

Макаров А.Л.¹, Хорошилов В.С.¹, Москалев С.И.¹, Меланченко А.Г.¹, Пятак И.А.¹, Валов Ю.К.¹, Кавун В.В.¹, Кореннов Ю.А.¹, Корепанов В.Е.², Добрушина М.Г.¹, Щудро А.П.¹

¹ Государственное предприятие «Конструкторское бюро „Южное“ им. М.К. Янгеля».

Украина, г. Днепропетровск

² Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины.

Украина, г. Львов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «МИКРОСАТ»

Анотація

В статті викладається можливий підхід до визначення фактичного кутового положення датчиків комплексу наукової апаратури, розміщених на виносних штангах, по відношенню до базової системи координат малого космічного апарата «Мікросат» під час його польоту.

Abstract

An approach of angular position determination of scientific payload sensors complex, which placed on folding beams, relatively to basic coordinate system of small spacecraft "Microsat" has been presented in the paper.

В настоящее время в Украине создается научно-технологический малый космический аппарат (МКА) «Мікросат». На борт МКА наряду с технологической аппаратурой и устройствами будет установлен комплекс научной аппаратуры (КНА) «Ионосат-Мікро», предназначенный для долгосрочного наблюдения динамических процессов в ионосфере Земли. Целью наблюдений является развитие фундаментальных научных представлений физики солнечно-земных связей, контроля текущего состояния и прогнозирования космической погоды, диагностики природных и техногенных катастрофических явлений.

Для проведения измерений датчики КНА должны располагаться в зонах с минимально возможными уровнями электромагнитных помех, создаваемых аппаратурой МКА. Вынесение датчиков КНА в указанные зоны в известных космических аппаратах (КА) осуществляется с помощью штанг, раскрывающихся после выведения КА на орбиту. В случае МКА «Мікросат» планируется использовать наиболее простой вариант — двухзвенные штанги. Каждое звено такой штанги состоит из механизма поворота и полого углепластикового стержня. На конце второго звена на кронштейне будут установлены датчики КНА. Основной проблемой при этом является необходимость определения фактического углового

положения датчиков КНА на орбите МКА относительно базовой системы координат (БСК) МКА с погрешностью, не превышающей 30 угл. мин. Такая малая погрешность определения положения труднодостижима в условиях возможного изменения геометрии штанг при воздействии переменных термических нагрузок и невесомости. Ниже описан один из возможных способов определения реального положения датчиков КНА в полете.

В разработанной конструкции штанга приводится из транспортного положения в рабочее с помощью механизмов поворота пружинного типа. Такие механизмы широко применялись ранее и хорошо отработаны в научных станциях серий АУОС-3 и АУОС-СМ. Как показывает опыт, погрешность фиксации их конечного положения составляет до 30 угл. мин.

Угловое положение осей датчиков КНА определяется относительно осей БСК, привязанной к осям служебного магнитометра LEM1-016M, определенного с высокой точностью на его посадочном месте. Измерение фактического углового положения осей датчиков в их рабочем положении на орбите МКА «Мікросат» в соответствии с рассматриваемым способом планируется выполнять в два этапа — в наземных условиях и при полете.

На первом этапе предусматривается измерение углового положения относительно БСК датчиков КНА, расположенных на концах штанг, находящихся в раскрытом (рабочем) положении, на специальном стенде с помощью оптических средств (теодолитов, квадрантов, уровней). Измерения проводятся по контрольным зеркальным призмам, расположенным на концах штанг на кронштейнах крепления датчиков КНА, и по опорной зеркальной призме, установленной на плите на посадочной плоскости служебного магнитометра. При этом грани опорной призмы параллельны осям БСК.

