

Н.Н. Севастьянов

СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩАЮЩИХ МОМЕНТОВ ДЛЯ РЕЖИМА «ПРОГНОЗ» СПУТНИКА СВЯЗИ «ЯМАЛ-200»

Рассмотрена природа и основные составляющие внешних возмущающих моментов, действующих на находящийся на орбите космический аппарат. Показано, что только натурные экспериментальные измерения позволяют получить точные данные по действующим внешним моментам.

Ключевые слова: *Спутник связи, геостационарная орбита, внешние возмущающие моменты, натурные экспериментальные измерения.*

1. Постановка вопроса

Достаточно хорошо известна природа внешних возмущающих моментов, действующих на находящийся на орбите космический аппарат [1]. Основными из них являются гравитационные моменты, моменты от магнитного поля Земли, от аэродинамического воздействия атмосферы и от давления солнечного излучения. Особенностью геостационарной орбиты является полное отсутствие влияния атмосферы и сильно уменьшенные по сравнению с низколетящими космическими аппаратами (КА) величины гравитационных и магнитных моментов. Проведем некоторые их оценки.

Гравитационный момент, действующий на КА с тензором инерции J_B , равен

$$N_{\text{гр}} = \frac{3\mu}{r^3} [\hat{r} \times (J_B \cdot \hat{r})], \quad \hat{r} = \frac{\mathbf{r}}{r}. \quad (1)$$

Моменты инерции КА «Ямал-200» в (кг·м³) и конструктивных (базис B) осях:

КА	J_{xx}	J_{yy}	J_{zz}	J_{xy}	J_{yz}	J_{xz}
КА-201	6976,4	6837,4	1121,8	-16,8	-5,1	19,4
КА-202	6719,5	6503,4	1014,9	-5,7	-17,7	17,0

- показывают, что точность совпадения конструктивных осей с осями главных моментов инерции – не хуже единиц угловых минут. Такого же порядка и точность ориентации конструктивных осей в орбитальной системе координат (ОСК); гравитационный момент лежит в горизонтальной плоскости и с учетом того, что $\mu/r^3 = (\omega^0)^2 = 0,528 \cdot 10^{-8}$, получаем для самой большой разности моментов инерции $(I_{xx} - I_{zz}), (I_{yy} - I_{zz})$ величину $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ Н·м на каждую угловую минуту отклонения. Поскольку ориентация КА относительно ОСК не меняется (если не считать стабилизационных колебаний, действия от которых усредняются), то величина гравитационного момента должна быть постоянной и не превосходить $\sim 10^{-6}$ Н·м.

Магнитный момент определяется наличием токового контура ($A \cdot \text{виток} \cdot \text{м}^2 = A \cdot \text{м}^2$), определяющего $\mathcal{M}$ – дипольный момент КА, который взаимодействует с магнитным полем Земли, задаваемым вектором напряженности $\mathcal{B}$, равным на экваторе $3 \cdot 10^{-5}$ Тл и направленным нормально к плоскости экватора. Напряженность магнитного поля убывает с расстоянием как $1/r^3$; магнитный момент задается формулой

$$N_{\text{мг}} = \mathcal{M} \times \mathcal{B} \text{ [Н} \cdot \text{м]}. \quad (2)$$

Контур в $1 A \cdot \text{м}^2$ получит момент $1,4 \cdot 10^{-7}$ Н·м. С целью исключения действия магнитных моментов предпринимаются определенные правила прокладки силовых токовых цепей. Можно видеть, что возмущающий магнитный момент мал и постоянен в связанных осях КА.

Момент солнечного давления. Общая формула для этого момента

$$N_C = \mathbf{r} \times \mathbf{f}, \quad (3)$$

где $\mathbf{r}$ – радиус вектор, идущий от центра масс к центру оптического давления; $\mathbf{f}$ – сила светового давления равная $\mathbf{f} = (1 + K)pA_{\perp}$, K – коэффициент отражения конструкции КА, $0 < K < 1$, $A_{\perp}$ – площадь поверхности КА, нормальной к направлению на Солнце; $p = I_C/c$, $I_C = 1538 \text{ Вт/м}^2$ – энергия излучения Солнца на расстоянии до Земли и $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света.

Размер солнечных батарей КА составляет 35 кв. м, к примеру, для $K = 0,5$, $r = 0,1 \text{ м}$ этот момент будет равен $N_C = 3,4 \cdot 10^{-5}$ Н·м. Очевидно, что именно этот момент является превалирующим, и, кроме того, он изменяется в связи с изменением положения Солнца в ОСК. Так, возьмем расстояние от центра оптического давления до центра инерции величиной 0,1 м, очевидно, что оно также меняется во времени, но на Земле определить эту величину достаточно трудно. Тем не менее поскольку положение Солнца в ОСК, в которой стабилизируется КА, задается двумя углами: углом суточного вращения ОСК и углом отклонения от плоскости орбиты вследствие годового движения Земли, можно сделать определенные суждения о виде функциональной зависимости рассматриваемого момента по времени. Можно предположить, что суточные кривые моментной зависимости должны повторяться, однако при годовом движении Солнца должны быть некоторые особенности. Во-первых, это наличие теней – затмений Солнца – при прохождении плоскости экватора длительностью от 0 до 1 ч 10 мин, и, во-вторых, анализ зависимости момента от угла отклонения Солнца от плоскости q_1, q_2 ОСК. Если принять в качестве основной составляющей момент от плоскостей солнечных батарей, ориентируемых на Солнце, то влияния этих углов отклонения быть не должно. Аналитический учет компоненты момента от корпуса КА весьма затруднителен, тем более, что в любом случае нужно экспериментальное подтверждение выполненным расчетам.

Тем самым, аналитический обзор показывает, что существует только одна возможность получить точные данные по действующим внешним моментам

$$M_d = N_{\text{гп}} + N_{\text{мг}} + N_C, \quad (4)$$

а именно – натурные экспериментальные измерения.

