

**XXXII Академические Чтения по Космонавтике
Москва, 29 января – 1 февраля 2008 г.**

**СИСТЕМА АВТОНОМНОЙ
КОСМИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ
«АЛЬФА» ПРОЕКТА
ПИЛОТИРУЕМОГО ОБЛЕТА ЛУНЫ Л-1**

Т.М. Энеев, В.В. Ивашкин

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

В.А. Шаров

Ракетно-Космическая Корпорация «Энергия» им. С.П. Королева

Ю.В. Багдасарян

Научно-Производственное Предприятие «Геофизика-Космос»

30 января 2008 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	3
2. Баллистический алгоритм навигации.....	6
- требования к алгоритму навигации.....	6
- бортовая цифровая вычислительная машина.....	6
- автономные навигационные измерения.....	8
- определение орбиты в кеплеровском приближении.....	9
- учет возмущений при определении орбиты.....	11
- расчет коррекции орбиты.....	12
- некоторые особенности алгоритма.....	13
3. Реализация алгоритма навигации на БЦВМ и его отладка	14
4. Испытания системы автономной навигации и тренировки экипажей.....	15
5. Заключение.....	18
6. Литература.....	19

В 1960-х годах в СССР был разработан космический проект «Л-1» пилотируемого облета Луны. Ведущей организацией проекта было ОКБ-1 Королева С.П. (затем - ЦКБЭМ МОМ, сейчас – РКК «Энергия» им. С.П. Королева).

В рамках проекта Л-1 был выполнен ряд разработок, в частности:

- Разработан КА с системами для пилотируемого и автоматического облета Луны (ЦКБМ МОМ – Макаров О.Г., Максимов Г.Ю., Береснев Н.П., Благов В.Д., Дульнев Л.И. и др.);**
- Выполнен анализ траекторий облета Луны с возвращением к Земле с пологим входом в атмосферу Земли, с высотой условного перигея ~ 50 км (ОКБ-1; ИПМ АН СССР);**
- Разработана система наземной навигации на основе наземных радиотехнических измерений (НИИ-885 - Рязанский М.С. и др.);**
- Разработана система автономной навигации (ИПМ АН СССР, ЦКБЭМ МОМ) на базе БЦВМ (разработки НИИ Микроприборов с участием ЦКБЭМ МОМ) и секстанта (завода «Арсенал», г. Киев);**
- Разработана система управления полетом, в частности, система управления спуском в атмосфере Земли при возвращении от Луны со скоростью, близкой ко второй космической скорости (НИИ АП - Пилюгин Н.А. и др.; ИПМ АН СССР - Охоцимский Д.Е. и др.; ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского - Ярошевский В.А. и др.).**

1. ВВЕДЕНИЕ - б

Проект Л-1 был реализован в 1968-1970 гг. в автоматическом варианте полетами КА «Зонд» с №5 по №8. Зонд -5 (15.9.1968 – 22.9.1968) осуществил впервые в мире возвращение КА после облета Луны на Землю со второй космической скоростью, причем впервые был выполнен облет Луны с возвращением на Землю живых существ – черепах. КА Зонд-6 (10.11.1968-17.11.1968) осуществил управляемый спуск на территорию СССР. На рис. 1 приведена траектория полета КА Зонд-6. Полет КА Зонд-7 (8.8.1969-14.8.1969) аналогичен полету КА Зонд-6. Возвращение КА Зонд-8 (20.10.1970-27.10.1970) было осуществлено с северного направления. Выведение КА Зонд осуществлялось РН «Протон» с дополнительной 4-ой ступенью.