Обычно при наземных испытаниях раскрытие штанг с датчиками КНА из транспортного в рабочее положение выполняется в составе МКА с использованием специализированного стенда, позволяющего выполнять раскрытие штанг в вертикальной

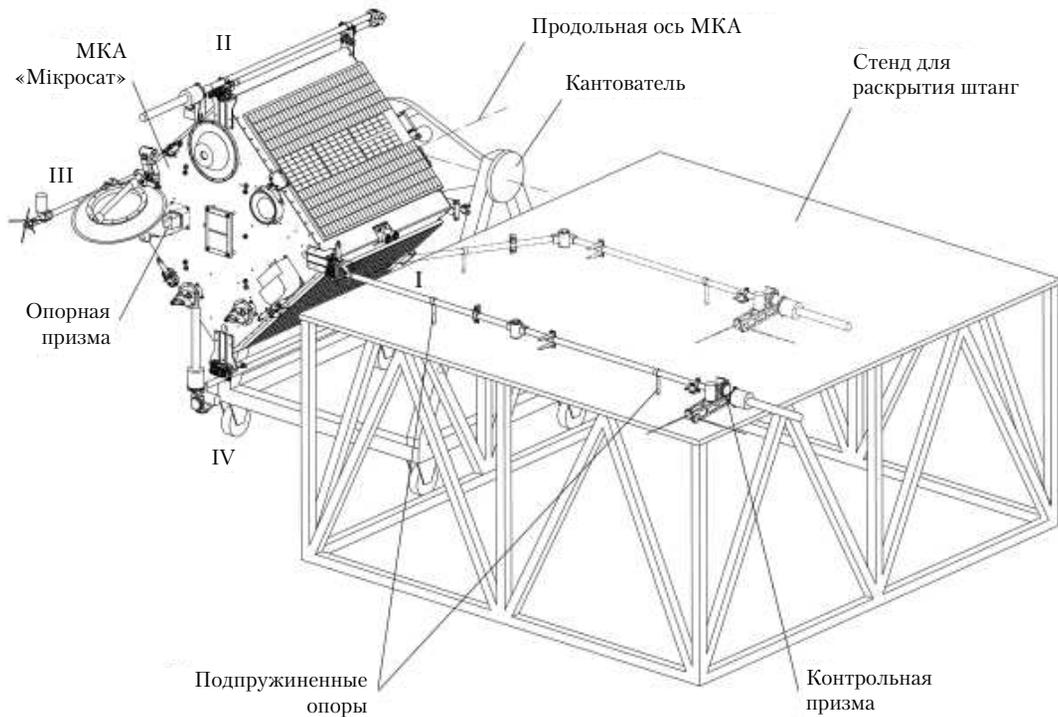


Рис. 1. Стенд для раскрытия штанг

плоскости при компенсации силы притяжения Земли для исключения их деформации и возможной поломки.

Измерение углового положения датчиков КНА с использованием стенда раскрытия по вышеприведенному способу затруднительно из-за несовершенства таких стендов, т. к. компенсация силы притяжения выполняется путем уравнивания раскрываемых звеньев штанги посредством балансировочных грузов, соединенных со звеньями штанги через шкивы, расположенные в верхней части стенда над МКА. Такая конструкция не позволяет измерить малые углы отклонения концов штанг от заданных.

Для решения поставленной задачи предполагается использовать стенд с раскрытием штанг в горизонтальной плоскости на зеркальной отгоризонтированной плите. Схематично стенд изображен на рис. 1.

МКА в транспортном положении устанавливается на планшайбу кантователя, которая позволяет разворачивать МКА вокруг его продольной оси на углы 0° (плоскость I), 90° (плоскость II), 180° (плоскость III) и 270° (плоскость IV). МКА располагается поочередно плоскостями I, II, III и IV в непосредственной близости возле стенда раскрытия и горизонтируется с использованием опорной призмы. После кантования МКА из вертикального в горизонтальное положение и освобождения фиксаторов, удерживающих звенья штанг в транспортном положении, выполняется раскрытие двухзвенной штанги

в горизонтальной плоскости. При этом для звеньев штанги, выложенных на плите стенда, используются подпружиненные опоры, которые значительно уменьшают трение скольжения. После срабатывания фиксаторов с помощью оптических средств измеряется угловое положение граней контрольной призмы относительно граней опорной призмы. В идеальном состоянии грани контрольной призмы должны быть параллельны граням опорной призмы, а грани, перпендикулярные к граням контрольной призмы — параллельны осям датчиков КНА.