2. Получение экспериментальных данных о внешнем моменте КА «Ямал-200»

Значения действующих на космический аппарат внешних моментов для спутника связи, находящегося на геостационарной орбите, оказалось возможным получить по результатам обработки телеметрических данных о работе системы ориентации этих спутников на участках их штатного функционирования. Созданный для спутников этой серии новый центр управления полетом [2] позволяет структурировать и запоминать на сервере полный поток телеметрической информации о параметрах всех процессов, имевших место на каждом космическом аппарате во все время его функционирования. Благодаря этому была получена возможность провести обработку информации о длительном (два года) периоде функционирования системы ориентации. На протяжении всего этого периода поддерживалась точная ориентация КА в ОСК (погрешности не более 15 угловых минут) и была доступна для обработки информация об угловых скоростях КА и о скоростях вращения инерционных маховиков. Общая идея построения алгоритма оценки внешних моментов состояла в следующем:

- производилась оценка угловых скоростей вращения инерционных маховиков; используя обозначения статьи [3] и формулы из нее (21), возможно получить оценку кинетического момента маховиков

$$\hat{H}_B = \sum_{i=1}^3 I_i \hat{\omega}_i, \quad \hat{H}_{Bi} = I_i \hat{\omega}_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Здесь $\hat{\omega}_i, \omega_i$ – векторные и скалярные величины скоростей вращения маховиков; I_i – моменты инерции маховиков (известные величины);

Оценка полного кинетического момента КА

$$\hat{G}_B = J_{BB} \cdot \hat{\omega}_B + \hat{H}_B, \quad \hat{G}_{Bi} = J_{Bi} \hat{\omega}_{Bi} + I_i \hat{\omega}_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (6)$$

в векторном и скалярном видах, значения тензора инерции КА приведены выше и справедлива вторая (скалярная) часть формулы (5). Компоненты вектора внешних моментов после этого могут быть вычислены (построены) согласно уравнениям движения (22) из [3]:

$$\begin{aligned} M_{d1} &= \dot{\hat{G}}_{B1} + \hat{\omega}_{B2} \hat{G}_{B3} - \hat{\omega}_{B3} \hat{G}_{B2}, \\ M_{d2} &= \dot{\hat{G}}_{B2} + \hat{\omega}_{B3} \hat{G}_{B1} - \hat{\omega}_{B1} \hat{G}_{B3}, \\ M_{d3} &= \dot{\hat{G}}_{B3} + \hat{\omega}_{B1} \hat{G}_{B2} - \hat{\omega}_{B2} \hat{G}_{B1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Чтобы реализовать описанный подход к оцениванию суммарного возмущающего момента, необходимо располагать методом восстановления фактического движения КА по телеметрической информации. Ниже используется метод, основанный на аппроксимации вращательного движения спутника сплайнами.

Для уменьшения случайных ошибок при определении значений угловой скорости спутника использовался процесс сглаживания (аппроксимации функции), основанный на применении метода наименьших квадратов. Аппроксимация выполнялась покомпонентно с использованием решения следующей задачи. Пусть для моментов времени t_m ($m = 0, 1, \dots, M$), $t_m < t_{m+1}$, известны приближенные значения $x_m \approx f(t_m)$ некоторой гладкой функции $f(t)$. Требуется восстановить эту функцию на отрезке $t_0 \leq t \leq t_M$.

Отыскание $f(t)$ в предположении, что эта функция дважды непрерывно дифференцируема, сводится к решению вариационной задачи

$$\int_{t_0}^{t_M} [\ddot{f}(t)]^2 dt \rightarrow \min, \quad \sum_{m=0}^M [x_m - f(t_m)]^2 \leq S. \quad (8)$$

Здесь S – заданное положительное число. Решением задачи (8) является кубический сплайн.

Предполагалось, что измеренные значения угловой скорости имеют одинаковую точность и функция $\hat{\omega}_{Bi}(t_m)$ на участке измерений может быть достаточно хорошо приближена многочленом третьей степени. В результате по наблюдаемым значениям функции в точках измерений методом наименьших квадратов построен многочлен третьей степени, аппроксимирующий функцию $\hat{\omega}_{Bi}(t_m)$, и за значения этой функции принимались значения $\hat{\omega}'_{Bi}(t_m)$ полученного многочлена в точках t_m . Вычисление выполнялось по четырем точкам с использованием следующего выражения:

$$\hat{\omega}'_{Bi}(t_m) = \frac{1}{35} (-3\hat{\omega}_{Bi}(t_{m-2}) + 12\hat{\omega}_{Bi}(t_{m-1}) + 17\hat{\omega}_{Bi}(t_m) + 12\hat{\omega}_{Bi}(t_{m+1}) - 3\hat{\omega}_{Bi}(t_{m+2})). \quad (9)$$

Такое определение угловой скорости спутника позволило уменьшить влияние ошибок измерений при последующей аппроксимации функции $\hat{\omega}'_{Bi}(t_m)$, которая выполнялась для получения значений угловой скорости в требуемые моменты времени.

Аналогичный метод использовался при вычислении значений кинетических моментов маховиков $\hat{H}'_{Bi}$ по информации о скоростях их вращения, получаемых по сигналам прохождения ротора каждого маховика четырех точек за один оборот. При фильтрации угловых скоростей маховиков нужно учитывать стабилизационные колебания в контуре управления, так что интервал осреднения выбирался с учетом этого обстоятельства.

На рис. 1 – 3 в качестве примера представлены обработанные таким образом данные по поведению компонент кинетического момента $\hat{G}'_{Bi}$ ($i = 1, 2, 3 - x, y, z$) для спутника «Ямал-201». Можно видеть, что поведение составляющих кинетического момента системы хорошо иллюстрируют теорему сохранения кинетического момента: проекции кинетического момента на оси связанной системы координат, достаточно точно ориентируемой в равномерно вращающейся орбитальной системе координат, близки к гармоническим функциям по 1 и 2 каналам.

