

***ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ТОЧНОСТИ
АСТРОИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ***

А.Б.Гавриленко, И.В. Меркурьев,
Московский энергетический институт (технический университет)

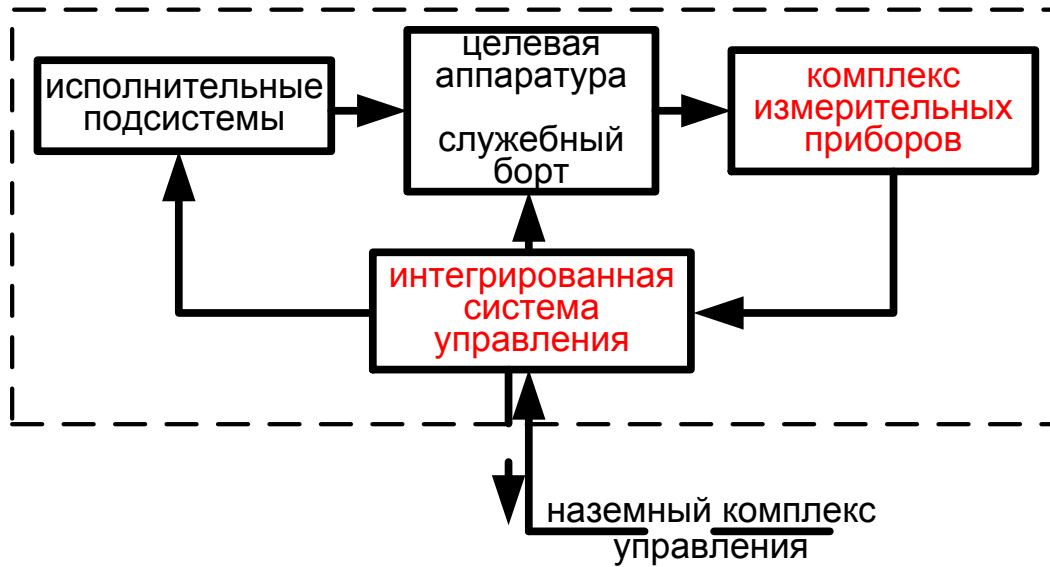
А.Г. Гладыревский, Е.Е.Семенов
ФГУП «Московское опытно-конструкторское бюро «Марс»

Докладчик
Меркурьев Игорь Владимирович
доктор технических наук,
заведующий кафедрой теоретической механики и мехатроники МЭИ (ТУ)

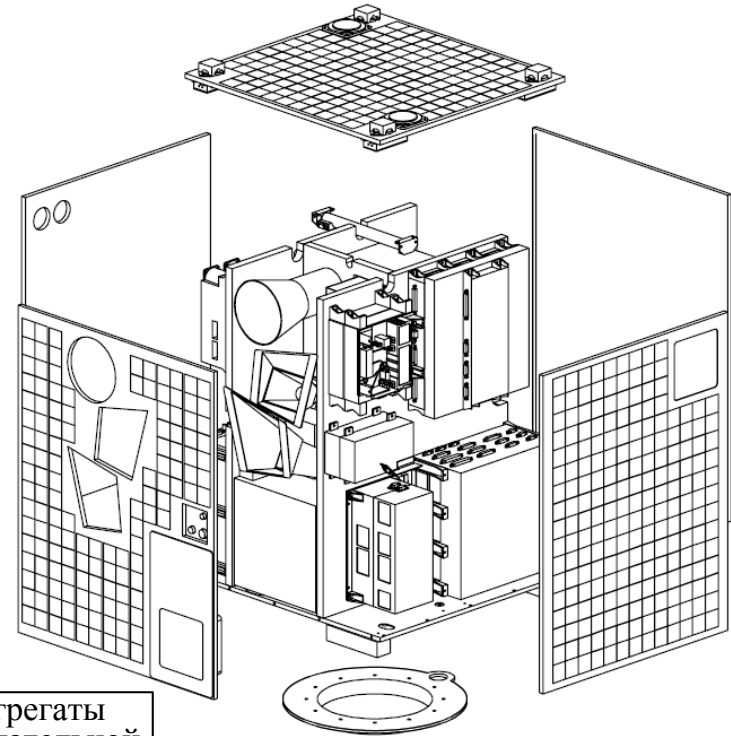
MerkuryevIV@mpei.ru

Введение

Унифицированная космическая платформа



Модульный принцип построения



Бортовой цифровой вычислительный комплекс



С.П.Королев,
Б.В.Раушенбах,
Б.Е.Черток,
В.П.Легостаев,
А.Ю.Ишлинский,
В.Д.Андреев,
Е.А.Девянин,
Д.М.Климов,
Н.А.Парусников,

Новые перспективные датчики инерциальной и внешней информации

Маятник Фуко, эффект Брайана

Теория вибрационных гироскопов

Л.Д.Лисовский, Е.Л.Смирнов, П.Сейвет, Л.З.Новиков,
Л.И.Брозгуль, В.А.Матвеев, М.А.Павловский, А.В.Збруцкий,
Ю.К.Жбанов, В.Я.Распопов и др.

