

3. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / О. Н. Анучин, Г. И. Емельянцев, под общ. ред. чл.-кор. РАН В. Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ «ЦНИИ „Электроприбор“», 2003. 309 с.

4. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распапов, под общ. ред. д-ра техн. наук В. Я. Распапова. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“», 2009. 280 с.

---

Tran Tang Duc, Dao Van Ba, Le Van Trang  
*Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»*

## OPTIMIZATION OF ALGORITHMS FOR INERTIAL NAVIGATION SYSTEM OF MOVING OBJECTS ON A WATER SURFACE

*Consider the algorithm of attitude and heading reference system (AHRS) for solving the problem of motion control of high-speed hydrofoils. Present the results of AHRS research in MATLAB environment. Investigate the error of control parameters on simulation data.*

**Attitude and heading reference system, motion control, high-speed vessels, fiber-optic gyroscope, accelerometer, magnetometer, the Kalman filter**

---

УДК 004.942:53.082.4

Д. П. Лукьянов, С. Ю. Шевченко, А. С. Кукаев, Е. П. Филиппова

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## Оценка возможностей пакета OOFELIE::Multiphysics для моделирования инерциальных датчиков на поверхностных акустических волнах

*Рассматривается потенциальная возможность применения программного пакета OOFELIE::Multiphysics для решения задач компьютерного моделирования в ЛЭТИ. Приводятся результаты, полученные на кафедре ЛИНС за время использования пробной версии данной системы.*

### CAE, поверхностные акустические волны, компьютерное моделирование, микроакселерометр

Одним из эффективных инструментов инновационных компьютерных технологий являются программные пакеты, реализующие метод конечных элементов для решения задач моделирования различных процессов и механизмов. Они получили название систем автоматизированного конструирования или CAE-систем (от англ. Computer Aided Engineering). В условиях современной промышленности компьютерное моделирование находит применение на основных стадиях производства – от научно-исследовательских разработок до организации техпроцесса изготовления конечного продукта. Ошибка в расчетах на стадии проектирования устройства может привести к серь-

езным потерям времени и денег при его производстве. Поэтому особую ценность приобретает мультифизический анализ, позволяющий учесть одновременное влияние широкого спектра воздействий на исследуемую модель.

В академических вузах методы компьютерного моделирования позволяют решать многофакторные исследовательские задачи. Одним из применений является компьютерная имитация сложных и ресурсоемких исследований, проведение которых в условиях вуза не всегда является возможным. Помимо научного применения системы компьютерного моделирования также должны стать важной частью образовательного процесса,

поскольку специалисты, владеющие таким инструментом, остро востребованы современной промышленностью. В результате системы компьютерного моделирования и соответствующие учебные программы могут укрепить существующие связи между академическими вузами и предприятиями.

На сегодняшний день на рынке представлен достаточный выбор CAE-систем, предназначенных для широкого круга пользователей. Одной из них является OOFELIE::Multiphysics производства бельгийской компании «Open Engineering».

**Описание системы.** Название OOFELIE расшифровывается как Object Oriented Finite Element Led by Interactive Executor – объектно-ориентированная система инженерного анализа методом конечных элементов с интерактивным пре-постпроцессором. На сегодняшний день рассматриваемая система способна решать задачи в следующих областях:

- механика;
- термомеханика;
- пьезоэлектрика;
- акустика;
- оптика;
- электростатика;
- электромагнетизм;
- гидродинамика и др.

Важной особенностью является то, что задачи, связанные с каждой из областей, могут решаться в комплексе, реализуя тем самым концепцию мультифизического моделирования. Отдельно

но стоит выделить возможность расчета оптических систем. Такой анализ производится в связке с известной системой ZEMAX. Последняя весьма популярна для расчета хода лучей в оптической схеме. OOFELIE, в свою очередь, позволяет оценить влияние возмущающих факторов, таких как гравитационные силы, нагрев и др., на выбранные оптические элементы. В их числе могут быть как стандартные призмы, линзы и пр., так и сложные многокомпонентные, композитные устройства. Результатом работы решателя являются значения градиента показателя преломления в элементах, а также деформации оптических поверхностей, которые в виде полиномов Цернике передаются в ZEMAX для уточнения хода оптических лучей.

Процесс решения задачи в системе OOFELIE::Multiphysics можно проиллюстрировать алгоритмом, представленным на рис. 1.