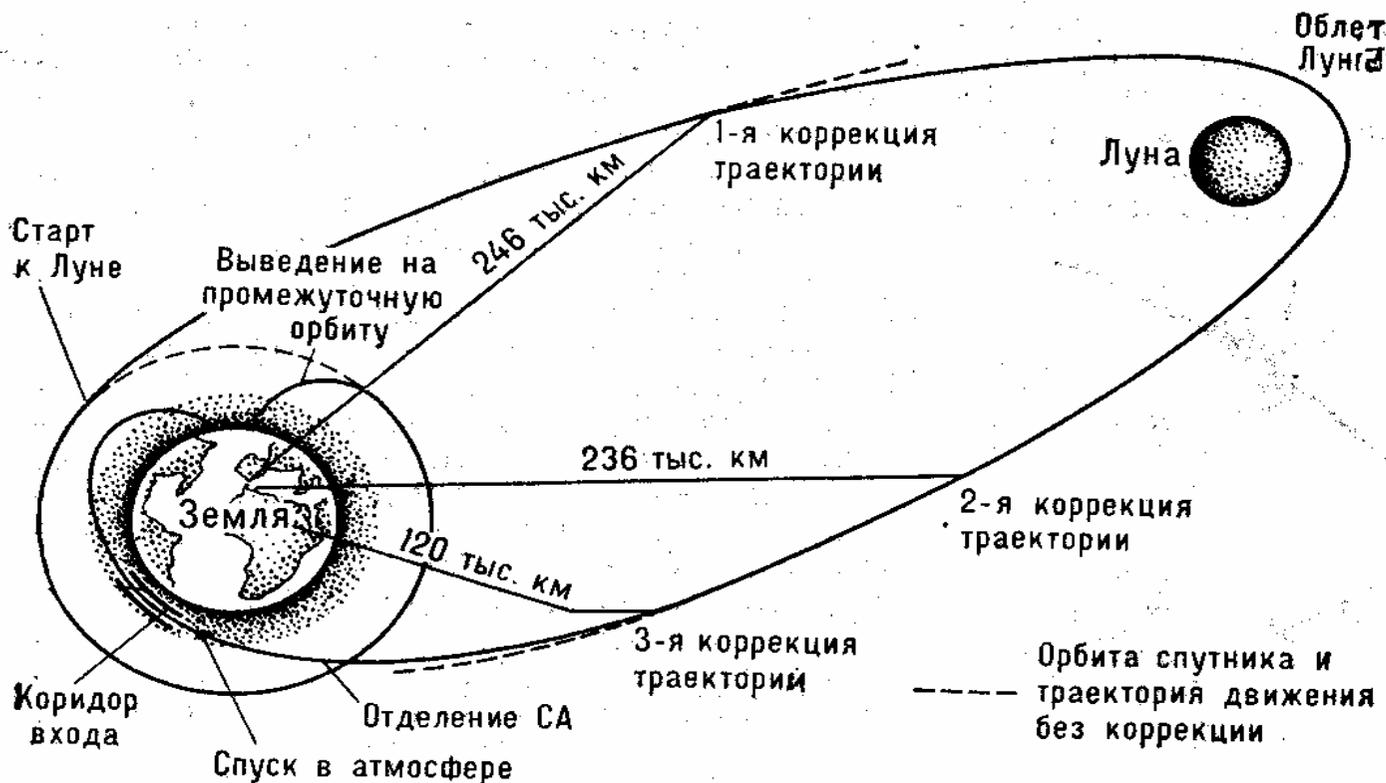


Рис. 1. Схема полета КА Зонд-6 с облетом Луны

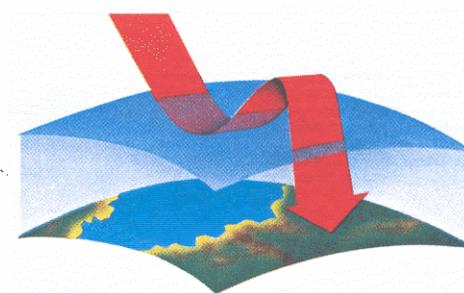


Рис. 2. Спуск в атмосфере КА Зонд-6

1. ВВЕДЕНИЕ - с

Первоначально в проекте Л-1 отсутствовала система автономной навигации. Однако анализ показал недостаточную надежность навигации для осуществления точного входа КА в атмосферу Земли при «южном» возвращении КА от Луны со скоростью, близкой ко второй космической, ибо наземная радионавигационная система на начальном этапе работ по «Л-1» не обеспечивала необходимой надежности определения высоты условного перигея перед входом в атмосферу (± 10 км). По инициативе ОКБ-1 и ИПМ АН СССР началась разработка БЦВМ и системы автономной навигации.