Выделенные из этих экспериментальных зависимостей величины внешних моментов согласно соотношениям (7) представлены на рис. 4 – 6, где приведены покомпонентные зависимости поведения по времени моментов, действующих на космический аппарат.

Можно видеть, что прослеживается регулярность поведения этих зависимостей по времени, соответствующая регулярному движению Солнца относительно орбитальной и соответственно связанной системы координат.

Высокую точность оценок внешних возмущающих моментов подтверждает близость измеренных значений кинетического момента спутника (серые маркеры на рис. 1 – 3) и расчётных значений, полученных путём решения системы уравне-

ний (7) относительно значений суммарного кинетического момента G с использованием в расчётах оценок возмущающих моментов.

На рис. 7 – 9 показаны такие зависимости на интервале один год.

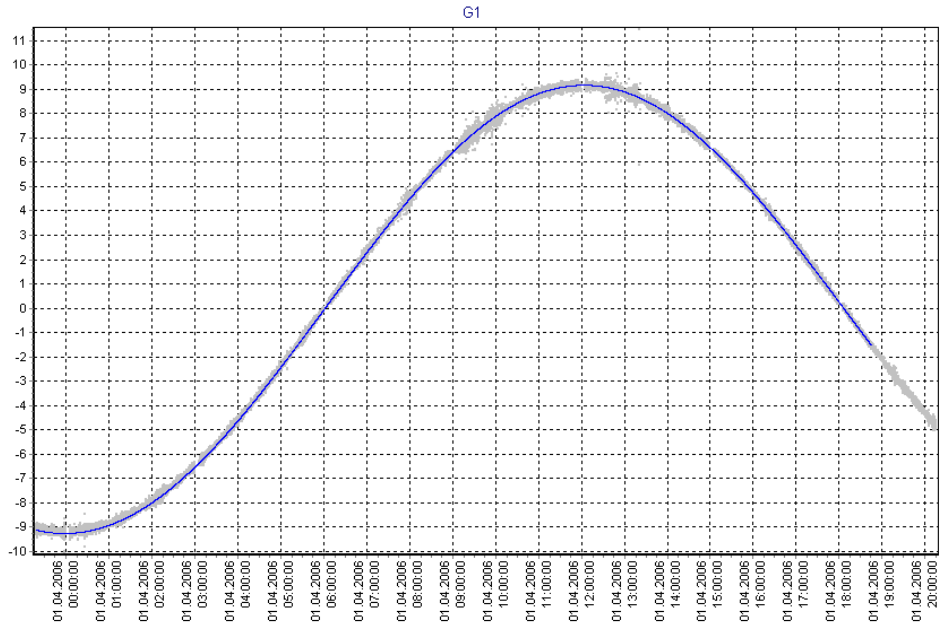


Рис. 1. Суточное изменение кинетического момента (канал крена)

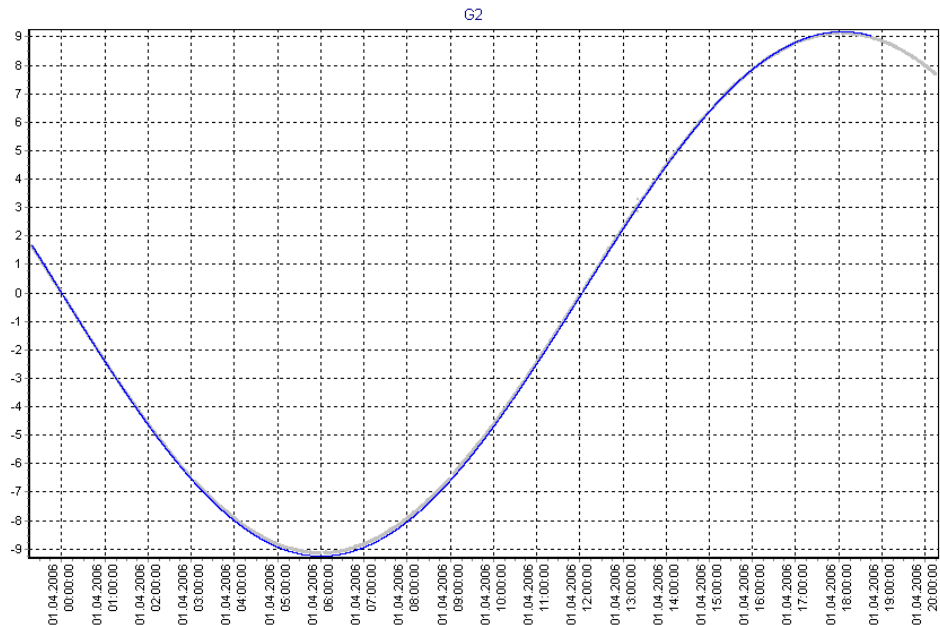


Рис. 2. Суточное изменение кинетического момента (канал рысканья)