Все представленные на рисунке этапы реализуются в рамках единого рабочего окна и посредством графического интерфейса. Следует отметить, что построение сетки конечных элементов для создания численной модели является некоторым обобщением. В действительности в программе применяются различные методы, такие как метод конечных объемов, граничных элементов и др. В целом, приведенный алгоритм реализуется в большинстве современных CAE-систем и для выбора наиболее подходящей из них необходимо тщательное изучение достоинств и недостатков различных программных пакетов.



Рис. 1

Система OOFELIE::Multiphysics является достаточно молодой и в результате не имеет развитого сообщества пользователей и большого объема специализированной литературы. Взамен разработчиками предлагается квалифицированная поддержка пользователей, а также возможность адаптации системы под требования потребителя. Другими достоинствами системы являются:

- простота в освоении;
- возможность моделирования оптических схем (в связке с ZEMAX);
- сравнительно низкая стоимость лицензии.

Отдельно следует выделить готовность разработчика к сотрудничеству с потребителем [1]. В частности, компания «Open Engineering» проявила интерес к разрабатываемым на кафедре ЛИНС инерциальным микросенсорам на поверхностных акустических волнах (ПАВ). В результате аспирант А. С. Кукаев, участвующий в их разработке, прошел недельную стажировку в офисе «Open Engineering» (г. Льеж, Бельгия), а научная группа получила в свое распоряжение пробную академическую версию системы OOFELIE::Multiphysics. Кроме того, разработчиками в короткие сроки была добавлена возможность учета сил Кориолиса при решении задач пьезоэлектрики. Это было необходимо для полноценного моделирования гироскопов на ПАВ.

**Применение OOFELIE на кафедре ЛИНС.** Получение пробной версии комплекса OOFELIE::Multiphysics позволило решить ряд задач при помощи компьютерного моделирования. Рассмотрим их более подробно.

*Оценка деформаций рефлектора радиотелескопа.* В рамках одной из НИР стояла задача оценки смещения главной оси рефлекторной си-

стемы большого радиотелескопа (диаметр 20 м) под действием сил гравитации при различных углах поворота. Для решения этой задачи совместно с сотрудниками «Open Engineering» была построена упрощенная модель исследуемой системы, которая показана на рис. 2.

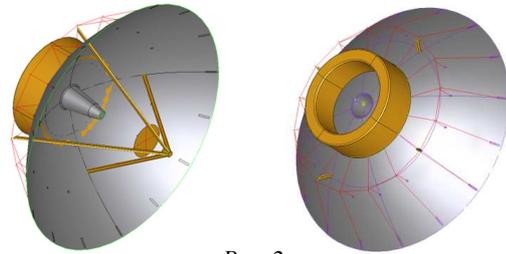


Рис. 2

Вся геометрическая модель за исключением параболической и гиперболической поверхностей отражателей была построена посредством встроенного редактора геометрии. Для корректной реализации системы опор основного отражателя в исходный код программы разработчиками был добавлен ряд новых элементов. Как и в случае с учетом ускорения Кориолиса, эти изменения были внесены всего за несколько часов. Далее созданная модель была разбита сеткой конечных элементов, как показано на рис. 3, а.

Благодаря использованию одно- и двумерных элементов число узлов сетки было сравнительно небольшим (41 936). В результате расчет такой модели на обычном компьютере занимает всего около двух минут. Результаты расчета приведены на рис. 3, б. Последовательное моделирование системы при различных углах поворота было организовано посредством задания алгоритма на языке Epilogue, интерпретатор которого встроен в OOFELIE. В результате была получена зависи-