Система автономной навигации включала в себя:

- Космонавта;**
- Измерительный датчик – секстант, позволявший космонавту измерять углы возвышения известных звезд над горизонтами Земли и Луны;**
- БЦВМ, обеспечивавшая ручной ввод углов и моментов их измерений в оперативную память, обработку измерений и определение параметров орбиты полета КА, расчет корректирующих импульсов и уставок на выполнение коррекций для системы управления;**
- Часы и навигационный журнал.**

Ядром математического обеспечения системы является баллистический алгоритм навигации.

2. Баллистический алгоритм навигации - а

Требования к алгоритму навигации

Алгоритм навигации должен удовлетворять

- Требованиям со стороны БЦВМ,
- Требованиям со стороны измерительной системы;
- Временны'м требованиям проекта;
- Точностным требованиям проекта.

Бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ) -а

Была применена БЦВМ «Салют-1», первая отечественная БЦВМ на микросхемах. Она была разработана в НИИ Микроприборов (НИИ МП), г. Зеленоград, - Букреев И.Н., Флоровский А.С., Гуськов Г.Я. и др. , с участием ЦКБЭМ МОМ (сектор Чернышева К.К. и лаборатория Носкина Г.В.). БЦВМ обладала очень ограниченными возможностями. Ее основные характеристики были следующими:

- Оперативная память – 64 32-разрядных ячейки, арифметика – с фиксированной запятой;
- Постоянная память (для программ и констант) – 4096 17-разрядных ячеек;
- среднее быстродействие ~ 100 операций в сек. (короткие операции – 500 оп/с; умножение и деление – 10 оп/с);
- масса ~ 14 кг. (с пультом);
- размеры БЦВМ ~ 45 ×14 ×14 см; размеры пульта ~ 22 ×12×6 см.

Далее на рис. приведено фото БЦВМ с пультом на ней и логарифмической линейкой для сравнения.