Второй вариант стенда для раскрытия штанг — это ванна, наполненная жидкостью, а вместо подпружиненных опор используются поплавки. В этом случае после проведения измерений выполняется термовакуумная обработка КА.

Из-за люфтов в узле фиксатора и в подшипниковых узлах механизмов поворота контрольная призма на конце штанги после каждого ее раскрытия будет занимать разные положения относительно опорной призмы. Поэтому раскрытие и измерения выполняются многократно (до 10 раз), после чего определяется усредненное значение углового положения контрольной призмы относительно опорной.

Далее по принятой расчетной модели определяется погрешность углового положения датчиков КНА относительно БСК с учетом деформаций конструкции штанг и плиты от воздействия перепадов

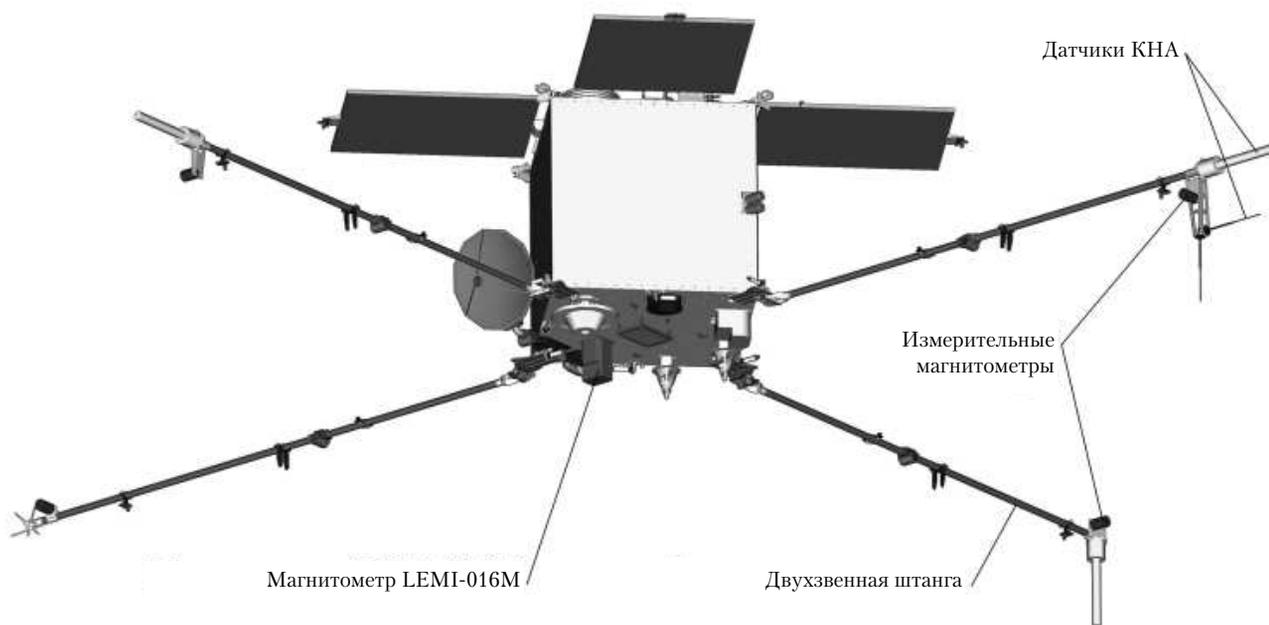


Рис. 2. Общий вид МКА «Мікросат» в рабочем положении

температур по элементам конструкции в условиях орбитального полета МКА.

Оценка максимального значения погрешности углового положения датчиков КНА относительно БСК с учетом погрешности изготовления звеньев штанг в плоскости раскрытия штанг составляет $(2...3)^\circ$, и $(1...1,5)^\circ$ – в ортогональной плоскости.

