\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$  могут изменяться и не изменяться.

$\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$  не изменяются, если относительные координаты ЛА<sub>2</sub> в ССК ЛА<sub>1</sub> остаются постоянными. При изменении относительных координат ЛА<sub>2</sub> в ССК ЛА<sub>1</sub> происходит изменение величин  $\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$ . Так как расстояние между ЛА можно определить через  $\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$ , то приравняв уравнения системы (1) и выразив значение синусов углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$  через прямоугольные координаты ЛА<sub>2</sub> в ССК ЛА<sub>1</sub>, получим

$$\frac{\mathbf{H}_1}{\mathbf{H}_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}, \quad \text{т.е.} \quad \frac{\mathbf{H}_1}{\mathbf{H}_2} = \text{tg} \theta_1. \quad (4)$$

Через вычисленное расстояние  $\mathbf{r}$  и углы  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  определяются координаты ЛА<sub>2</sub> в ССК ЛА<sub>1</sub>.

В результате исследования относительного расположения ЛА, при котором ЛА<sub>2</sub> находится в плоскости излучателя ЛА<sub>1</sub>, сделаем следующие выводы:

- такое взаимное расположение ЛА приводит к невозможности однозначно определить координаты и угловое положение ЛА<sub>1</sub> в НСК ЛА<sub>2</sub>;
- координаты ЛА<sub>2</sub> в ССК ЛА<sub>1</sub> определяются однозначно, что предот-

вращает полную потерю информации об относительном расположении ЛА в группе;

– расстояние между ЛА определяется независимо от взаимного расположения ЛА в группе;

– исключение попадания ЛА<sub>2</sub> в плоскость излучателя ЛА<sub>1</sub> обеспечивается выполнением полёта на различной высоте, а также маневрированием ЛА<sub>2</sub>, с целью выхода из этой зоны.

Таким образом, заключаем, что попадание ЛА<sub>2</sub> в плоскость расположения излучателя или осей его элементов приводит только к частичной потере информации об относительном расположении ЛА в группе. Наличие оставшейся информации обеспечивает однозначное определение взаимного расположения ЛА в группе и предупреждение их опасного сближения и столкновения. Для исключения потери некоторых данных о взаимном положении ЛА необходимо осуществлять постоянное счисление координат ЛА<sub>1</sub>, обмениваться информацией об угловом положении через канал связи между ЛА, измерительную часть системы составлять из 2 – 3 измерителей, полёт в группе осуществлять на установленных дистанциях, интервалах, превышениях (принижениях).

**Исследование технической стороны системы.** При движении ЛА в воздушном пространстве возникают квазистационарные МП; их спектр содержит дискретную и сплошную составляющие. В этом спектральном "портрете" присутствуют гармоники частоты МП излучателей системы, а также гармоники частоты собственного углового вращения ЛА и его относительного перемещения относительно измерителя МП. Частоты излучателей МП, расположенных на ЛА группы, известны и могут быть выделены из частотного спектра измеренного МП. Гармоники с частотой вращения и относительного перемещения могут совпадать с гармониками частоты работы излучателей МП, тем самым внося ошибку в выходные данные МСООП. Для исключения этой помехи необходимо ограничивать нижнюю границу частотного диапазона работы излучателя МП, которая определяется максимальными частотами вращения и относительного перемещения ЛА. В качестве примера было проведено исследование спектрального "портрета" динамики реального группового полёта пары самолётов конструкторского бюро Сухого по данным записей средств объективного контроля. Проводился анализ данных ведущего и ведомого самолётов на участках горизонтального полёта и при маневрировании. Исследовалось также одновременное колебание ЛА, которое приводит к увеличению результирующей частоты. Для исследования данного вопроса определялись спектральная плотность и взаимная спектральная плотность мощности (ВСПМ) параметров движения ЛА. Проведём анализ спектра по результатам вычисления ВСПМ крена ведущего и ведомого ЛА. Данные результаты приведены на рис. 2.

В результате анализа приведенных результатов исследования заключаем, что максимальная частота взаимных колебаний ЛА по крену составляет  $f_H = 0.5$  Гц. Это значение должно быть взято за основу при определении

нижней границы частотного диапазона работы излучателя. Для исключения этой помехи, данную частоту можно увеличить в 10 раз – нижняя граница частотного диапазона будет ограничиваться частотой 5 Гц.

