

## Список использованных источников

1. S.Abboud, D.Sadeh. Power spectrum analysis of fetal heart rate variability using the abdominal maternal electrocardiogram // J.Biomed.Eng. 1990? Vol.12, March
2. Прилуцкий Д.А. Электрокардиографическая система на основе сигма-дельта аналого-цифрового преобразования. Автореферат диссертации.-МИЭТ, М.: 1998

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Шарафеев Н.В., Тюлюков П.В., Иванов В.В.

Использование нестабилизированных космических аппаратов (КА) для проведения технологических экспериментов является перспективным в связи с низким уровнем микрогравитации ( $10^{-4} \div 10^{-5}$ ).

Дальнейшее уменьшение уровня микроускорений предполагает проведение экспериментальных исследований динамики КА такого типа. Для этой цели был использован установленный на борту КА прибор "Мираж", измеряющий магнитные поля внутри аппарата.

Магнитные поля измерялись непрерывно в течение всего времени полёта (с 9 по 24 сентября 1999 г.) с помощью пяти трёхкомпонентных феррозондовых датчиков, установленных в пяти точках КА, а результаты измерений передавались два раза в сутки на Землю. Одновременно вся информация записывалась во флэш-память, в которой результаты сохраняются и после отключения питающего напряжения. Показания штатных датчиков системы ориентации на данном участке полёта не фиксировались в связи с её отключением, поэтому пространственное положение КА определялось по измерениям магнитного поля внутри аппарата. В процессе обработки информации было установлено, что на участках нестабилизированного полёта космический аппарат вращается.

При определении угловых перемещений аппарата вокруг своего центра масс за магнитное поле Земли принимались показания датчика, в точке установки которого менее всего ощущалось поле, инициируемое работой аппаратуры.

При расчётах использовалась связанная система координат, началом отсчёта которой служит центр масс космического аппарата. В связанной системе координат при ориентированном полёте ось  $X_c$  космического аппарата совпадает с вектором скорости, ось  $Y_c$  противоположна направлению к центру Земли. При определении направления оси  $Z_c$  следует учитывать, что система координат правая.

Обозначим три составляющих магнитного поля Земли по осям связанной системы координат космического аппарата  $X_{гео}$ ,  $Y_{гео}$ ,  $Z_{гео}$ .

Опишем направление единичным вектором геомагнитного поля, то есть вектором единичной длины, совпадающим по направлению с вектором магнитного поля Земли. Единичный вектор геомагнитного поля рассчитывается по формулам:

$$X_{\text{един}} = X_{\text{гео}} / \sqrt{X_{\text{гео}}^2 + Y_{\text{гео}}^2 + Z_{\text{гео}}^2} ;$$

$$Y_{\text{един}} = Y_{\text{гео}} / \sqrt{X_{\text{гео}}^2 + Y_{\text{гео}}^2 + Z_{\text{гео}}^2} ;$$

$$Z_{\text{един}} = Z_{\text{гео}} / \sqrt{X_{\text{гео}}^2 + Y_{\text{гео}}^2 + Z_{\text{гео}}^2} .$$

Если начало единичного вектора поместить в постоянную точку, например, в начало координат, то конец вектора опишет пространственную кривую, называемую годографом. Т.к. вектор имеет единичную длину, все точки этой кривой расплохаться на поверхности единичной сферы. Годограф единичного вектора геомагнитного поля эквивалентен траектории северного конца магнитной стрелки, установленной на космическом аппарате.

Для определения ориентации аппарата нужно иметь два направления, относительно которых измеряют угловое положение объекта. По данным о векторе магнитного поля Земли можно определить лишь пространственное положение оси, вокруг которой вращается спутник, и скорость, с которой это вращение происходит. Однозначно определить положение космического аппарата в пространстве по вектору магнитного поля Земли невозможно.

На коротком отрезке времени, когда направление вектора магнитного поля Земли можно считать неизменным, ось вращения магнитной стрелки параллельна оси вращения космического аппарата вокруг своего центра масс.

Ориентация оси, вокруг которой вращается магнитная стрелка, совпадает с ориентацией нормали к плоскости, в которой перемещается конец магнитной стрелки или единичного вектора геомагнитного поля. Это плоскость определяется по трём точкам. Центральная точка  $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$  соответствует координатам конца единичного вектора в момент времени, к которому привязано положение плоскости. Точка  $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$  берётся за 25 секунд до этого момента, а точка  $P_3(X_3, Y_3, Z_3)$  — через 25 секунд после этого момента. Т.е. определяется плоскостью, в которой перемещается конец единичного вектора в течение 50 секунд. Координаты плоскости привязываются по времени к середине этого пятидесятисекундного отрезка.