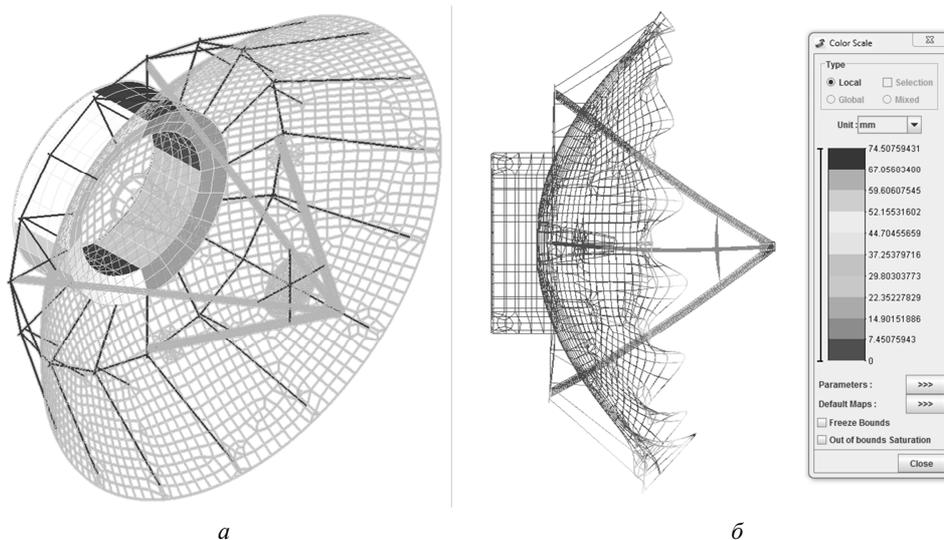


Рис. 3

мость смещения центра вторичного отражателя от угла между главной осью телескопа и горизонтом. Она приведена на рис. 4.

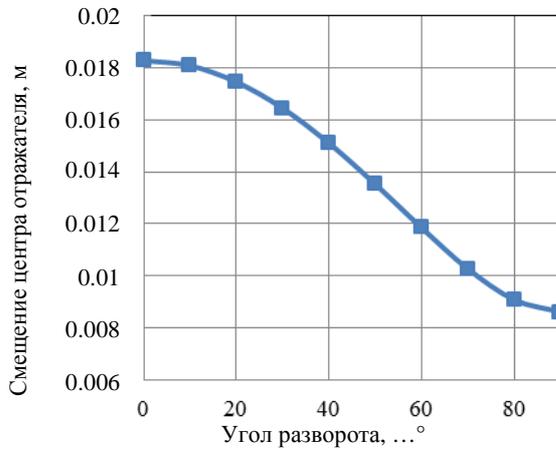


Рис. 4

Как видно из графика, наибольшее смещение достигается, когда ось рефлектора направлена параллельно линии горизонта и составляет порядка 18 мм. Впоследствии был произведен пересчет смещения центра вторичного отражателя в угол отклонения главной оси телескопа. Полученные данные хорошо согласуются с результатами, опубликованными ранее зарубежными авторами при аналогичных исследованиях [2].

*Оценка чувствительности микроакселерометра на ПАВ к линейным ускорениям.* Ключевую роль при проектировании инерциальных сенсоров на ПАВ играет оптимизация топологии чувствительного элемента (ЧЭ). Варьируя параметры инерционных масс и встречно-штыревых преобразователей, можно добиться наибольшей точности измерений, простоты конструкции датчика и необходимого частотного диапазона. Аналитический расчет таких параметров – сложная и трудоемкая задача, поэтому для оптимизации топологии целесообразно применение компьютерного моделирования. Кроме того, в процессе проектирования возникает необходимость оценки предельных эксплуатационных характеристик сенсоров. Поскольку к ударопрочности сенсоров на ПАВ предъявляются крайне жесткие требования, ее экспериментальная оценка требует значительных затрат, а в некоторых случаях вовсе невозможна. Решением является замена натуральных испытаний компьютерным моделированием.

Ранее на кафедре ЛИНС уже применялось компьютерное моделирование для нахождения оптимальной формы консоли ЧЭ микроакселерометра на ПАВ [3]. Следующим шагом стала оценка чувствительности сенсора к линейным

ускорениям. Она проводилась одновременно при помощи натуральных испытаний и компьютерного моделирования.

При помощи пакета OOFELIE::Multiphysics была построена модель чувствительного элемента микроакселерометра. Он представляет собой консоль из пьезоэлектрического материала, на противоположных сторонах которой нанесены резонаторы ПАВ с собственными частотами  $f_1$  и  $f_2$ . При действии ускорения возникает изгиб консоли, который ведет к деформациям растяжения на одной ее стороне и сжатия на другой. При этом наблюдается противоположное изменение скоростей ПАВ, бегущих по оппозитным сторонам консоли, и, соответственно, противоположный сдвиг собственных частот резонаторов  $\Delta f_1$  и  $\Delta f_2$ . Их разность является выходным сигналом датчика, по которому оценивается значение действующего ускорения. Таким образом реализуется дифференциальная схема.

