

МАГНИТНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ В НАШЛЕМНЫХ СИСТЕМАХ

Магнитное позиционирование (МП) – новая тема для отечественного научного сообщества. МП подвижных объектов решает множество задач по нахождению линейного положения и ориентации различных подвижных объектов в заданной системе координат. В авиации МП может использоваться в нашлемных системах целеуказания [1–4, 6, 7], бортовых системах измерения массы и центровки самолетов [5], для детектирования опасного приближения летательного аппарата (ЛА) к линии электропередач [8, 9]. Однако зачастую даже специалисты, интересующиеся данной технологией, оперируют разрозненными, несистематизированными данными. Восполним этот пробел, описав основные мировые тенденции и результаты применения МП в авиационных системах целеуказания.

СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

С 70-х годов прошлого века МП применяется в зарубежных бортовых системах целеуказания, где генератор магнитного поля фиксируется в кабине, а подвижный приемник располагается на шлеме пилота [10–16]. Координаты шлема находят итерационным решением системы уравнений. Они соотносят аналитическую модель магнитного поля в зоне перемещения шлема и результаты магнитных измерений подвижными датчиками, находящимися в приемнике. Магнитные системы позиционирования (МСП) сложны и дороги. Вместе с тем система не требует прямой видимости между генератором и приемником. Она компактна и хорошо работает в свободном



М.Желамский

E-mail: zhelamsk@rambler.ru

от металла пространстве, позволяет достичь более точного позиционирования в широких диапазонах линейных и угловых перемещений подвижного объекта, чем любая другая система. Если в окружении имеется металл, проводят корректирующие процедуры, которые минимизируют погрешности позиционирования.

Исторически первые МСП использовали переменное магнитное поле, генерируемое на частотах до десятков килогерц. Они получили название АС-системы (АС – alternating current). Основным недостатком АС-систем – снижение точности позиционирования из-за сильного искажения рабочего поля полями вихревых токов, наводимых системой в интерьере кабины [10, 11]. Источниками погрешности служили как подвижный металл на шлеме, так и интерьер кабины, неподвижный относительно генератора поля.

Метод компенсации погрешностей, вносимых шлемом, предложен в работах [17, 18]. Для каждого элемента нашлемного металла в реальном времени рассчитывается поправочная величина, моделирующая его влияние на приемник. Рабочее поле находится путем вычитания суммы смоделированных поправок из реально измеряемой величины поля. Данная модель работает в неоднородном поле, во всем диапазоне положений и ориентаций шлема. Отметим, что влияние металла шлема на точность позиционирования существенно уменьшилось после перехода на нашлемные ЖК-дисплеи.

Для компенсации вихревых токов в интерьере кабины используют дополнительную поправку. Она берется из стационарной карты поля, которое предварительно измеряют в кабине во всем объеме перемещений шлема [14, 17, 19]. Первое магнитное поле картографирует производитель МСП, выявляя собственные свойства этой системы без воздействий со стороны кабины и шлема. Повторное магнитное картографирование для учета влияния интерьера проводят в кабине ЛА. Рабочую зону разделяют на дискретные ячейки (рис.1). Шаг ячеек по каждой оси составляет 30–40 мм, что при стандартном объеме рабочей зоны до 100 литров дает несколько тысяч измерений.

Практика картографирования влияния вихревых токов в кабинах летательных аппаратов [19] выявила ряд проблем:

- результаты картографирования индивидуальны для каждого летательного аппарата;
- при изменении интерьера кабины или перемещении источника поля необходимо проводить повторное картографирование;
- процедура картографирования интерьера кабины чрезвычайно трудоемка – нужны как минимум два квалифицированных специалиста в течение двух недель на один ЛА и до 250 кг специализированного оборудования.



Рис. 1. Разделение рабочей зоны на дискретные ячейки. СГФ – строительная горизонталь фюзеляжа

Трудности прямого картографирования влияния вихревых токов побудили разработчиков первых АС-систем позиционирования к поиску способов сокращения трудоемкости либо полного исключения этой процедуры. Было опробовано несколько таких методов.