Уравнение плоскости имеет вид:

$$A * X + B * Y + C * Z + D = 0.$$

Направляющий вектор  $N(A,B,C)$  перпендикулярен к этой плоскости.

Плоскость, проведённая через три точки, описывается уравнением:

$$\begin{vmatrix} X & Y & Z & 1 \\ X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 \\ X_3 & Y_3 & Z_3 & 1 \end{vmatrix} = 0.$$

Из него определяются коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ .

$$A = \begin{vmatrix} Y_1 & Z_1 & 1 \\ Y_2 & Z_2 & 1 \\ Y_3 & Z_3 & 1 \end{vmatrix} = Y_1 * (Z_2 - Z_3) - Y_2 * (Z_1 - Z_3) + Y_3 * (Z_1 - Z_2);$$

$$B = \begin{vmatrix} X_1 & Z_1 & 1 \\ X_2 & Z_2 & 1 \\ X_3 & Z_3 & 1 \end{vmatrix} = X_1 * (Z_2 - Z_3) - X_2 * (Z_1 - Z_3) + X_3 * (Z_1 - Z_2);$$

$$C = \begin{vmatrix} X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & 1 \\ X_3 & Y_3 & 1 \end{vmatrix} = X_1 * (Y_2 - Y_3) - X_2 * (Y_1 - Y_3) + X_3 * (Y_1 - Y_2);$$

$$D = \begin{vmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ X_3 & Y_3 & Z_3 \end{vmatrix} = X_1 * (Y_2 * Z_3 - Y_3 * Z_2) - X_2 * (Y_1 * Z_3 - Y_3 * Z_1) + X_3 * (Y_1 * Z_2 - Y_2 * Z_1).$$

Ось вращения перпендикулярна плоскости, по которой перемещается конец единичного вектора. Следовательно, ось вращения параллельна направляющему вектору  $N(A,B,C)$ . Т.к. она проходит через начало координат, то уравнение, описывающее ось, имеет вид:

$$X/A = Y/B = Z/C.$$

Направляющие косинусы оси вращения вычислялись по формулам:

$$\begin{aligned} \cos N_x &= A / (A^2 + B^2 + C^2)^{1/2}; \\ \cos N_y &= B / (A^2 + B^2 + C^2)^{1/2}; \\ \cos N_z &= C / (A^2 + B^2 + C^2)^{1/2}. \end{aligned}$$

Для определения скорости вращения конца магнитной стрелки необходимо знать не только расстояние между точками  $P_1$  и  $P_2$ , но радиус окружности, по которой это движение происходит.

Расстояние  $R$  от конца единичного вектора с координатами  $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$  до оси вращения равно

$$R = \left( (C*Y_2 - B*Z_2)^2 + (A*Z_2 - C*X_2)^2 + (B*X_2 - A*Y_2)^2 \right)^{1/2} / (A^2 + B^2 + C^2)^{1/2}$$

Угловая скорость вращения единичного вектора магнитного поля при перемещении от точки  $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$  до точки  $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$  за время  $t$  по радиусу  $R$  вычисляется по формуле

$$\omega_{y2l} = 2 \arcsin \left( \left( (X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2 \right)^{1/2} / 2R \right) / t.$$

Единичный вектор магнитного поля изменяет своё положение по двум причинам: первая – направление вектора зависит от географических координат, вторая – космический аппарат вращается вокруг своей оси вращения. При вращении аппарата вокруг своей оси усреднение за 90 минут позволяет в какой-то мере исключить влияние зависимости направления геомагнитного поля от географических координат.