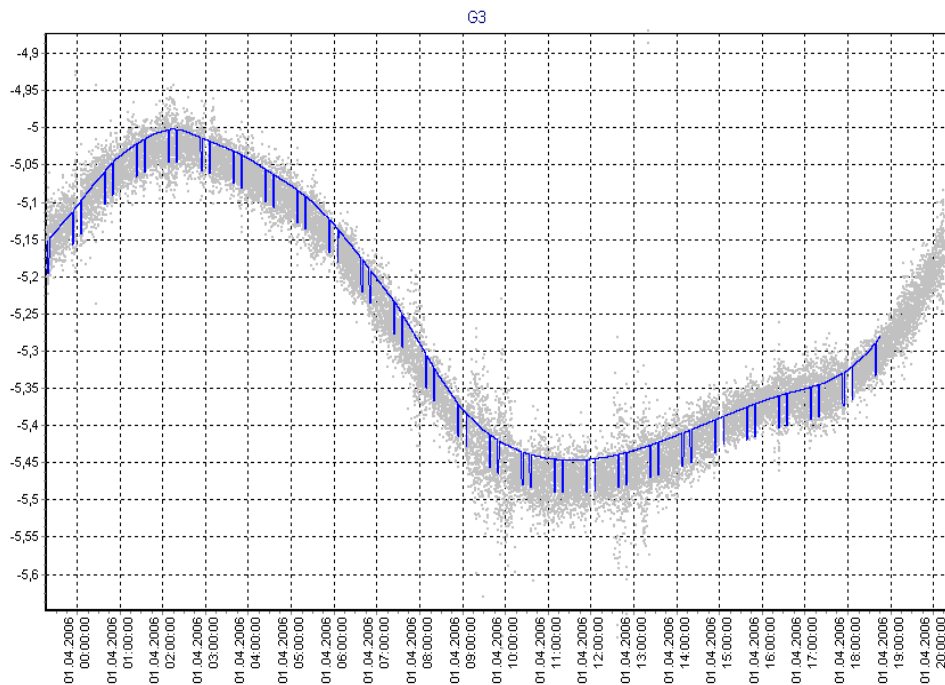
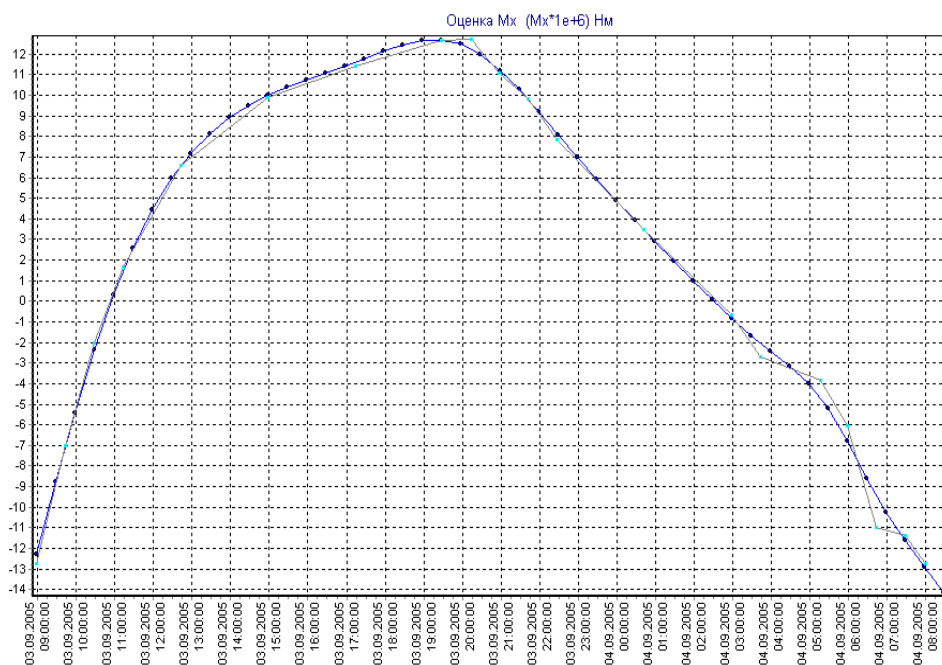


Рис. 3. Суточное изменение кинетического момента (канал тангажа)

Рис. 4. Суммарный возмущающий момент, действующий на КА «Ямал-200» № 1.
Канал крена, интервал измерений – сутки

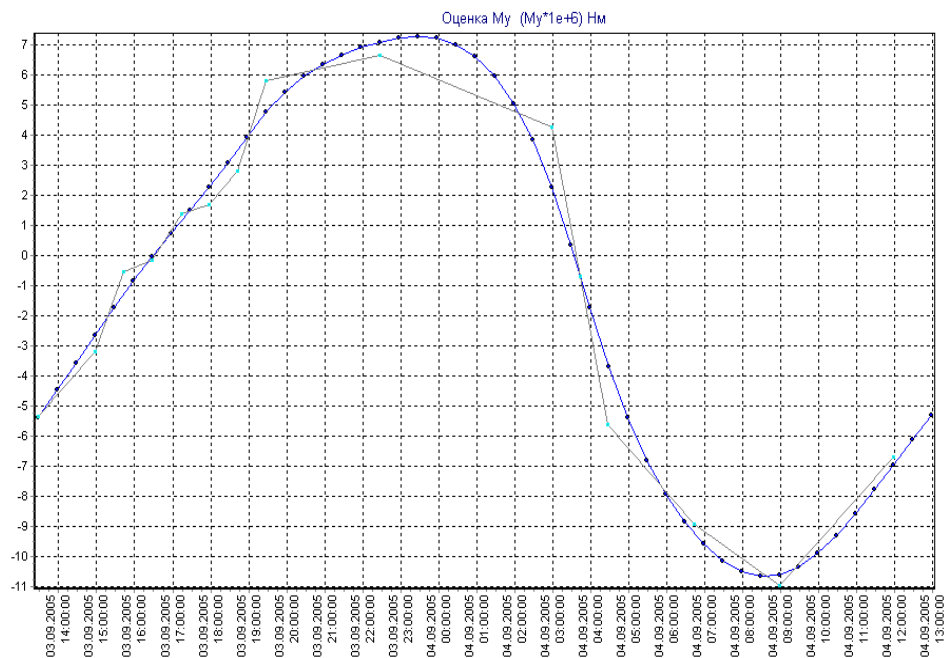


Рис. 5. Суммарный возмущающий момент, действующий на КА «Ямал-200» № 1.
Канал рысканья, интервал измерения – сутки