В частности, в работе [19] описан метод картографирования переменного магнитного поля по границе объема. Он основан на решении трехмерного уравнения Лапласа, которое дает карту поля внутри объема рабочей зоны. Наиболее простой способ задания граничных условий при решении уравнения Лапласа – определение нормальной компоненты магнитного поля на границе объема. Именно данная компонента и измеряется при картографировании. Для этого в кабине ЛА однократно монтируется специальное устройство – имитатор граничной поверхности. Он представляет собой набор панелей, расположенных вокруг зоны перемещений шлема и «имитирующих» ее границу. На имитаторе установлено множество фиксированных однонаправленных датчиков, ориентированных перпендикулярно к граничной поверхности. Сбор данных проводится один раз после фиксации устройства в кабине.

Данный метод не нашел широкого применения в реальной авиационной практике по нескольким причинам:

- для небольших размеров зоны перемещения шлема число измерений по границе сокращается несущественно по сравнению с последовательными измерениями в каждой точке зоны;
- время измерений несколько сокращается, однако при этом существенно увеличивается длительность последующей обработки полученных данных;

- точность позиционирования множества картографирующих датчиков входит в результирующую точность картографирования в большей степени, чем для одиночного датчика в стандартных измерениях.

Еще один способ избежать прямого картографирования – использование в кабине дополнительного фиксированного датчика, так называемого датчика-свидетеля (ДС) [20]. Он расположен вблизи рабочего приемника – прямо над шлемом (рис.2). С помощью ДС учитывают разницу реального и идеального (без влияния интерьера) полей. В расчетную модель вводят виртуальный источник магнитного поля, параметры которого такие же, как у реального источника, а координаты могут изменяться. Путем варьирования координат добиваются такого расположения виртуального источника, при котором расчетное магнитное поле на ДС совпадает с идеальным. Считается, что в этом случае поле на приемнике тоже будет «правильным», поскольку он расположен вблизи ДС.

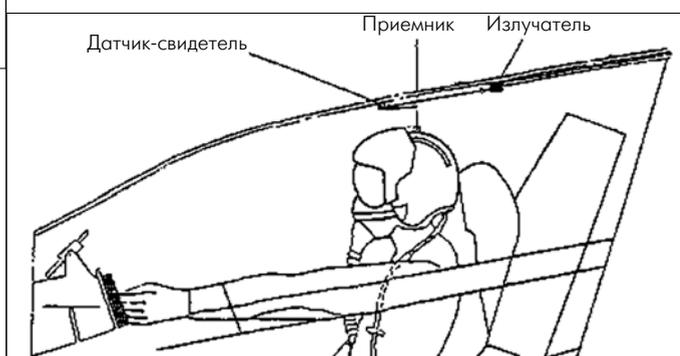


Рис.2. Датчик-свидетель

В работе [21] предложено устранять картографирование с помощью глубокой частотной модуляции генерируемого синусоидального магнитного поля. Магнитные поля вихревых токов вызывают перераспределение боковых полос в спектре измеряемого модулированного сигнала. Анализ этого спектра в реальном времени позволяет разделить прямой излучаемый сигнал и сигнал от вихревых токов. Восстановленный чистый излучаемый сигнал закладывают в математическую модель расчета координат шлема.

Еще один путь снижения влияния интерьера предлагается в работе [15]. Утверждается, что влияние одного и того же металлического объекта тем меньше, чем больше размеры источника магнитного поля. То есть если сделать большой излучатель, то влияние мелких металлических фрагментов существенно снизится.

Несмотря на все описанные попытки снизить влияние интерьера, АС-метод не нашел широкого применения в авиации [22]. Каждый летательный аппарат, оснащенный АС-системой, должен проходить периодическую процедуру картографирования. На некоторых вертолетах, с плотной компоновкой кабины, АС-системы неприменимы из-за сильного влияния металла, которое невозможно скомпенсировать предлагаемыми средствами.