2. Баллистический алгоритм навигации - в

Бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ) - в

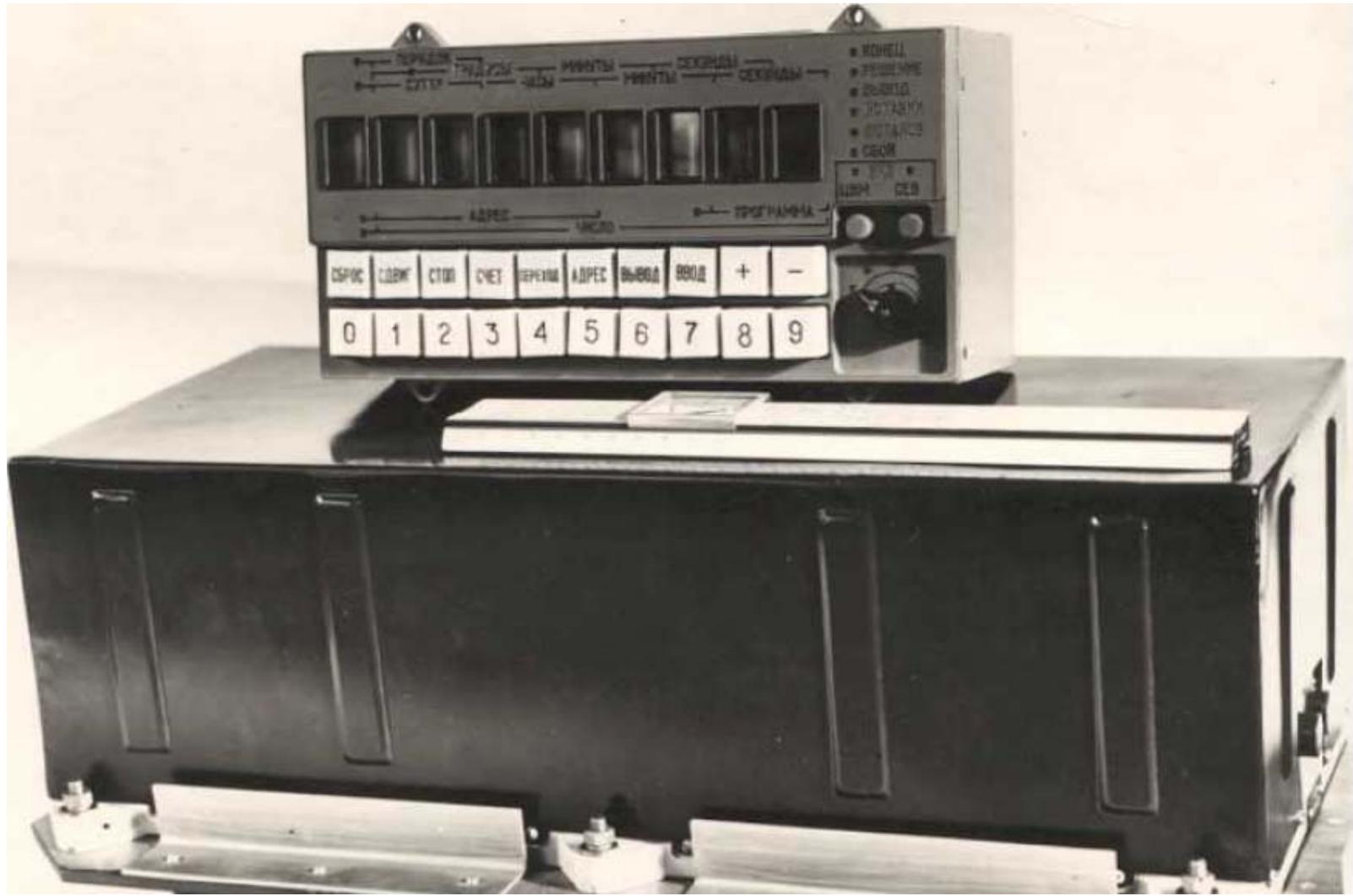


Фото БЦВМ «Салют-1» с пультом и логарифмической линейкой

2. Баллистический алгоритм навигации - с

Автономные навигационные измерения

В качестве прибора для получения измерительной информации был использован секстант, позволяющий космонавтам получать бортовые оптические измерения - углов возвышения известных звезд над горизонтами Земли и Луны, см. рис. 3. В памяти БЦВМ были заданы характеристики 514 звезд со звездной величиной $m \leq 4$. Для космонавтов каталог звезд приводился в навигационном журнале.

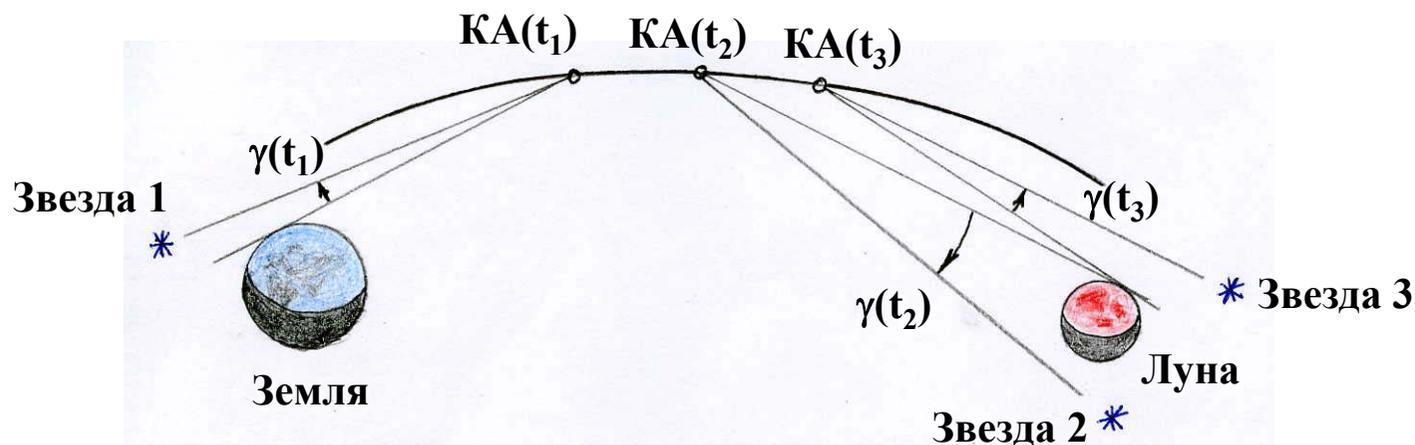


Рис. 3. Схема измерения углов возвышения звезд над горизонтом небесного тела (Земли или Луны).