На втором этапе – в условиях орбитального полета МКА – для повышения точности определения фактического углового положения датчиков КНА относительно БСК предложено использовать измерительные магнитометры (ИМ), устанавливаемые на кронштейнах совместно с датчиками КНА (рис. 2).

Необходимость дополнительной оценки углового положения датчиков КНА на концах штанг в полете объясняется следующим:

- отличия фактических углов раскрытия штанг в невесомости от значений, полученных в наземных условиях, могут превышать допустимую величину;

- в процессе полета температурные деформации могут привести к изменению углов установки датчиков КНА.

Кроме того, возможность измерения реальных углов положения датчиков КНА позволяет выполнить научную миссию МКА даже в случае неполного раскрытия штанг.

Согласно предложенной методике, оценка углового положения осей датчиков КНА относительно БСК является функцией разности измерений ИМ и

служебного магнитометра. При использовании в качестве ИМ миниатюрных феррозондовых магнитометров типа LEMI-020 в диапазоне изменения модуля магнитного поля Земли (МПЗ) $H = (20...45)$ тыс. нТл погрешность определения углового положения датчиков КНА относительно БСК, обеспечиваемая предлагаемой методикой, будет составлять $\Delta H/H \approx (4...17)$ угл. мин., что укладывается в требования по точности определения положения осей датчиков КНА. (Магнитометры LEMI-020 разработаны во Львовском центре Института космических исследований НАН и ГКА Украины и имеют абсолютную погрешность ΔH порядка 50 нТл).

Основной проблемой для обеспечения требуемой точности при обработке магнитометрических измерений является наличие магнитных помех от бортовой аппаратуры МКА и (в меньшей степени) отклонение реального МПЗ от принятой модели.

Решение этой задачи осуществляется на основе комплексного алгоритма, осуществляющего совместную обработку данных измерительных магнитометров, служебного магнитометра, установленного на корпусе МКА, а также (как вариант) данных от системы ориентации. Эффективность такого подхода и возможность достижения невязок магнитометрических данных, соответствующих паспортным значениям, подтверждена опытом обработки телеметрических данных МКА Egyptsat-1 и «Січ-2» [1].



Угол δ отклонения направлений вектора МПЗ, измеренного служебным и измерительным магнитометрами, определяется выражением

$$\delta = \cos^{-1} \left[\frac{(B \cdot H_K) \cdot H_M}{|H_K| |H_M|} \right],$$

где H_K, H_M — векторы МПЗ, измеренные измерительным и служебным магнитометрами; $|H_K|, |H_M|$ — их модули; B — матрица перехода между системами координат ИМ и служебного магнитометра.

В более простом варианте, с учетом влияния магнитных помех H_K и H_M в данных ИМ и служебного магнитометра, расчетные значения измеренных векторов, действующих в точках размещения магнитометров, могут быть представлены в виде уравнения Пуассона [2]:

$$\begin{aligned} H_{K0} &= H + M_K \cdot H + H_{KT}; \\ H_{M0} &= H + M_M \cdot H + H_{MT}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь H — значение вектора геомагнитного поля, действующего в точке нахождения МКА; M_K, M_M — матрицы помех, связанных с перемагничиванием МКА при движении в МПЗ, а H_{KT}, H_{MT} — векторы помех, связанные с постоянной составляющей намагниченности МКА.

С учетом измеренных значений H_K, H_M с точностью до инструментальных погрешностей можно записать:

$$\begin{aligned} \Delta H_K &= H_K - H_{K0} = \Delta M_K \cdot H + \Delta H_{KM}; \\ \Delta H_M &= H_M - H_{M0} = \Delta M_M \cdot H + \Delta H_{MT}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta M_K, \dots, \Delta H_{MT}$ обозначено отклонение расчетных значений элементов M, H_T от их истинных значений.

Следует отметить, что параметры помех у обоих типов магнитометров не совпадают, поскольку они находятся на разном расстоянии от источника помех — корпуса с аппаратурой МКА.