ИМПУЛЬСНЫЕ МСП

Задача разработчиков МСП заключалась в следующем: нужно было, чтобы система работала без дорогостоящей процедуры калибровки кабины (это особенно важно для вертолетов). Первое техническое решение, реализующее новый метод МП, было опубликовано в октябре 1986 года [15, 16]. Изменения коснулись в основном режима работы системы, тогда как состав МСП и вычислительные процедуры остались прежними. В новом методе вместо синусоидального магнитного поля генерируется последовательность импульсов с крутыми фронтами и плоской вершиной. Метод стали называть DC (direct current).

Наличие плоской вершины у каждого импульса поля позволяет ждать затухания вихревых токов до начала измерений – в этом и есть основная идея нового метода. DC-метод дает возможность привязки МСП к борту летательного аппарата без картографирования кабины [22].

Вычислительный алгоритм DC-метода подразумевает, что магнитное поле Земли постоянно на всем цикле работы системы. Однако на движущихся объектах магнитное поле Земли быстро меняет ориентацию в системе координат летательного аппарата – оно непостоянно в период измерений. Для повышения точности компенсации поля Земли при высоких угловых скоростях производят экстраполяцию значений магнитного поля Земли, используя результаты его предыдущих измерений [16].

Чтобы правильно передавать форму импульсного магнитного поля, измерительный канал DC-системы должен иметь полосу пропускания от нуля до нескольких (>5) [23] частот следования импульсов, т.е. минимум до 1–2 кГц. В этом случае магнитные помехи с частотой бортовой сети питания 400 Гц попадают в полосу пропускания приемника и служат источниками дополнительной погрешности измерений. Для защиты от помех применяют синхронное детектирование. Измерения магнитного поля проводят дважды за период изменения напряжения питающей сети – сначала на положительной полуволне, а затем на отрицательной, ровно через полпериода. Помеха при этом остается той же по модулю, но меняет знак, а полезный сигнал одинаков в обоих измерениях. Если теперь взять полусумму этих двух измерений, то влияние помехи исчезает. Цифровая обработка сигналов [23] также значительно повышает помехозащищенность DC-метода.

Возникает еще один вопрос: не влияют ли на точность измерения рабочего магнитного поля возмущения, вносимые ферромагнитными элементами кабины? Для того чтобы разобраться с этим вопросом, сравним помехи, вносимые магнитными полями вихревых токов и ферромагнитными элементами.

Вихревые токи, наводимые в единичном электропроводящем элементе интерьера кабины, создают на приемнике

паразитное поле B_e , абсолютная величина которого оценивается выражением [16]:

$$B_e \sim K1 \cdot \text{SIZE1} / (D1^3 \cdot D2^3), \quad (1)$$

где:

$K1$ – коэффициент пропорциональности, учитывающий электропроводящие свойства элемента интерьера;

SIZE1 – проекция площади элемента интерьера, видимая с излучателя;

$D1$ – расстояние от элемента до генератора поля;

$D2$ – расстояние от элемента до приемника.

По аналогии с формулой (1) можно записать оценочное выражение для величины паразитного поля на приемнике B_f , создаваемого в DC-системе единичным ферромагнитным элементом интерьера кабины:

$$B_f \sim K2 \cdot \text{SIZE2} / (D1^3 \cdot D2^3), \quad (2)$$

где:

$K2$ – коэффициент пропорциональности, учитывающий ферромагнитные свойства элемента интерьера,

SIZE2 – проекция площади элемента интерьера, видимая с излучателя.

Из формул (1), (2) видно, что влияние на поле излучателя электропроводящих и ферромагнитных элементов интерьера, расположенных в одной точке рабочей зоны, определяется размерами этих элементов. Электропроводящий интерьер кабины представляет собой практически замкнутые контуры, охватывающие как генератор поля, так и подвижный приемник. Магнитные элементы имеют точечный характер. Разница эффективных размеров электропроводящих и ферромагнитных элементов интерьера достигает трех и более порядков. Следовательно, на практике не нужно учитывать влияние ферромагнитных элементов интерьера кабины – достаточно подавить воздействие вихревых токов.