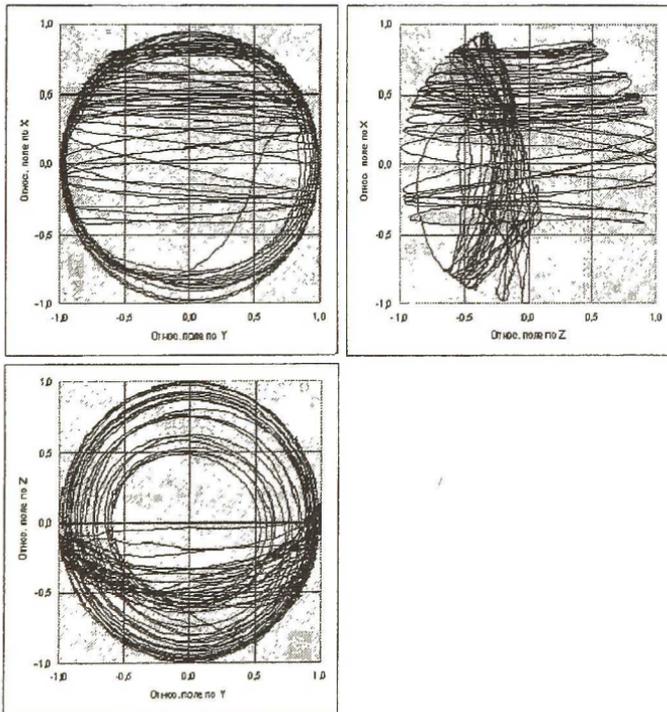


Рис. 1. Годограф единичного вектора геомагнитного поля во время 215-229 витков на завершающем этапе полета.

При таком большом усреднении следует учитывать, что информация об относительно быстрых изменениях теряется.

В ориентированном полёте аппарат находится на первом витке и с 217 витка до включения тормозного двигателя.

На рис. 1 показан годограф единичного вектора на самом важном, с точки зрения ориентации, участке полёта с 215 по 229 виток. До 217 витка аппарат находится в неориентированном полёте. На 217 витке начинается работать система ориентации.

Геомагнитное поле в районе орбиты в первом приближении можно описать полем намагниченного шара. Ось земного магнита наклонена к оси вращения земного шара, поэтому наклонение орбиты космического аппарата к магнитному шару за сутки изменяется в пределах от  $+12$  до  $-12$  градусов от номинального значения. Годограф единичного вектора магнитного поля Земли, рассчитанный по такой модели для трёх наклонений орбиты и стабилизированного аппарата, как видно из рис. 2, совпадает по характеру с годографом, построенным на основе экспериментальных данных.

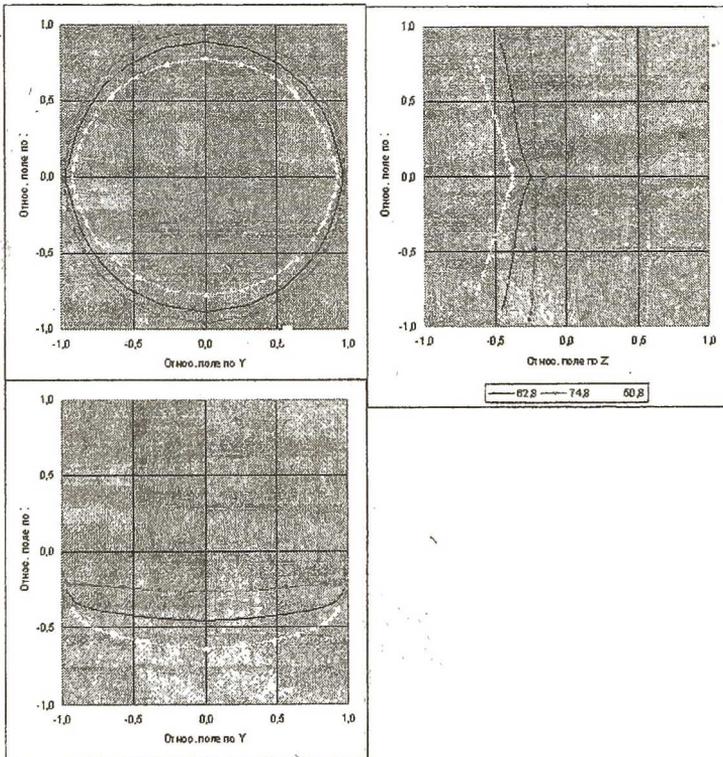


Рис. 2. Годограф единичного вектора геомагнитного поля на участке ориентированного полета, рассчитанный по упрощенной модели геомагнитного поля для трех значений наклонения орбиты.

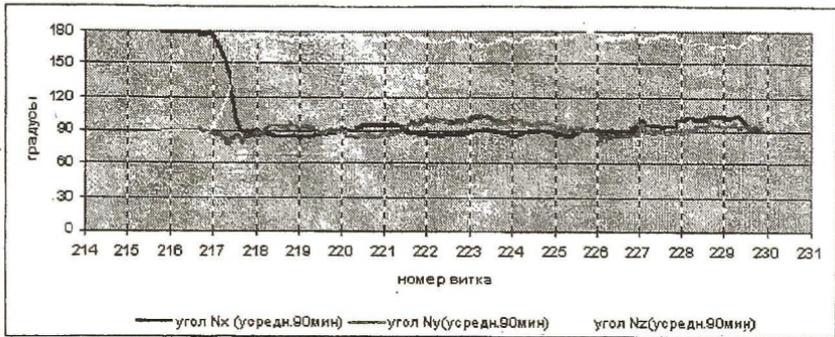


Рис. 3. Углы между осью вращения и осями координат.