Отсюда может быть записано соотношение измерений как

$$\Delta H_K = B \cdot \Delta H_M. \quad (3)$$

Матрица B учитывает номинальную (заданную) установку ИМ относительно служебного магнитометра n , и отклонение d этой установки, подлежащее определению, представляется выражением

$$B = B_d \cdot B_n. \quad (4)$$

Искомая матрица B_d отклонений установки ИМ определяется через обращение уравнений 3 и 4.

Математический алгоритм решения задачи включает совместное решение уравнений (2), (3), (4) и определение неизвестных помех $M_K, M_M, \Delta H_{KT}, \Delta H_{MT}$ и матрицы B_d . Исходными параметрами

для задачи являются массив измерений векторов H_K, H_M и расчетных значений вектора МПЗ H (или его модуля), вычисленных для точек околоземного пространства, соответствующих координатам МКА в моменты измерений.

Подобный подход был использован ранее при обработке телеметрической информации КА «Океан» и «Січ».

Базовый алгоритм решения задачи основывается на совместной обработке измерений пространственно разнесенных четырех ИМ (по одному на конце каждой штанги) и служебного магнитометра. Это создает возможность построения мультипольной модели магнитного поля МКА, аналогичной модели МПЗ [3, 4]. Существенное отличие величин градиентов МПЗ и собственного магнитного поля МКА позволяет в ходе обработки массивов телеметрических данных разделить значения измеренных магнитометрами величин на две составляющие, соответствующие вкладам магнитных полей Земли и МКА. Этому способствует то, что в каждом временном срезе ТМИ (группа измерений всех магнитометров, относящихся к одному моменту времени) МПЗ присутствует как постоянная величина и влияние погрешности его прогноза ослабляется.

Помимо выполнения основной целевой задачи — обеспечения качества измерений КНА — изложенный метод имеет значение также и для решения конструкторской задачи обеспечения надлежащих условий работы бортовых магнитометров, особенно устанавливаемых на малоразмерных КА. Близость магнитометра к корпусу КА обуславливает помехи от бортовой аппаратуры как неизбежной составной части выполненных датчиком КНА измерений. В то же время многолетняя практика разработки КА выявила ценность использования телеметрической информации как для научных, так и для технических целей. Поэтому представляется, что исследование вопроса о характеристиках помех в объеме служебного магнитометра и способах их ограничения (в том числе и путем выполнения специальной математической обработки) имеет самостоятельное значение для повышения качества научной информации.

Предложенная комплектация МКА «Мікросат», включающая несколько одновременно работающих магнитометров, создает возможность для проведения всестороннего исследования в полете весьма важной проблемы — обеспечения электромагнитной совместимости служебных и научных систем МКА. На основе этого исследования могут быть созданы эффективные процедуры повышения точности измерения электрических и магнитных полей на борту малоразмерных КА.

В дальнейшем предполагается рассмотреть альтернативные пути обеспечения высокой точности

привязки к требуемой системе координат результатов измерений датчиков научной аппаратуры.

Описанные работы частично поддержаны контрактом ЛЦ ИКИ НАН и ГКА Украины с ГКАУ № 1-05/08.

Литература

1. *Пятак И.А.* Сравнительная оценка математических моделей геомагнитного поля // Космическая техника. Ракетное вооружение. — 2009. — Вып. 2. С. 119–127.
2. *Рыбалтовский Н.Ю.* Магнитно-компасное дело. — Л.: Госуд. изд-во водного транспорта. Ленинград. отд-ние, 1954. 492 с.
3. *Пудовкин И.М., Колесова В.И., Валуева Г.Е.* Представление геомагнитного поля на поверхности Земли и во внешнем пространстве с помощью дипольных моделей // Геомагн. и аэрономия. — 1968. — 8, № 5. — С. 911–914.
4. *Дегтярев В.В., Дегтярев А.В.* Метод мультипольного анализа для определения магнитных моментов планет // Космічна наука і технологія. Додаток. — 2002. — 8, № 1. С. 85–88.