Теория волнового твердотельного гироскопа

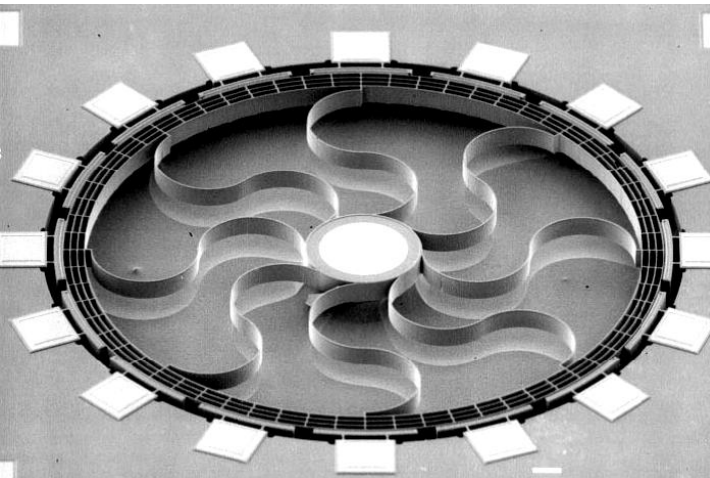
В.Ф.Журавлев, Д.М.Климов, Ю.К.Жбанов, Д. Линч,
В.А.Матвеев, В.В.Подалков, Г.М.Виноградов, Б.С. Лунин,
А.М.Павловский, М.Ю.Шаталов, С.А. Сарапулов и др.

Теория электростатического гироскопа

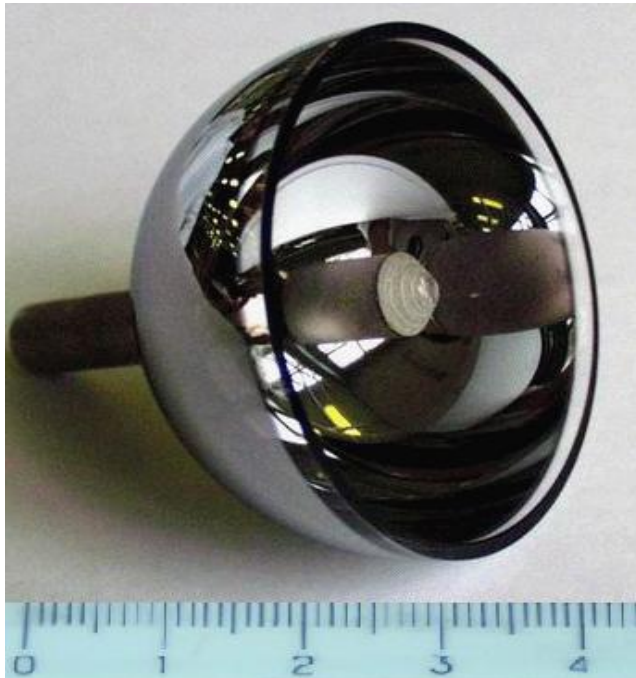
Ю.Г.Мартыненко, В.Г.Пешехонов, В.В.Подалков, Б.Е.Ландау,
В.З.Гусинский, А.С.Анфиногенов, В.Н.Комаров и др.

Теория оптико-электронных звездных приборов

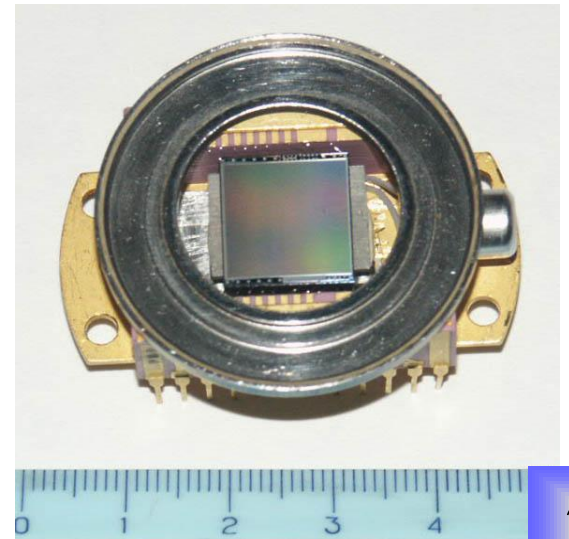
Л.Ф. Порфирьев, В.В. Малинин, В.Ф.Худов и др.



микромеханический,



волновой твердотельный и электростатический гироскоп,



звездные датчик

Новые космические программы

Кассини-Гюйгенс (*Cassini-Huygens*) —

первый искусственный спутник Сатурна с навигационной системой на базе **ВТГ**.

Запущен 15.10.1997 г. Полетное задание до 2012г.

Бюджет проекта более \$3 млрд.

*NASA, ESA,
Northrop Grumman,
Litton Guidance,
Sagem, BAE,
Draper Laboratory,
Systron Donner,
Analog Devices, Murata,
Rockwell,*

ClearView и **NextView** —

программы дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения,

эксперимент по проверке общей теории относительности с помощью спутника с навигационной системой на **ЭСГ**.

*Фед.косм. агентство
РКК «Энергия»,
РНИИ КП, ЦНИИмаш,
ЦСКБ «Прогресс»,
и др.*

Nanospace experiment program —

сверхмалые спутники на базе технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) с навигационной системой на базе **ММГ**.

КРИТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ РФ

Авиационная и ракетно-космическая техника,

Микросистемная техника

Структура доклада

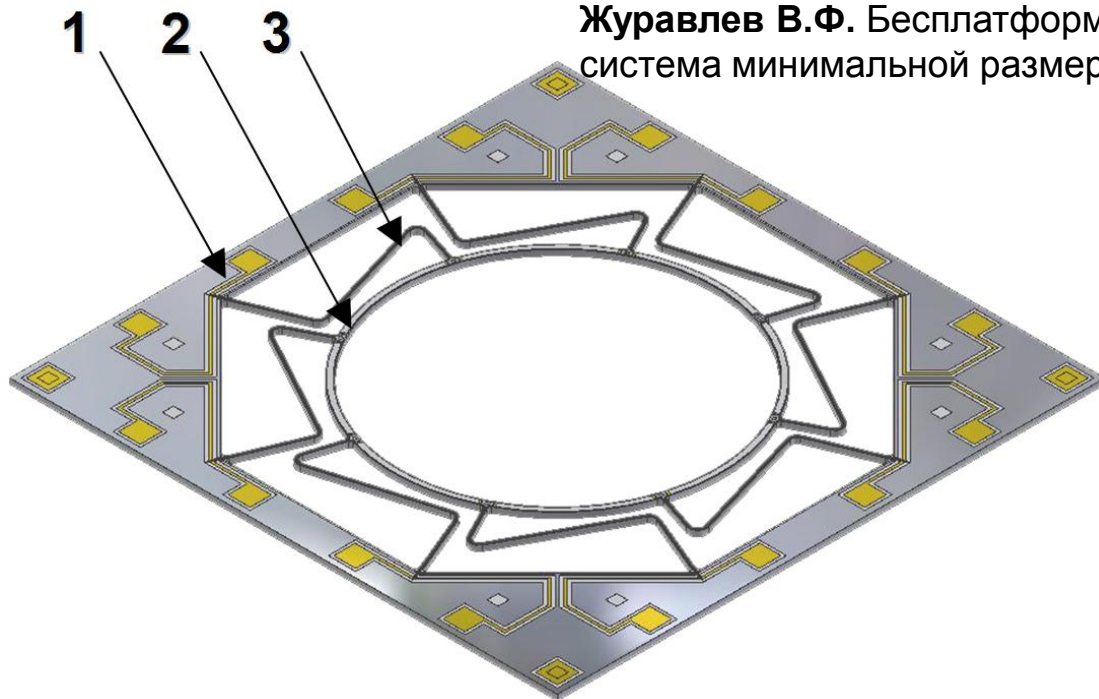
1. Динамика и модели погрешностей микромеханического вибрационного гироскопа с кольцевым резонатором.
2. Динамика волнового твердотельного гироскопа с полусферическим резонатором. Результаты стендовых испытаний
3. Разработка алгоритмического и программного обеспечения навигационной системы малого космического аппарата

Динамика кольцевого резонатора волнового твердотельного гироскопа с учетом нелинейных упругих свойств материала

Бryan, G.H. On the Beats in the Vibrations of a Revolving Cylinder or Bell. -Proc. Camb. Phil. Soc. Math. Phys Sci., 1890, vol.7, pp. 101-111

Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Волновой твердотельный гироскоп

Журавлев В.Ф. Бесплатформенная инерциальная навигационная система минимальной размерности. Изв.РАН МТТ, 2005



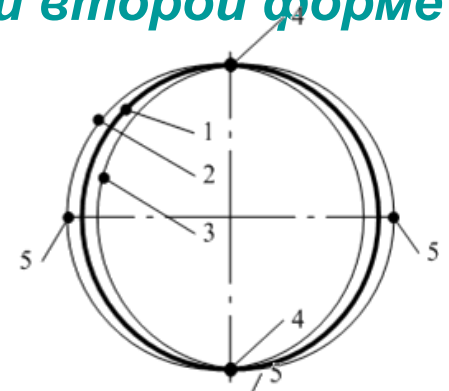
$$\rho RS \ddot{v} + 2\Omega\dot{w} + V_x\Omega \cos \varphi \beta + V_y\Omega \sin \varphi - \dot{V}_x \sin \varphi + \dot{V}_y \cos \varphi + \frac{EI}{R^3} w^{III} - v'' + e_* \dot{w}^{III} - \dot{v}'' \equiv \lambda' = 0,$$

$$\rho SR \ddot{w} - 2\Omega\dot{v} + V_x\Omega \sin \varphi - V_y\Omega \cos \varphi + \dot{V}_x \cos \varphi + \dot{V}_y \sin \varphi + \frac{EI}{R^3} \left[w^{IV} - v^{III} + e_* \dot{w}^{IV} - \dot{v}^{III} \right] + c w + c_* \dot{w} + \lambda + Rq = 0,$$

Уравнения колебаний резонатора по первой и второй форме

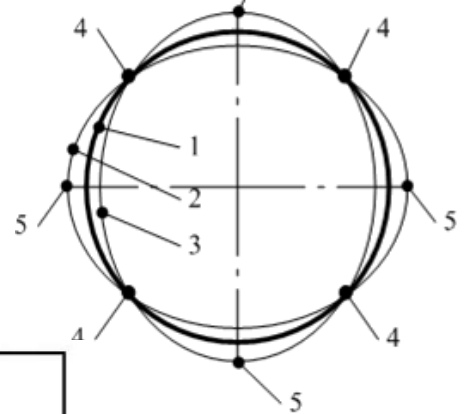
$$\left. \begin{aligned} \ddot{f}_1 - 2\Omega\dot{g}_1 + \gamma_1\dot{f}_1 + \omega_{1f}^2 f_1 &= -\dot{V}_y - \Omega V_x - \frac{b}{2}\bar{u}_1, \\ \ddot{g}_1 + 2\Omega\dot{f}_1 + \gamma_1\dot{g}_1 + \omega_{1g}^2 g_1 &= \dot{V}_x - \Omega V_y + \frac{b}{2}u_1, \end{aligned} \right\}$$