2. Баллистический алгоритм навигации - d

Определение орбиты в кеплеровском приближении - a

С учетом указанных требований был разработан универсальный алгоритм навигации (ИПМ АН СССР), позволявший по бортовым измерениям определять элементы орбиты КА на всех участках полета и делать расчет коррекции траектории. Для повышения быстродействия основная часть работы алгоритма определения орбиты выполняется в кеплеровском варианте поля. После решения этой задачи делается уточнение орбиты, учитывающее возмущения.

Поэтому определение орбиты производится двухцикленным методом. Внутренний цикл (с основным числом итераций) определяет орбиту для кеплеровского поля, с расчетом всех величин и производных по конечным формулам задачи двух тел. Внешний цикл (с небольшим числом итераций) вводит поправки, учитывающие возмущения и рассчитываемые с помощью интегрирования системы дифференциальных уравнений движения КА, и определяет орбиту в полной модели поля, с учетом притяжения Земли, Луны, Солнца и сжатия Земли.

2. Баллистический алгоритм навигации - e

Определение орбиты в кеплеровском приближении - b

Принятые элементы орбиты q : $h(=V^2-2\mu/r)$, $\varphi_1(=e \sin \omega)$, $\varphi_2(=e \cos \omega)$, i , Ω , T_u ; они соответствуют геоцентрическому или селеноцентрическому движению КА.

Уточнение элементов орбиты после выполнения сеанса автономных измерений производится итерационно, методом наименьших квадратов.

На основе выполненных траекторных измерений углов $\gamma^{(0)}(t_k)$, с учетом их поправок на возмущения, и используя текущее приближение для элементов орбиты $q_j^{(i)} = \{h_j, \varphi_{1j}, \varphi_{2j}, i_j, \Omega_j, T_{uj}\}^{(i)}$ (j -номер итерации внешнего цикла, i - номер во внутреннем цикле), составляется система нормальных уравнений для поправок к элементам $\Delta q_j^{(i)}$

$$A_j^{(i)} \Delta q_j^{(i)} = B_j^{(i)}.$$

Решение этой системы дает поправки к элементам $\Delta q_j^{(i)}$ на текущей i -итерации. По окончании кеплеровского итерационного цикла получим уточненные элементы орбиты q_{j+1} .

2. Баллистический алгоритм навигации - f

Учет возмущений при определении орбиты

«Точная» траектория движения КА определяется интегрированием системы дифференциальных уравнений движения КА с помощью метода Энке.

Для «точной» и «кеплеровской» траекторий КА находятся соответствующие им расчетные значения измеряемых углов и определяется редукция измерений на возмущения. Обычно число итераций во внешнем цикле (и число интегрирований уравнений движения) для учета возмущений невелико, ~ 2-3.

2. Баллистический алгоритм навигации - g

Расчет коррекции орбиты

Расчет коррекции, как и определение орбиты, производится в два этапа:

- А) для модели кеплеровского поля;
- Б) с учетом возмущений. Этот учет делается так же, как и при определении орбиты по результатам измерений.

Предусмотрен расчет четырех коррекций:

- 1) До подлета к Луне;
- 2) В сфере действия Луны;
- 3) После облета Луны;
- 4) Перед входом в атмосферу Земли.

В первых трех коррекциях импульс скорости коррекции определялся так, чтобы попасть в некоторую прицельную точку (обычно она формировалась по номинальной траектории). Этот расчет делался теми же программными средствами, что и определение орбиты по измерениям: координаты точек коррекции и прицеливания использовались как измерения. Фактически решается задача Ламберта.

В последней, «чистой» коррекции корректировалась конечная высота условного перигея.

Поверочные расчеты показали высокую методическую точность такого расчета коррекций.