На рис.3 показана зависимость от времени углов, под которыми ось вращения вектора магнитного поля наклонена к осям аппарата в связанной системе координат. Зависимости, представленные на рис.3, получены при усреднении экспериментальных данных на отрезке в 90 минут.

Предложенная методика позволяет по измеренному во время полёта вектору геомагнитного поля выявить характер движения космического аппарата относительно своего центра масс. При стабилизированном полёте аппарат вращается вокруг оси  $Z_c$  со скоростью один оборот за виток (0,067 градусов в секунду), т.к. на этом участке за счёт системы ориентации ось  $Y_c$  проходит через центр Земли, а ось  $X_c$  совпадает с вектором скорости. В первой половине второго витка система ориентации отключается. Ориентация оси вращения с этого момента начинает изменяться (рис.4). К шестому-седьмому витку положение оси стабилизируется. Можно говорить, что аппарат вращается вокруг оси  $X_c$ .

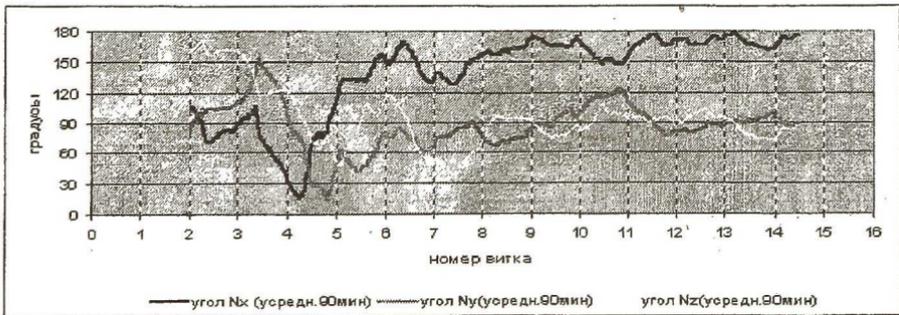


Рис. 4. Углы между осью вращения и осями координат в начале полета

Скорость вращения во времени растёт (рис.5). В конце неориентированного полёта (витки 215-216) она имеет величину около 0,9 градусов в секунду (рис.6). При этом ось вращения отклонена от оси  $X_c$  косми-

ческого аппарата на 2 градуса в сторону положительного направления осей  $Y_c$  и  $Z_c$ .



Рис. 5. Средняя за 90 минут угловая скорость вектора геомагнитного поля на 2-ом – 14-ом витках.

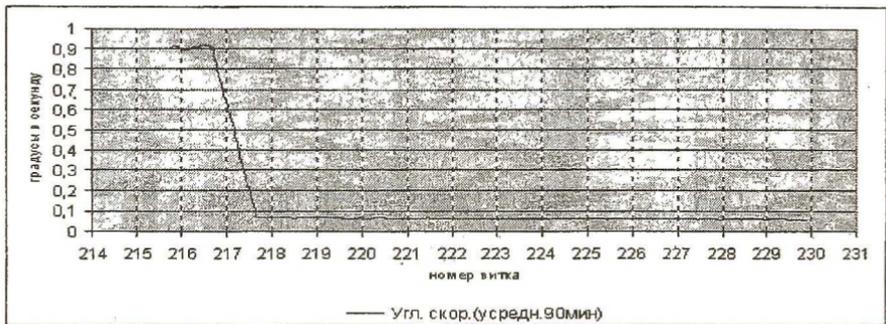


Рис. 6. Средняя за 90 минут угловая скорость вектора геомагнитного поля на 216-ом – 229-ом витках.

При анализе приведённых выше графиков, следует учитывать, скорость вращения изменяется не монотонно из-за неоднородности геомагнитного поля. В стабилизированном полёте вектор магнитного поля совершает оборот вокруг оси  $Z$  за один виток (90,4 минуты). Пространственные флуктуации магнитного поля Земли при таком медленном вращении даже при осреднении 90 минут подавляются слабо. Это хорошо видно на рис. 4, когда вращение аппарата незначительно.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО УРОВНЕМЕРА ТОПЛИВА ЛЕГКОВЫХ И ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Матюнин С.А., Борисов А.Б., Савельев А.В., Иноземцев М.Ю.

С момента появления первых автомобилей конструкторами автомобилестроительных предприятий непрерывно решалась задача о разработке надежного, дешевого, а самое главное точного топливного датчика, позволяющего с малой погрешностью определять уровень бензина или