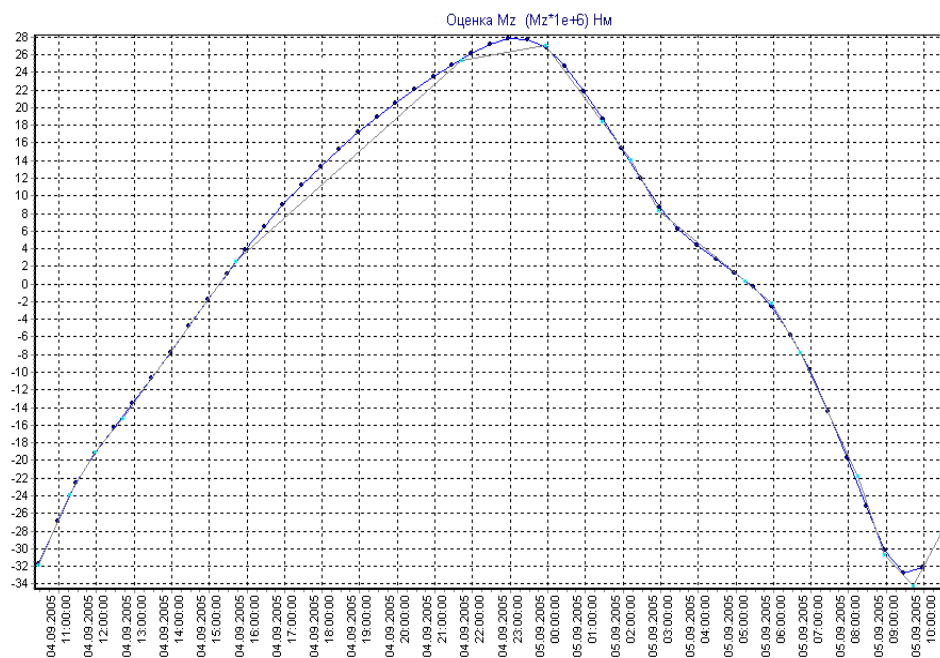


Рис. 6. Суммарный возмущающий момент, действующий на КА «Ямал-200» № 1.
Канал тангажа, интервал измерений – сутки