На рис. 5 приведена модель ЧЭ микроакселерометра, состоящий из консоли трапецидальной формы, которая жестко закреплена с одной стороны и нагружена инерционной массой с другой. Такая конструкция обеспечивает равномерное распределение относительных деформаций по всей поверхности консоли, что значительно повышает линейность выходной характеристики.

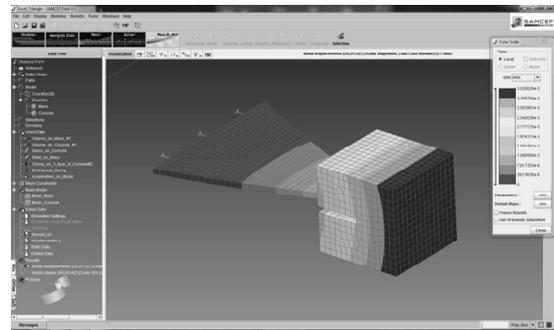


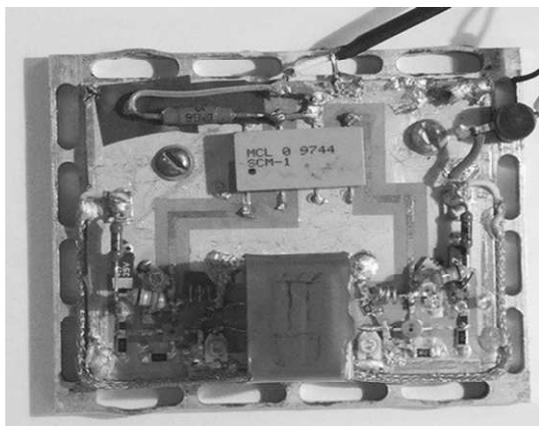
Рис. 5

Для описанной модели был произведен расчет деформаций и внутренних напряжений, возникающих в консоли при действии ускорений в диапазоне 0...4 g. Найденные значения относительных деформаций консоли были пересчитаны в значения сдвига рабочей частоты каждого из резонаторов по формуле

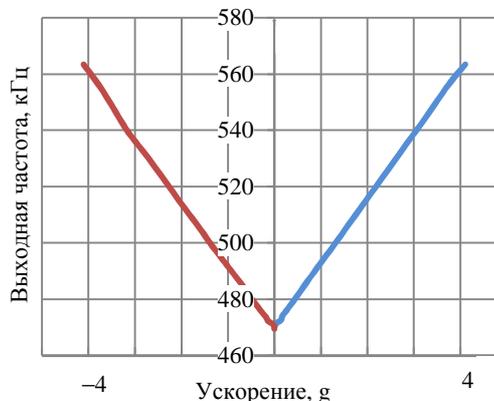
$$\Delta f_{1,2} = \frac{\Delta l}{l} f_{1,2},$$

где  $\Delta l/l$  – относительные деформации консоли. Далее были получены значения сдвига частоты выходного сигнала  $\Delta f_{\text{вых}} = \Delta f_1 - \Delta f_2$ . Результаты приведены в таблице.

Параметр	Значение							
Ускорение, g	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Относительные деформации, $\times 10^{-5}$	1.38	2.76	4.14	5.52	6.9	8.28	9.66	11
Сдвиг частоты ( $\Delta f_{\text{вых}}$ ), кГц	12	24	36	48	60	72	84	95



а



б

Рис. 6

Для экспериментальной оценки этих величин использовался макет микроакселерометра, приведенный на рис. 6, а. Сенсор устанавливался на край план-шайбы миницентрифуги. В результате на датчик действовало центростремительное ускорение  $a = \Omega^2 r$ , где  $\Omega$  – угловая скорость вращения план-шайбы центрифуги;  $r$  – расстояние от ЧЭ акселерометра до оси вращения. Выходная характеристика датчика приведена на рис. 6, б.

Сопоставление графика на рис. 6, б и данных, приведенных в таблице, показывает, что результаты моделирования находятся в соответствии с данными натурных испытаний. В дальнейшем планируется провести моделирование микрогироскопа на ПАВ с целью детальной оценки характеристик движения частиц звукопровода под действием силы Кориолиса. Также широкие возможности открываются для оптимизации топологии ЧЭ инерциальных микросенсоров на ПАВ.