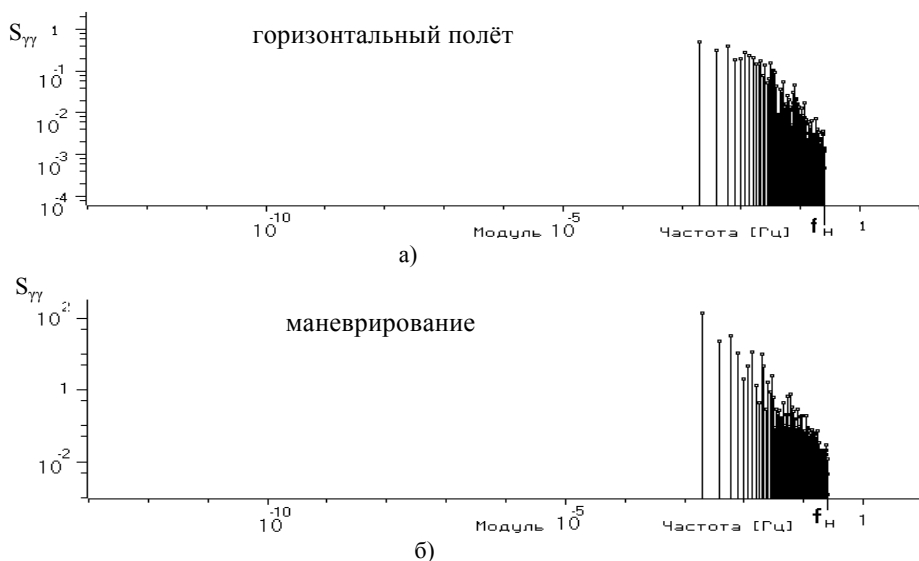


Рис. 2. График ВСПМ крена ведущего и ведомого ЛА

Цель проведённого исследования заключалась в обосновании выбора минимальной частоты работы излучателя МСООП. При разработке системы для конкретного подвижного объекта, необходимо учитывать его динамические характеристики с учётом условий эксплуатации.

Если задача определения относительного положения объекта предполагает изменение его координат, т.е. его перемещение, в этом случае необходимо учитывать скорость такого перемещения. Перемещение объекта относительно измерителя или наоборот, измерителя относительно объекта, со скоростью  $V$  и при частоте ЭМП излучателя  $f$  приводит к дискретности определения координат. Это обусловлено тем, что линейные элементы излучателя МСКОП запитываются током попеременно. Поэтому существует время цикла  $T_{ц}$ , за которое приёмная часть системы измеряет напряжённость МП обоих элементов излучателя для определения координат объекта (время обработки данных вычислителем не учитывается).

Значение нижней границы диапазона частот излучателя МСКОП необходимо выбирать таким, чтобы дискретность определения координат, обусловленная частотой ЭМП системы, не превышала ошибку от влияния помехи (для заданной максимальной относительной скорости  $\Delta V$  перемещения объекта). Выполнение указанного условия можно обеспечить любым из

двух способов.

1. По заданной максимальной  $\Delta V$  и заданной точности счисления координат  $\Delta D$  определяется частота работы системы  $f$ .

2. По заданной частоте системы  $f$  и  $\Delta D$  определяется максимальная  $\Delta V$ . Относительная скорость  $\Delta V$ , частота  $f$  и дискретность  $\Delta D$  связаны соотношением

$$\Delta D = \frac{\Delta V}{f}.$$

Также частота МП излучателя связана с вопросами технической реализации системы, с характером распространения МП в пространстве.

Таким образом, выбор частотного диапазона работы излучателя необходимо выбирать с учётом динамических свойств ЛА (подвижного объекта), условиями его эксплуатации, а также совместно с решением вопросов технической реализации системы.

Результаты проведенных в работе исследований показывают, что МСООП можно рассматривать как систему для обеспечения безопасного выполнения групповых полётов ЛА. Она должна входить в состав пилотажно-навигационного комплекса ЛА. Определение параметров работы системы, в частности, частотного диапазона её излучателя, должно осуществляться с учётом динамических свойств ЛА (объектов), условий их применения, а также вопросов технической реализации системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В.В., Чёрный С.В. Разработка магнитометрической системы контроля относительного положения // 6-й Международный молодёжный форум «"Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке": Сб. научных трудов. Ч. 1. – Х.: ХНУРЭ. – 2001. – С. 42 - 43.
2. Микеладзе В.Г., Титов В.М. Основные геометрические и аэродинамические характеристики самолётов и ракет: Справочник. – М.: Машиностроение, 1982. – 149 с.
3. Мхитарян А.М., Лазнюк П.С., Максимов В.С. и др. Динамика полёта. – М.: Машиностроение, 1978. – 424 с.

Поступила 8.08.2002

**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.