k=1

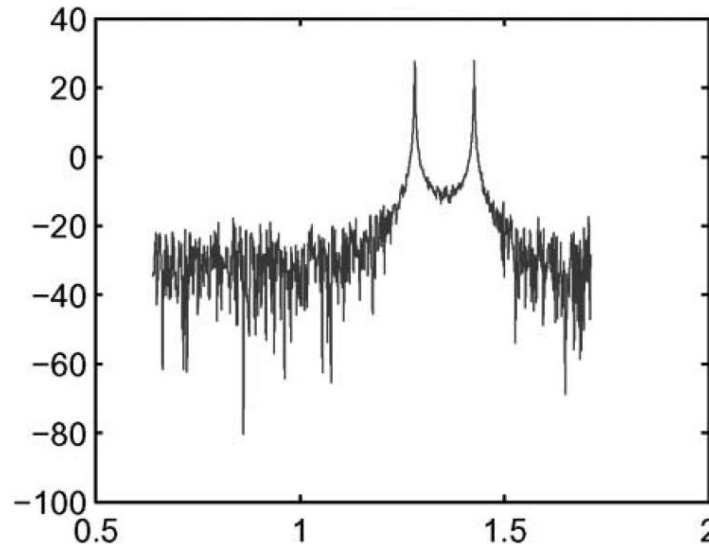
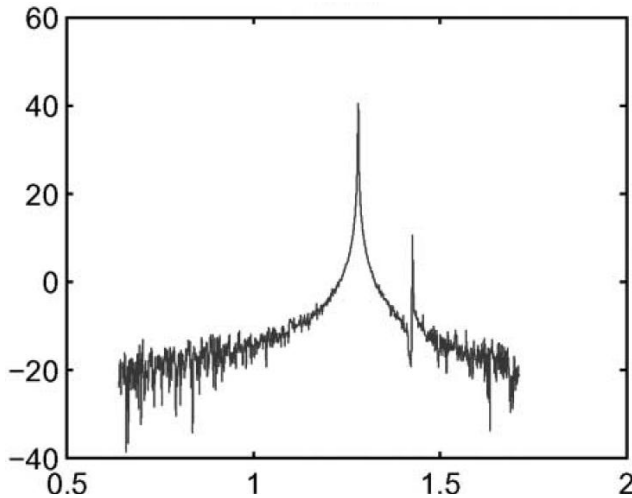


$$\left. \begin{aligned} \ddot{f}_2 - \frac{8}{5}\Omega\dot{g}_2 + \gamma_2\dot{f}_2 + \omega_{2f}^2 f_2 &= -\frac{2}{5}b\bar{u}_2, \\ \ddot{g}_2 + \frac{8}{5}\Omega\dot{f}_2 + \gamma_2\dot{g}_2 + \omega_{2g}^2 g_2 &= \frac{2}{5}bu_2, \end{aligned} \right\}$$

k=2

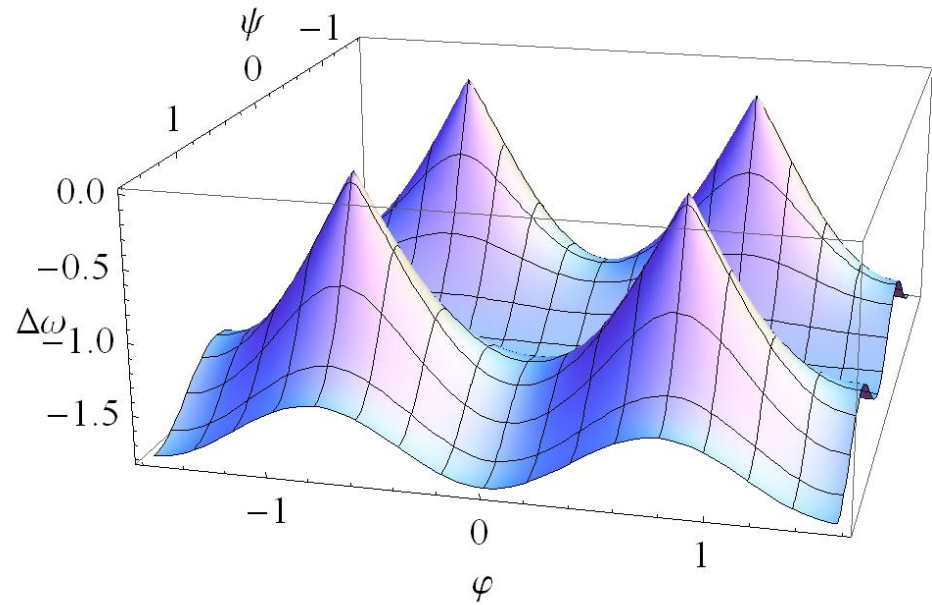
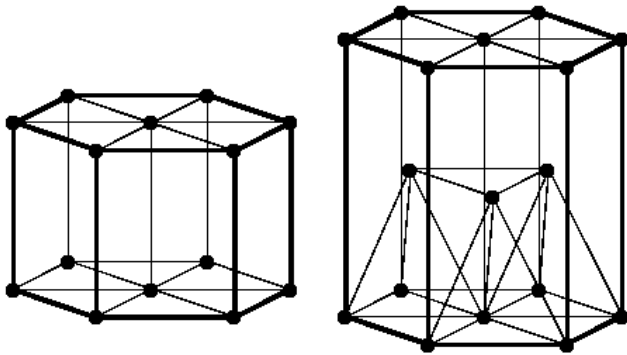