2. Баллистический алгоритм навигации - h

Некоторые особенности алгоритма

- А) Для небольшой оперативной памяти БЦВМ (64 ячейки) была найдена и использована при программировании такая последовательность вычислений, которая дала возможность совместить с этой памятью весь навигационный алгоритм и необходимые измерения;**
- Б) Из-за режима фиксированной запятой все величины алгоритма были промасштабированы, причем все формулы были приведены к удобному виду, когда величины оставались в пределах единицы.**
- В) При проведении вычислений обращалось внимание, чтобы не было потери точности и чтобы не замедлялось быстроедействие.**
- Г) В частности, для повышения быстрогодействия разработанная схема алгоритма использовала мало интегрирований при обеспечении высокой точности определения орбиты.**
- Д) Алгоритм имеет блочную структуру. Основные функциональные части алгоритма были выделены в отдельные блоки, это упрощало написание программы, ее отладку и реализацию на БЦВМ.**

3. Реализация алгоритма навигации на БЦВМ и его отладка

Алгоритм навигации был далее реализован на БЦВМ «Салют-1» - силами ЦКБЭМ МОМ. Следует отметить, что ЦКБЭМ участвовало в разработке БЦВМ в НИИ МП, а также выполнило разработку всего программно-математического обеспечения (ПМО) для БЦВМ, включая операционную систему и стандартные программы, а также разработку специального программного комплекса («инструментального ПМО») для отладки бортового мат/обеспечения на универсальных цифровых вычислительных машинах УЦВМ типа М-20.

Для отладки и испытаний системы, а также тренировок экипажей в ЦКБЭМ был спроектирован и создан специальный стенд, состоящий из реальной БЦВМ «Салют-1» с пультом и программной модели (на УЦВМ типа М-20) космической среды при полете КА «Л-1» и бортовых измерений. В частности, был создан программный комплекс для отработки навигационного алгоритма и мат/обеспечения БЦВМ на этом стенде.

Отладка алгоритма навигации на БЦВМ «Салют-1» для ряда тестовых вариантов была проведена совместно – силами ЦКБЭМ МОМ и ИПМ АН СССР.

4. Испытания системы автономной навигации и тренировки экипажей -а

После отладки алгоритмов и программ, до полета автоматических КА «Л-1» (Зондов №5-№8) на стенде проводились отработка и испытания системы, с участием ЦКБЭМ МОМ, ИИМ АН СССР и космонавтов – кандидатов для полета на пилотируемом корабле «Л-1» (Макаров О.Г., Леонов А.А., Рукавишников Н.Н., Быковский В.Ф., Севастьянов В.И., Попович П.Р.).

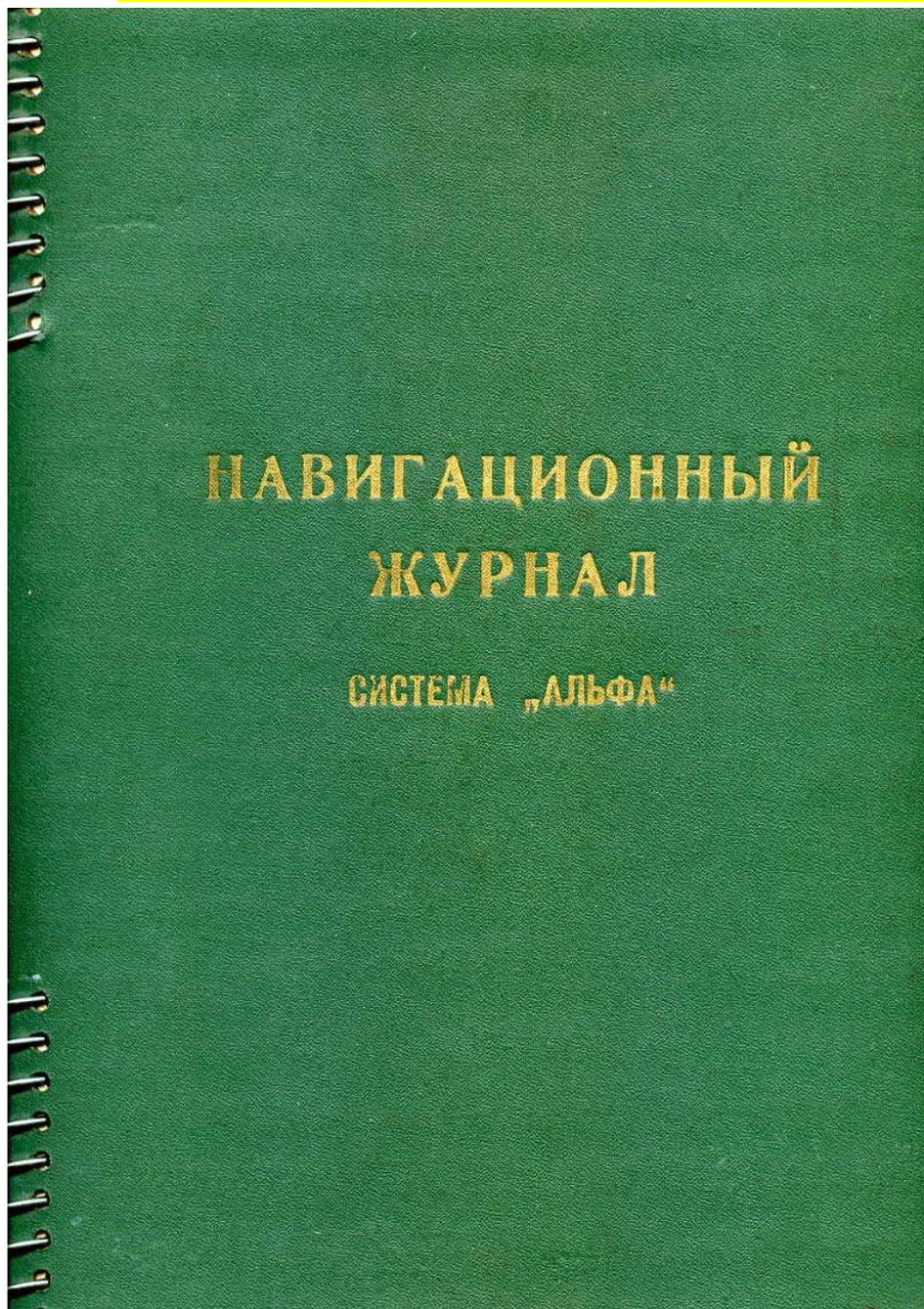
Для испытаний системы, тренировок космонавтов и для использования в реальном полете был разработан специальный навигационный журнал («борт-журнал») системы, в котором были помещены все формы для решения задач навигации, а также каталог звезд.