В условиях современного бурно развивающегося рынка ключевым фактором становится время разработки конечного продукта. Компьютерное моделирование позволяет во многих случаях исклю-

чить дорогую и длительную стадию натурных испытаний, предоставляя тем самым преимущество перед конкурентами. Не меньшую пользу применение таких методов может принести в области научно-исследовательских работ.

Авторами была рассмотрена система мультифизического моделирования OOFELIE::Multiphysics. Ряд задач, решенных с ее помощью на кафедре ЛИНС, продемонстрировал не только потенциал данного программного пакета, но и готовность компании-разработчика к сотрудничеству и индивидуальной работе с потребителем. Этот факт, а также сравнительно низкая стоимость лицензии говорит о перспективности использования рассмотренного пакета как для решения научно-исследовательских задач, так и для образовательной деятельности. Внедрение методов компьютерного моделирования в учебные дисциплины позволит повысить качество образования студентов, их востребованность на рынке труда и, соответственно, конкурентоспособность вуза.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук, шифр МК – 6435.2014.8, договор № 14.Z56.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП ЗАО «Би Питрон». Мультифизическое моделирование – фактор успеха в современном приборостроении // CAD/CAM/CAE Observer. 2013. № 2 (78). С. 38–41.  
 2. Height bias and scale effect induced by antenna gravitational deformations in geodetic VLBI data analysis /

P. Sarti, C. Abbondanza, L. Petrov, M. Negusini // J. Geod. 2011. Vol. 85. P. 1–8.  
 3. Лукьянов Д. П. Разработка и оптимизация схемы построения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах. Ч. 1 // Гироскопия и навигация. 2005. № 2 (49). С. 79–95.

D. P. Lukyanov, S. Yu. Shevchenko, A. S. Kukaev, E. P. Filippova  
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

## ASSESSMENT OF USING OOFELIE::MULTIPHYSICS FOR MODELING SURFACE ACOUSTIC WAVE-BASED INERTIAL SENSORS

*The possibility of using software OOFELIE::Multiphysics to perform computer modeling in LETI is discussed. The results obtained at the LINS department using the trial version of the system are shown.*

**CAE, surface acoustic waves, FEM-modeling, microaccelerometer**

УДК 535.317.2

М. Е. Зацепина, В. К. Кирилловский  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики

## Исследование качества изображения объектива «Гелиос-44» количественным изофотометрическим теневым методом

*Представлено экспериментальное исследование объектива «Гелиос-44». Представлены схема установки для реализации современного количественного теневого метода, а также описание этапов компьютерной обработки теневых картин в процессе реализации метода.*

### Теневой метод ножа Фуко, метод изофотометрии, качество изображения деформации волнового фронта, геометрическая модель интерферограммы поперечного сдвига, интерферограмма сдвига

Методы контроля ошибок обработки оптической поверхности можно разделить по принципу работы измерительного прибора на два типа: геометрические и волновые. К геометрическим методам относятся метод Гартмана и теневой метод Фуко, к волновым методам – интерферометрический метод контроля [1].

Классический теневой метод ножа Фуко, разработанный в 1856 г. и повсеместно применяемый в наши дни в оптической практике, состоит в получении пятна рассеяния от исследуемой системы, наполовину перекрытого непрозрачной заслонкой с прямолинейным лезвием – ножом Фуко.

Получаемая полутоновая картина пятна рассеяния наглядно отображает деформации волнового фронта, вызванные ошибками оптических поверхностей и aberrациями оптических систем, и визуально позволяет оценивать характер преобладающих ошибок обработки данной поверхности. На рис. 1, а представлен кружок рассея-

ния, наполовину перекрытый ножом Фуко. На рис. 1, б представлен эскиз хода лучей в процессе формирования теневой картины ножа Фуко.

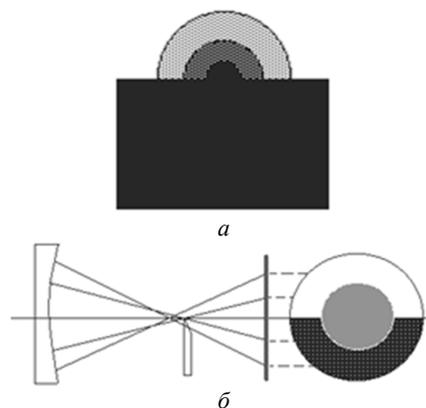


Рис. 1

Среди основных достоинств традиционных теневых методов ножа Фуко выделяются: высокая чувствительность обнаружения ошибок поверх-