Амплитудно-частотные характеристики



Влияние упругой анизотропии монокристалла на собственные частоты резонатора

Монокристалл гексагональной симметрии

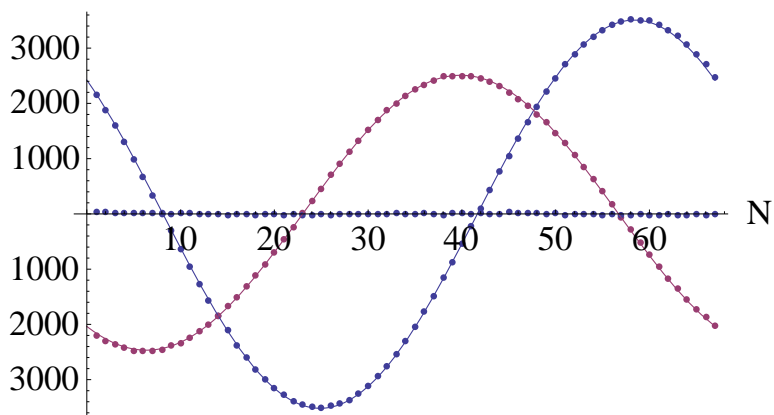
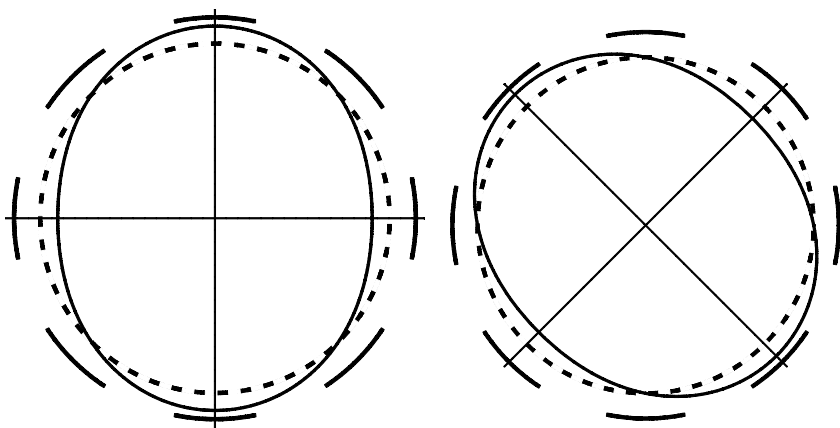
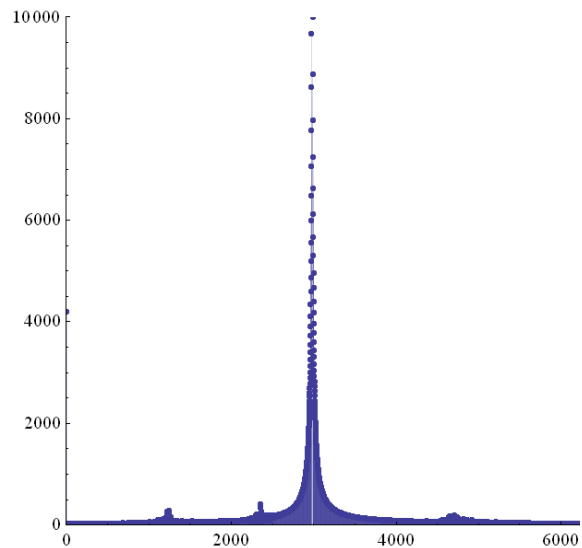


Величина раздвоения частот от ориентации резонатора в кристаллографических осях

$$\ddot{f}_k + \omega_k^2 [1 + \varepsilon(\mathcal{G}_k + \bar{\mathcal{G}}_k) f_k] = 0,$$

$$\ddot{g}_k + \omega_k^2 [1 + \varepsilon(\mathcal{G}_k - \bar{\mathcal{G}}_k) g_k] = 0.$$

Динамика волнового твердотельного гироскопа



Нормальные формы упругих колебаний свободной кромки резонатора

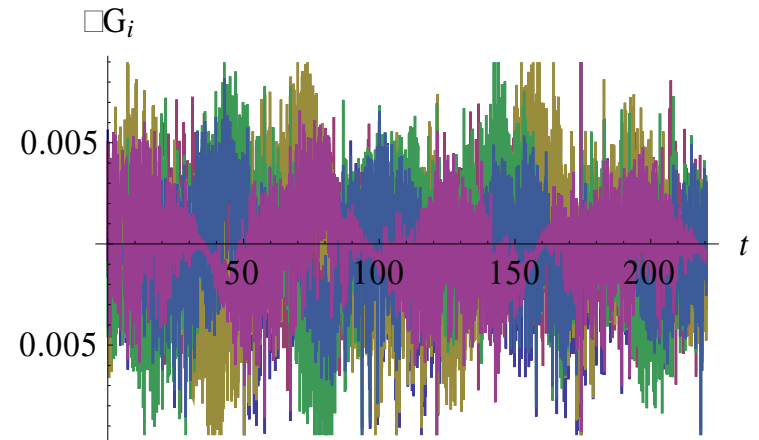
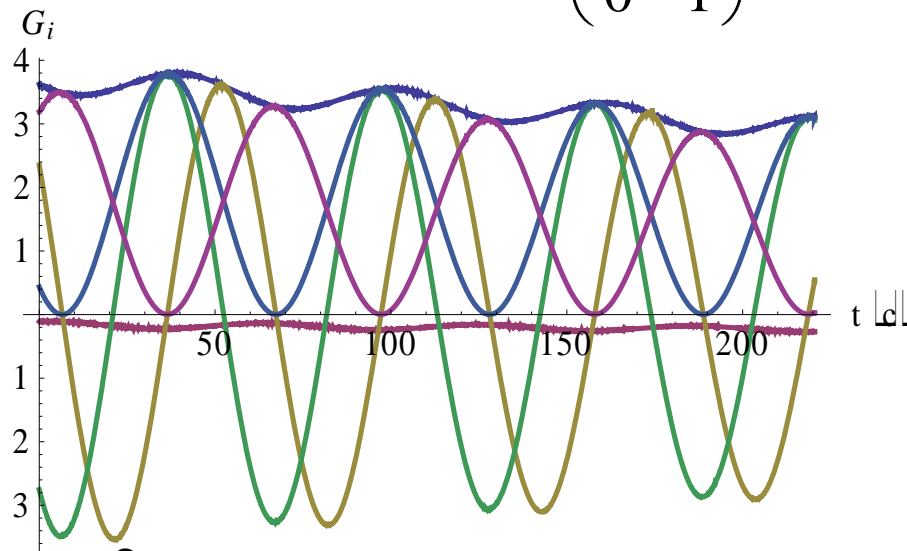
Идентификация параметров математической модели волнового твердотельного гироскопа