Степень остаточного влияния ферромагнитных металлов хорошо демонстрирует система с постоянным магнитом в качестве источника поля [24]. В такой системе вихревых токов нет, а остается только влияние ферромагнитных элементов интерьера. Авторы утверждают, что если расстояние от ферромагнитного металла до постоянного магнита больше, чем удвоенное расстояние от магнита до приемника, то влиянием ферромагнитного металла можно пренебречь. Такое требование необходимо выполнить при компоновке системы на борту.

Интересно сравнить параметры зарубежных МСП, выпускаемых ведущими мировыми лидерами и основателями магнитного позиционирования – фирмами Ascension (DC) и Polhemus (AC) (табл.1 и 2).

**Таблица 1. Импульсные МСП, производимые компанией Ascension [22]**

Тип	Точность	Зона перемещений, мм	Частота, Гц
pciBIRD	± 1 мм, $\pm 0,15^\circ$	203–762	до 105
pcBIRD	$\pm 1,8$ мм, $\pm 0,5^\circ$	203–3050	до 144
miniBIRD	$\pm 1,8$ мм, $\pm 0,5^\circ$	203–762	до 120
microBIRD	$\pm 1,4$ мм, $\pm 0,5^\circ$	203–580	до 90
Flock of Birds	$\pm 1,8$ мм, $\pm 0,5^\circ$	203–3050	до 144
Neste of Birds	$\pm 1,8$ мм, $\pm 0,5^\circ$	203–3050	до 105
Motion Star	± 8 мм, $\pm 0,5^\circ$ до 1500 мм, ± 15 мм, $\pm 1^\circ$ до 3000 мм	203–3050	до 100

Таблица 2. МСП на переменном поле компании Polhemus [25]

Тип	Точность	Зона перемещений, мм	Частота, Гц
FASTRAK	$\pm 0,8$ мм, $\pm 0,15^\circ$	762	до 120
LIBERTY	$\pm 0,8$ мм, $\pm 0,15^\circ$	900	240
PATRIOT	$\pm 2,5$ мм, $\pm 0,75^\circ$	1067	60

Все МСП имеют следующие диапазоны углов Эйлера: азимут – $\pm 180^\circ$, угол места – $\pm 90^\circ$, крен – $\pm 180^\circ$. Зона перемещений для всех систем определяется длиной радиуса, проведенного из центра генератора поля в любом направлении. Частота обновления информации дается на один датчик, обслуживаемый одним вычислительным устройством.

Точность позиционирования для всех систем дается в ста-

тике, при постоянной ориентации, в чистом окружении. Для импульсных систем точность определена в диапазоне дальностей 203–762 мм (кроме Motion Star). Видно, что статическая точность позиционирования в свободном пространстве для большинства МСП не превышает $\pm 0,5^\circ$ при дальности в диапазоне 0,2–0,7 м.

Точность позиционирования на уровне $\pm 0,1^\circ$ (а именно такой

уровень требует современная авиация) не обеспечивается ни одной известной системой позиционирования, тем более в широком диапазоне углов ориентации. Для достижения требуемой точности позиционирования в разумном диапазоне углов с помощью DC-системы картографирование нужно проводить в полном объеме. Однако делать это следует не на борту, как в AC-методе для учета интерьера, а у производителя DC-системы – в чистом пространстве. Данная процедура является процессом индивидуальной калибровки, которая учитывает технологические неточности изготовления компонентов системы.

Авиационные модели импульсной системы позиционирования по лицензии Ascension используются в специальных проектах, например, компании BAЕ Systems Avionics (UK). В последнее десятилетие BAЕ разработала семейство наשלемых систем как для реактивной авиации, так и для вертолетов. Существующие программы оснащают данной системой вертолет UH-Tiger (Germany) и переоснащают вертолет AH-1Z (US Marine).

Сейчас в мире нет альтернатив магнитному позиционированию, пригодных для применения в авиации. Поэтому отказ от магнитного картографирования кабины в DC-системах – шаг, важность которого трудно переоценить.