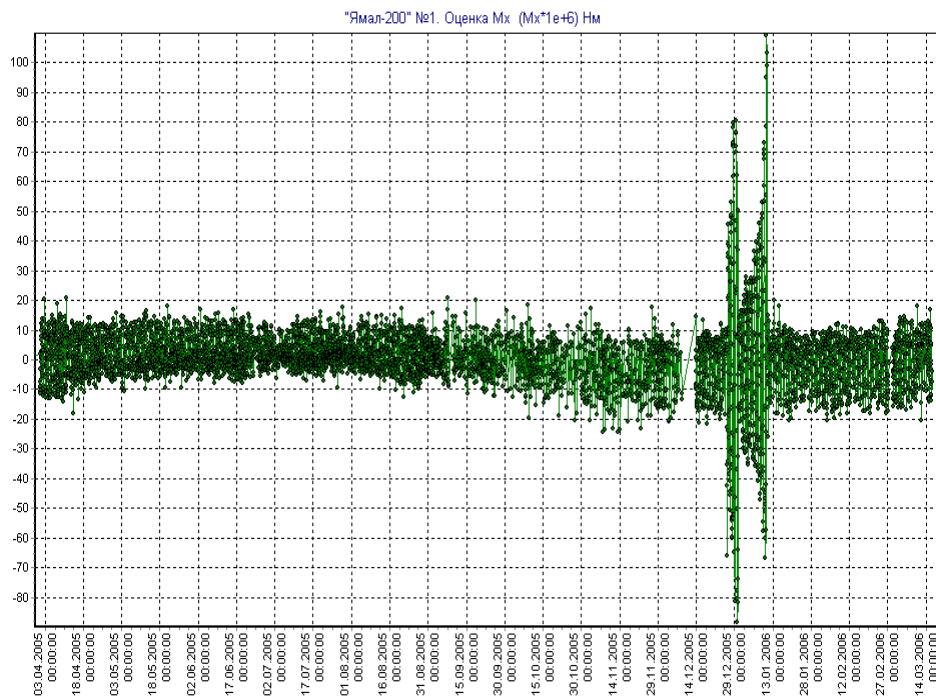


Рис. 7

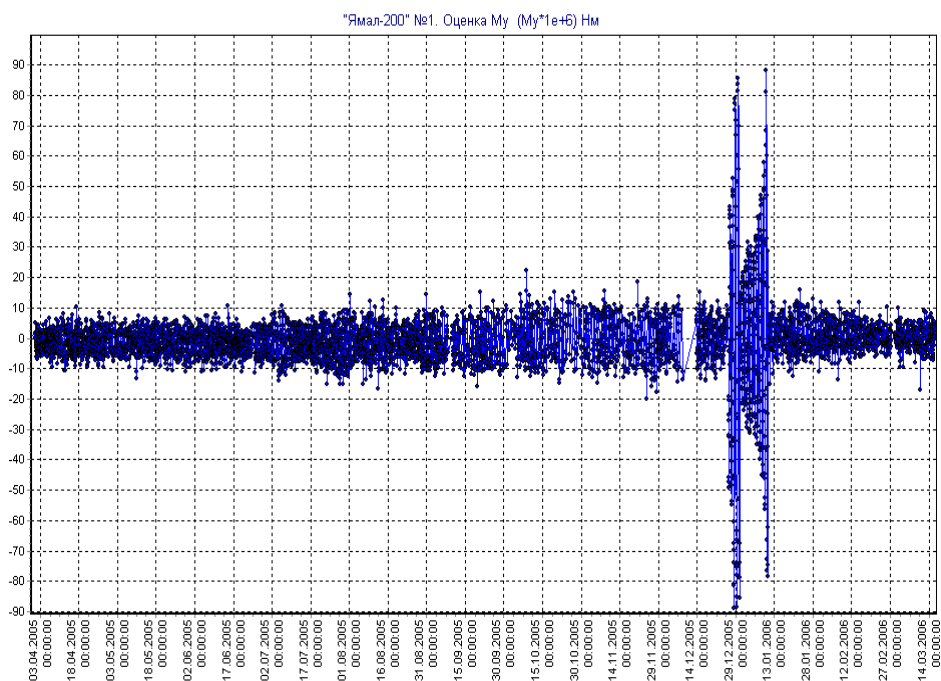


Рис. 8

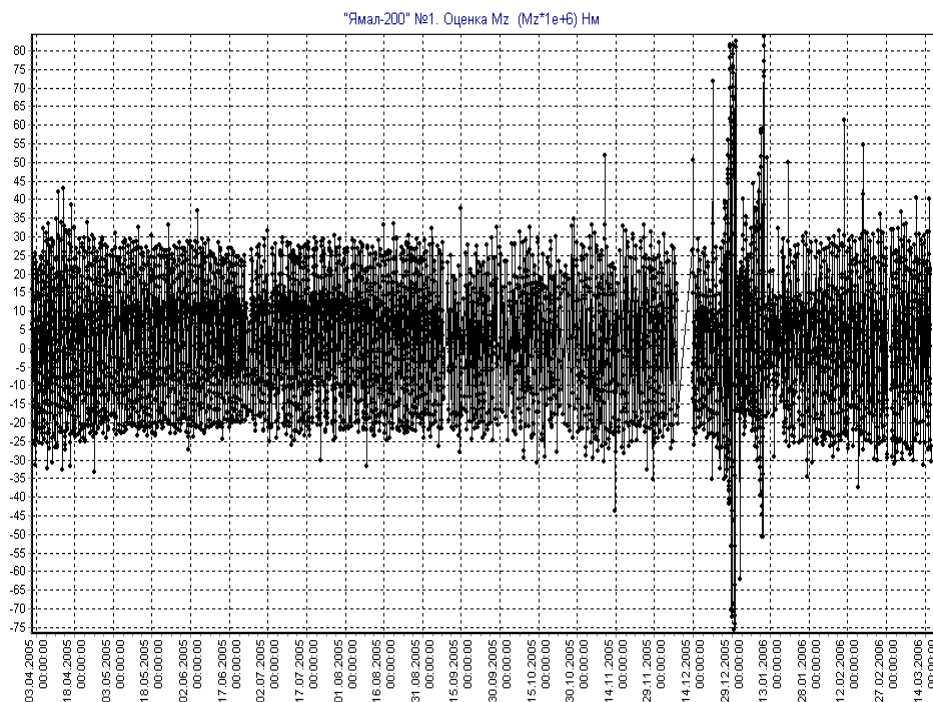


Рис. 9

Анализ полученных в результате обработки данных показал, что основными причинами вариации внешних моментов являются суточные его изменения, как и ожидалось в аналитическом исследовании. Сравнение измерений, выполненное на трехлетнем интервале (2004 – 2006 годы), показало достаточно хорошую повторяемость суточных изменений внешнего момента, тем не менее сезонные (годовые) его изменения также необходимо было оценить.

Нужно заметить, что на представленных данных есть аномально высокие возмущения на границе 2005 – 2006 годов, не повторившиеся на следующих годах, связанные, видимо, с солнечным излучением.

Анализ этих данных показал, что хотя сезонные изменения имеют место, величина и скорость этих изменений позволяют ввести достаточно простую их аппроксимацию.

Кроме того, необходимо учитывать тот факт, что в периоды времени, близкие к весеннему и осеннему равноденствиям, появляются теневые участки орбиты, на которых внешние моменты изменяются и это нужно учитывать в математической модели.

3. Внедрение модели действующих моментов в бортовое программное обеспечение режима «прогноз»

Анализ полученных экспериментальных данных по внешним возмущающим моментам показал, что достаточно точным их представлением может служить табличное их задание в виде постоянных величин на определенном интервале времени. По результатам расчётов моментов за 3 года были сформированы табли-

цы возмущающих моментов, которые описывают изменение компонент момента в течение года с шагом 30 минут (табл. 1 иллюстрирует такое изменение в марте месяце). Был выбран интервал времени в полчаса, на котором внешний момент принимался постоянным.