$$\ddot{\mathbf{x}} + \omega^2 \mathbf{x} = \mathbf{q}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}), \quad \text{Вектор измерения } \mathbf{x} = (f, g)^T$$

$$\mathbf{q} = C + N + H \mathbf{x} + D + G + F \dot{\mathbf{x}}$$

$$C = c \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad N = n \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad H = h \begin{pmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{pmatrix},$$

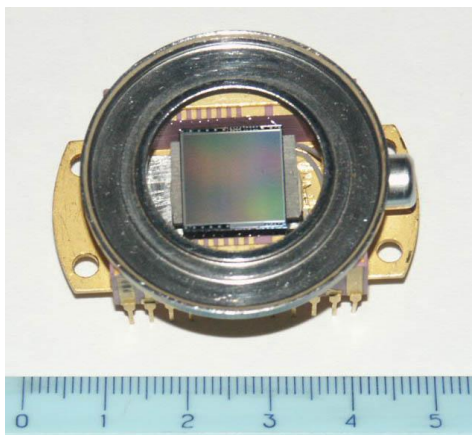
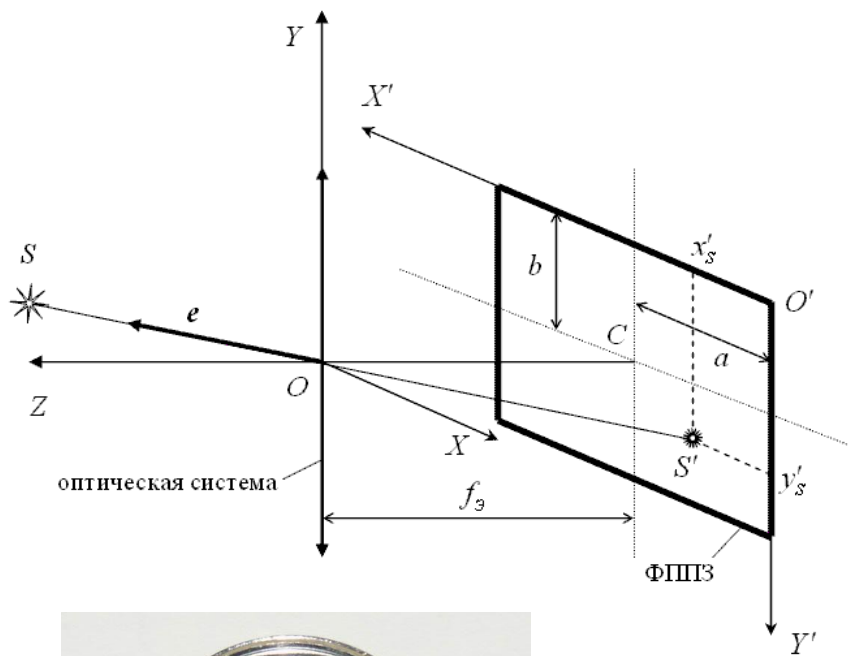
$$D = \gamma \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad G = v \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad F = g \begin{pmatrix} \cos 2\beta & \sin 2\beta \\ \sin 2\beta & -\cos 2\beta \end{pmatrix},$$



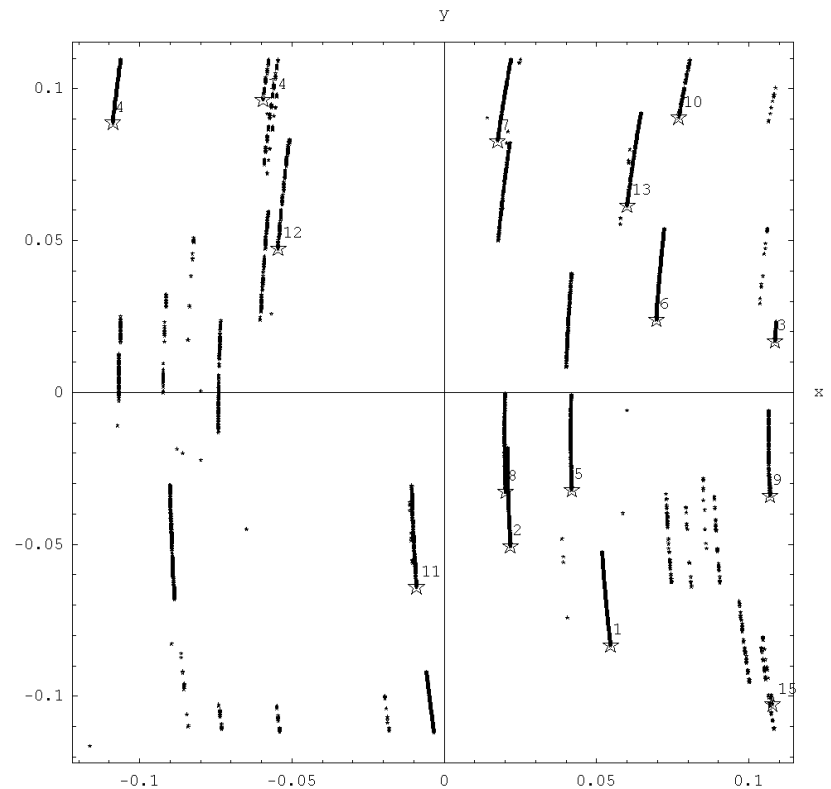
Экспериментальные данные предоставлены
ЗАО «Инерциальные технологии Технокомплекса» г.Раменское