ЛИТЕРАТУРА

- Годунов В.А., Степанов Д.В., Третьяков Д.А. и др. Современные наשלемые системы целеуказания и индикации. – Авиакосмическое приборостроение, 2003, №5.
- Годунов В.А., Желамский М.В., Степанов Д.В., Третьяков Д.А. Вопросы теории позиционирования подвижного объекта в магнитном поле. – Авиакосмическое приборостроение, 2003, №11.
- Годунов В.А., Рожков П.Б., Степанов Д.В. и др. Современные датчики физических величин для авионики. – Авиакосмическое приборостроение, 2004, №6.
- Желамский М.В. Увеличение чувствительности магнитных измерений в авионике. – Авиакосмическое приборостроение, 2005, №3.
- Годунов В.А., Желамский М.В., Степанов Д.В., Третьяков Д.А. Определение веса и положения центра тяжести летательного аппарата. – Мехатроника, 2004, №9.
- Желамский М.В. Полное позиционирование подвижных объектов при помощи одной измерительной системы. – Авиакосмическое приборостроение, 2006, №8.
- Годунов В.А., Желамский М.В., Метелкина Т.В. и др. – К вопросу достижения предельной точности позиционирования линии визирования цели на подвижных платформах. – Мехатроника, 2006, №10.
- Годунов В.А., Желамский М.В., Третьяков Д.А. Способ определения кратчайшего расстояния и направления на линию электропередач с борта летательного аппарата. – Материалы заявки № 2006110290 от 30.03.2006 г.
- Годунов В.А., Желамский М.В., Третьяков Д.А. Способ определения кратчайшего расстояния и направления на линию электропередач с борта летательного аппарата. – Материалы заявки № 2006118622 от 29.05.2006 г.
- Raab F.H. Remote object position locator. – Патент 4054881 США, G01S 3/02, The Austin Company, 1977.
- Raab F.H. Remote object position and orientation locator. – Патент 4314251 США G01S 5/02, The Austin Company, 1982.
- Egli W.H. et al. Helmet-mounted sighting system. – Патент 4287809 США F41G 9/00, Honeywell inc. 1981.
- Egli W.H. et al. Helmet metal mass compensation for helmet-mounted sighting system. – Патент 4394831 США F41G 09/00, G01R 033/02, 1983, Honeywell.
- Zimmer P. et al. Method and apparatus for determining an orientation associated with a mobile system, especially a line of sight inside a helmet visor. – Патент 5457641 США G01B 7/04, Sextant Avionique, 1995.
- Blood E. Device for quantitatively measuring the relative position and orientation of two bodies in the presence of metals utilizing direct current magnetic fields. – Патент 4849692 США G01B 7/14, Ascension (Bird), 1989.
- Blood E. Device for quantitatively measuring the relative position and orientation of two bodies in the presence of metals utilizing direct current magnetic fields. – Патент 4945305 США G01B 7/14, Ascension, 1990.
- Lescourret J. Method to determine the position and orientation of a mobile system, especially the line of sight in a helmet visor. – Патент 5847976 США, F41G3/22, Sextant Avionique, 1998.
- Lescourret J. Method of compensation of electromagnetic perturbations due to moving magnetic and conducting objects. – Патент 5694041 США G01B 7/14, Sextant Avionics, 1997.
- Jones H.R. Method and apparatus for determining electromagnetic field characteristics within a volume. – Патент 6377041 США, G01R 33/02, Polhemus, 2002.
- Khalfin I. Methods and apparatus for electromagnetic position and orientation tracking with distortion compensation. – Патент 6400139 США, G01B 7/14, Polhemus Inc. 2002.
- Khalfin I. Method and apparatus for electromagnetic position and orientation tracking with distortion compensation employing a modulated signal. – Патент 6762600 США, G01B7/00, Polhemus, 2004.
- <http://www.ascension-tech.com/>.
- Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.
- Hansen P.K. Magnetic position and orientation measurement system. – Патент 4622644 США G01B 7/00, Position Orientation Systems, Ltd. 1986.
- <http://www.polhemus.com/>.