Таблица 1

КА «Ямал-200» № 1

M_x (Нм)			M_y (Нм)			M_z (Нм)		
0:59:09	-2.34590058686274	$\cdot 10^{-6}$	0:59:09	3.19350757338138	$\cdot 10^{-6}$	0:59:09	1.06392140379532	$\cdot 10^{-5}$
1:29:09	-4.16967332770144	$\cdot 10^{-6}$	1:29:09	3.51510955924068	$\cdot 10^{-6}$	1:29:09	5.91524035402144	$\cdot 10^{-6}$
1:59:09	-6.08148725971383	$\cdot 10^{-6}$	1:59:09	3.62839272766736	$\cdot 10^{-6}$	1:59:09	1.97664756389053	$\cdot 10^{-6}$
2:29:09	-7.79449936083288	$\cdot 10^{-6}$	2:29:09	3.54713054942499	$\cdot 10^{-6}$	2:29:09	-1.17585631124855	$\cdot 10^{-6}$
2:59:09	-9.27920755835184	$\cdot 10^{-6}$	2:59:09	3.33753842539316	$\cdot 10^{-6}$	2:59:09	-3.76910397818434	$\cdot 10^{-6}$
3:29:09	-1.05846642919321	$\cdot 10^{-5}$	3:29:09	3.07641529225083	$\cdot 10^{-6}$	3:29:09	-6.07114866658602	$\cdot 10^{-6}$
3:59:09	-1.16934803901124	$\cdot 10^{-5}$	3:59:09	2.83877165019093	$\cdot 10^{-6}$	3:59:09	-8.36441033723945	$\cdot 10^{-6}$
4:29:09	-1.23471016290890	$\cdot 10^{-5}$	4:29:09	2.69070056558294	$\cdot 10^{-6}$	4:29:09	-1.09820247087903	$\cdot 10^{-5}$
4:59:09	-1.26381656328098	$\cdot 10^{-5}$	4:59:09	2.65498280116853	$\cdot 10^{-6}$	4:59:09	-1.40495822105069	$\cdot 10^{-5}$
5:29:09	-1.29491320699835	$\cdot 10^{-5}$	5:29:09	2.69353341419746	$\cdot 10^{-6}$	5:29:09	-1.74354596222443	$\cdot 10^{-5}$
5:59:09	-1.32491616355497	$\cdot 10^{-5}$	5:59:09	2.74413836562402	$\cdot 10^{-6}$	5:59:09	-2.07792554048565	$\cdot 10^{-5}$
6:29:09	-1.34056162303746	$\cdot 10^{-5}$	6:29:09	2.74043077589416	$\cdot 10^{-6}$	6:29:09	-2.36745736404243	$\cdot 10^{-5}$
6:59:09	-1.32838728117880	$\cdot 10^{-5}$	6:59:09	2.62816818818481	$\cdot 10^{-6}$	6:59:09	-2.56719950579887	$\cdot 10^{-5}$
7:29:09	-1.27423746946181	$\cdot 10^{-5}$	7:29:09	2.40412742047909	$\cdot 10^{-6}$	7:29:09	-2.61695456425209	$\cdot 10^{-5}$
7:59:09	-1.17412440740278	$\cdot 10^{-5}$	7:59:09	2.11519892638714	$\cdot 10^{-6}$	7:59:09	-2.49905807901813	$\cdot 10^{-5}$
8:29:09	-1.04388602261808	$\cdot 10^{-5}$	8:29:09	1.82539400568527	$\cdot 10^{-6}$	8:29:09	-2.26202443302498	$\cdot 10^{-5}$
8:59:09	-8.98345182565423	$\cdot 10^{-6}$	8:59:09	1.53890252924221	$\cdot 10^{-6}$	8:59:09	-1.9333699626052	$\cdot 10^{-5}$
9:29:09	-7.50440541789356	$\cdot 10^{-6}$	9:29:09	1.24482579416021	$\cdot 10^{-6}$	9:29:09	-1.53216468684134	$\cdot 10^{-5}$
9:59:09	-6.10717083576433	$\cdot 10^{-6}$	9:59:09	9.30657212129550	$\cdot 10^{-7}$	9:59:09	-1.09121330983690	$\cdot 10^{-5}$
10:29:09	-4.81019213464524	$\cdot 10^{-6}$	10:29:09	5.77996132939688	$\cdot 10^{-7}$	10:29:09	-6.95164798580219	$\cdot 10^{-6}$
10:59:09	-3.59606912347959	$\cdot 10^{-6}$	10:59:09	1.77410387009288	$\cdot 10^{-7}$	10:59:09	-4.02973978125100	$\cdot 10^{-6}$
11:29:09	-2.16723491935164	$\cdot 10^{-6}$	11:29:09	-2.71346017962017	$\cdot 10^{-7}$	11:29:09	-1.93079704472502	$\cdot 10^{-6}$
11:59:09	-2.80340535947495	$\cdot 10^{-7}$	11:59:09	-7.68875535423250	$\cdot 10^{-7}$	11:59:09	-2.35003631279414	$\cdot 10^{-7}$
12:29:09	1.91725650298287	$\cdot 10^{-6}$	12:29:09	-1.31132974683075	$\cdot 10^{-6}$	12:29:09	1.39414188089627	$\cdot 10^{-6}$
12:59:09	3.91853423297936	$\cdot 10^{-6}$	12:59:09	-1.88516269794861	$\cdot 10^{-6}$	12:59:09	3.13266539583555	$\cdot 10^{-6}$
13:29:09	5.18596662153281	$\cdot 10^{-6}$	13:29:09	-2.45391614907004	$\cdot 10^{-6}$	13:29:09	4.91382731633138	$\cdot 10^{-6}$
13:59:09	5.79005302763499	$\cdot 10^{-6}$	13:59:09	-2.93242385518640	$\cdot 10^{-6}$	13:59:09	6.13628746778388	$\cdot 10^{-6}$
14:29:09	6.37996351033612	$\cdot 10^{-6}$	14:29:09	-3.22755110453962	$\cdot 10^{-6}$	14:29:09	6.14592755340617	$\cdot 10^{-6}$
14:59:09	7.04641386427361	$\cdot 10^{-6}$	14:59:09	-3.36900292796532	$\cdot 10^{-6}$	14:59:09	5.29951916226987	$\cdot 10^{-6}$
15:29:09	7.73500304281715	$\cdot 10^{-6}$	15:29:09	-3.41632874036154	$\cdot 10^{-6}$	15:29:09	4.19547356891890	$\cdot 10^{-6}$
15:59:09	8.37466228317082	$\cdot 10^{-6}$	15:59:09	-3.39373306405551	$\cdot 10^{-6}$	15:59:09	3.47287588096255	$\cdot 10^{-6}$
16:29:09	8.83753139126534	$\cdot 10^{-6}$	16:29:09	-3.43167208041160	$\cdot 10^{-6}$	16:29:09	3.91086027112148	$\cdot 10^{-6}$
16:59:09	9.14392760591569	$\cdot 10^{-6}$	16:59:09	-3.43905257862015	$\cdot 10^{-6}$	16:59:09	5.90024806746166	$\cdot 10^{-6}$
17:29:09	9.44650798710640	$\cdot 10^{-6}$	17:29:09	-3.42544449343409	$\cdot 10^{-6}$	17:29:09	9.29535127651703	$\cdot 10^{-6}$
17:59:09	9.76835174552686	$\cdot 10^{-6}$	17:59:09	-3.39373306405551	$\cdot 10^{-6}$	17:59:09	1.36620345396431	$\cdot 10^{-5}$
18:29:09	1.00975185926402	$\cdot 10^{-5}$	18:29:09	-3.35262929171031	$\cdot 10^{-6}$	18:29:09	1.85148222258311	$\cdot 10^{-5}$
18:59:09	9.81649303321793	$\cdot 10^{-6}$	18:59:09	-3.22172697472599	$\cdot 10^{-6}$	18:59:09	2.36286146925611	$\cdot 10^{-5}$
19:29:09	9.39182828656182	$\cdot 10^{-6}$	19:29:09	-3.11016332131791	$\cdot 10^{-6}$	19:29:09	2.78823074405824	$\cdot 10^{-5}$
19:59:09	8.74434270372166	$\cdot 10^{-6}$	19:59:09	-2.99564713621724	$\cdot 10^{-6}$	19:59:09	3.02802877991046	$\cdot 10^{-5}$
20:29:09	7.87479866234943	$\cdot 10^{-6}$	20:29:09	-2.80641293938765	$\cdot 10^{-6}$	20:29:09	3.02032685077087	$\cdot 10^{-5}$
20:59:09	6.90990839138591	$\cdot 10^{-6}$	20:59:09	-2.48414513600020	$\cdot 10^{-6}$	20:59:09	2.83357783784354	$\cdot 10^{-5}$
21:29:09	5.98456476261238	$\cdot 10^{-6}$	21:29:09	-1.97584167307599	$\cdot 10^{-6}$	21:29:09	2.56567470329884	$\cdot 10^{-5}$
21:59:09	5.14215519198579	$\cdot 10^{-6}$	21:59:09	-1.26748448168853	$\cdot 10^{-6}$	21:59:09	2.29923044596782	$\cdot 10^{-5}$
22:29:09	4.06459806854379	$\cdot 10^{-6}$	22:29:09	-5.01805563485325	$\cdot 10^{-7}$	22:29:09	2.05402835631515	$\cdot 10^{-5}$
22:59:09	2.69332286758949	$\cdot 10^{-6}$	22:59:09	1.68894878743683	$\cdot 10^{-7}$	22:59:09	1.82887469499308	$\cdot 10^{-5}$
23:29:09	1.42326448201955	$\cdot 10^{-6}$	23:29:09	6.85666334169653	$\cdot 10^{-7}$	23:29:09	1.62521947464103	$\cdot 10^{-5}$
23:59:09	3.74965782316967	$\cdot 10^{-7}$	23:59:09	1.08161134610087	$\cdot 10^{-6}$	23:59:09	1.43579776120330	$\cdot 10^{-5}$
0:29:09	-5.14399632579725	$\cdot 10^{-6}$	0:29:09	1.41463640662694	$\cdot 10^{-6}$	0:29:09	1.25156983079285	$\cdot 10^{-5}$