Разработка алгоритмического и программного обеспечения навигационной системы космического аппарата

Алгоритмы обработки первичной измерительной информации звездного датчика



Звездный датчик, Московское КБ «Марс»

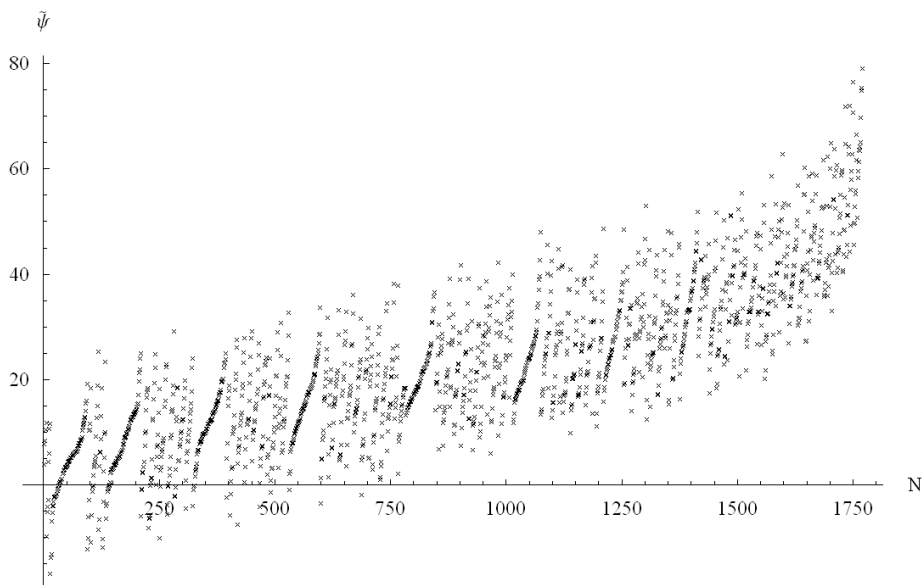


Треки навигационных звезд в поле зрения звездного датчика

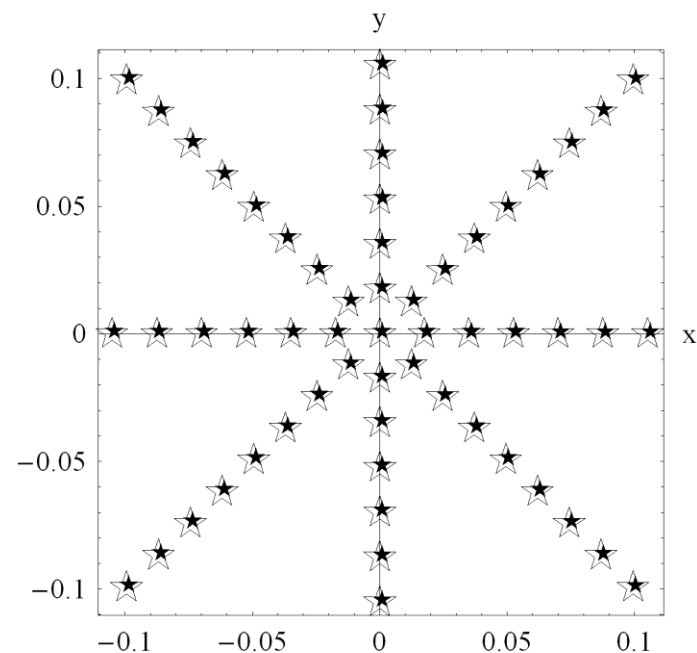
Калибровка инструментальных погрешностей звездного датчика

Разработка модели систематических ошибок измерений звездного датчика

$$\begin{aligned}\tilde{x} &= \nu_1 + \nu_3 x - \delta_1 xy + \delta_2 x^2 + \delta_3 y + (\mu_1 + \mu_2 s + \mu_3 s^2)x\sqrt{1+s^2}, \\ \tilde{y} &= \nu_2 + \nu_3 y - \delta_1 y^2 + \delta_2 xy - \delta_3 x + (\mu_1 + \mu_2 s + \mu_3 s^2)y\sqrt{1+s^2}, \\ s^2 &= x^2 + y^2\end{aligned}\quad (18)$$