Такая таблица записывается в память бортовой ЦВМ, и бортовая программа использует табличные данные, сменяемые через заданные интервалы времени, для формирования виртуальной модели возмущения.

Для того чтобы учесть сезонные изменения, используется 9 таких таблиц, переход от одной к последующей также привязан к времени (годовому). Таблицы были составлены для каждого аппарата «Ямал-201» и «Ямал-202», начало временных интервалов отсчитывалось от точки начала года: 01.01.2004 г., 01.01.2005 г., 01.01.2006 г. и т.д.

Моменты в тени формировались аналогичным образом. Значения моментов для КА «Ямал-201», к примеру, оказались постоянными: $M_d = (0,0000008; -0,0000035; 0,000005)$ Н·м. В бортовом программном обеспечении выполняется расчет навигационных данных для формирования углового положения ОСК, кроме того, рассчитывается факт захождения и выхода КА из тени Земли. По этому признаку осуществляется переход от одной схемы формирования момента к другой.

Стандартное отклонение полученных оценок имеет порядок $10^{-8} \dots 10^{-9}$ Н·м. Описанный метод позволил получить достаточно точные результаты, избежав при этом необходимости делать сложные расчёты, используя аналитические выражения, содержащие величины, точные значения которых неизвестны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бранец В.Н., Севастьянов Н.Н., Федулов Р.В. Лекции по теории систем ориентации, управления движением и навигации космических аппаратов: учеб. пособие. Томск: ТГУ, 2013. 308 с.
2. Севастьянов Н.Н. Разработка концепции, обобщение опыта создания и практики управления космическими аппаратами связи нового поколения (на примере спутниковой системы связи «Ямал»): дис. ... канд. техн. наук / ОАО «Газком», РКК «Энергия им. С.П. Королева. МВТУ им. Баумана. 2007. 158 с.
3. Севастьянов Н.Н. Концепция построения системы ориентации и управления движением спутника связи «Ямал». Штатная схема функционирования // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. № 2 (22). С. 85–96.

Статья поступила 30.05.2013 г.

Sevast'yanov N.N. Creation of A mathematical model of external disturbing moments for the "forecast" regime Of the Yamal 200 communication satellite. The nature and basic components of external disturbing moments acting on the orbiting spacecraft are considered. It is shown that only a full-scale experimental measurements provide accurate data on the acting external moments.

Keywords: Communications satellite, geostationary orbit, external disturbance moments, full-scale experimental measurements.

Sevastyanov Nikolay Nikolaevich (Tomsk State University)

E-mail: sevastyanov@gascom.ru