Расчетные и измеренные координаты на фотоприемной матрице



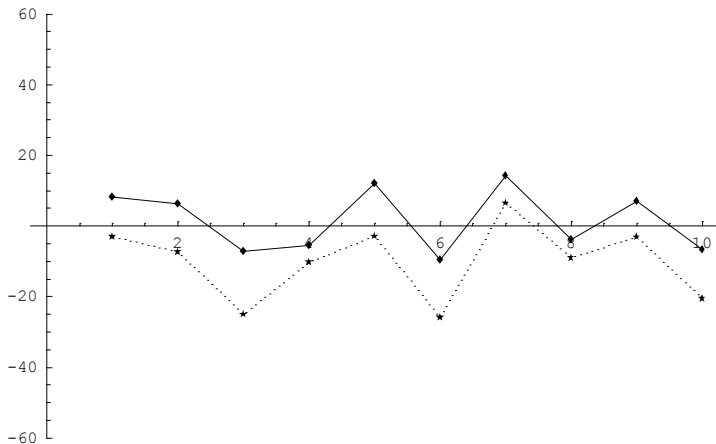
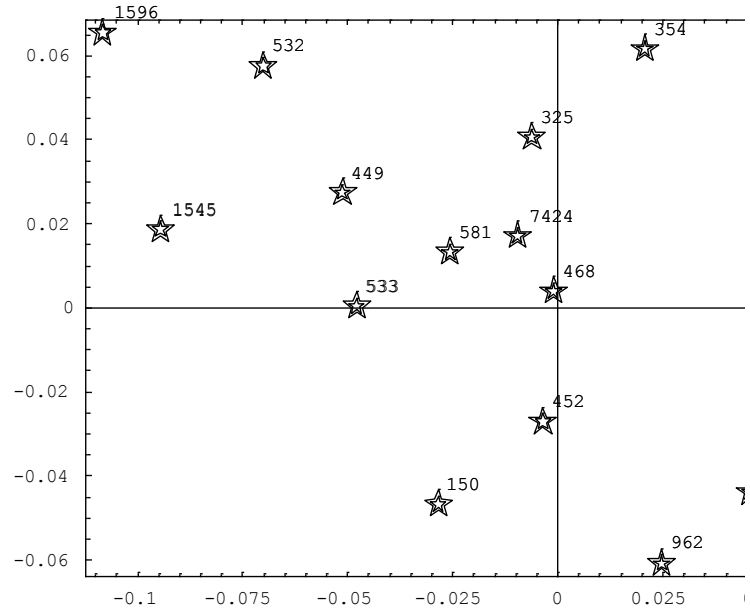
Методика полетной калибровки звездного датчика

$$\mathbf{r} = (x, y, 1)^T, \quad \mathbf{r}' = (x', y', 1)^T$$

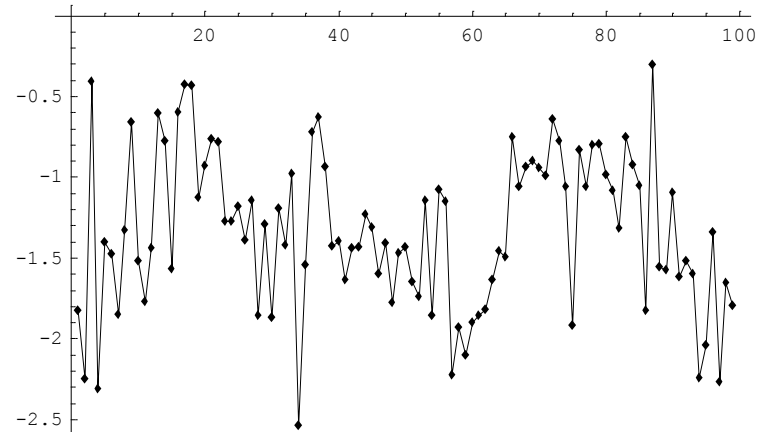
$$\mathbf{r}'_i, \mathbf{r}'_j = \frac{1 + x'_i x'_j + y'_i y'_j}{(1 + (x'_i)^2 + (y'_i)^2)(1 + (x'_j)^2 + (y'_j)^2)}$$

$$\tilde{x} = x' - x, \quad \tilde{y} = y' - y,$$

$$\sigma^{(i,j)} = \mathbf{r}'_i, \mathbf{r}'_j - \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$$



Невязки в определении углов между звездами



Поправки к эквивалентному
фокусному расстоянию

Заключение

- Построены математические модели микромеханического и волнового твердотельного гироскопов.
- Рассчитаны уходы из-за нелинейных упругих свойств материала, конечных деформаций резонатора.
- Предложены меры направленные на повышение точности гироскопа:
 - алгоритмы аналитической компенсации систематического ухода в режиме свободных колебаний.
 - алгоритмы обработки измерений и управления в режиме вынужденного и управляемого движения.
- Получены расчетные формулы для масштабного коэффициента, собственной частоты анизотропного резонатора.
- Сформулированы требования по точности изготовления анизотропного резонатора.

Разработана методика обработки первичных измерительных данных гироскопов и оптико-электронных приборов в целях аналитической компенсации систематических погрешностей.

- Разработан испытательный стенд для комплексной отладки бортового программного обеспечения астроинерциальной навигационной системы

Внедрение

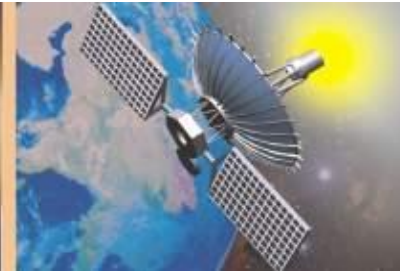
Алгоритмическое и программное обеспечение

- цифрового имитатора комплекса командных приборов РБ «Бриз-М»,
- оптико-электронного звездного датчика,
- автономных и комплексных стендовых испытаний датчиков МКА
Московское КБ «Марс» Федерального космического агентства РФ

Алгоритмическое и программное обеспечение

калибровки параметров модели уходов ММГ и ВТГ.
обработка экспериментальных данных ММГ и ВТГ.

«Инерциальные технологии Технокомплекса» г.Раменское



Монитор-Э

КазСат

Электро-Л

Спектр-Р