Следует отметить, что космонавты высоко оценивали возможности и характеристики автономной системы навигации «Альфа» и участвовали в этой работе с большим желанием и энтузиазмом.

Испытания дали хорошие результаты. Выбранный тип измерений позволял хорошо «завязывать» орбиту движения КА, и с учетом экономной организации работы алгоритма орбита определялась довольно быстро и точно.

Далее приведены фото обложки борт-журнала и одна страница его формы 2 с частью каталога звезд.

4. Испытания системы автономной навигации - б



Форма Альфа 2

К а т а л о г з в е з д

№ п/п	Звездная величина m	Спектр	Долгота градусы, минуты	Широта градусы, минуты	Название звезд () — номер по каталогу C-1
101	3,2	B	079 02	+18 17	η Возничего
102	2,8	G	079 15	-43 55	β Зайца
103	3,4	B	079 44	-25 32	η Ориона
104	1,6	B	080 32	-16 49	γ Ориона (16)
105	2,6	F	080 58	-41 04	α Зайца
106	0,1	G	081 26	+22 52	α Возничего (Капелла)
107	2,6	B	081 45	-57 23	α Голубя (36)
108	2,2	O	081 57	-23 33	δ Ориона
109	3,8	A	082 07	-74 26	β Живописца
110	1,6	B	082 09	+05 23	β Тельца
111	2,8	O	082 35	-29 12	ι Ориона
112	1,7	B	083 03	-24 31	ε Ориона
113	3,4	O	083 17	-13 22	λ Ориона
114	3,8	O	083 41	-25 56	σ Ориона
115	1,7	B	084 16	-25 18	ξ Ориона
116	3,0	B	084 22	-02 12	ζ Тельца
117	3,6	F	084 26	-45 49	γ Зайца
118	3,6	A	085 34	-38 13	ζ Зайца
119	2,0	B	085 59	-33 04	κ Ориона
120	3,1	K	086 00	-59 11	β Голубя
121	3,8	G	086 45	-44 18	δ Зайца
122	2,0	F	088 09	+66 06	α Малой Медведицы (Полярная)
123	0,8	M	088 20	-16 02	α Ориона (Бетельгейзе) (04)
124	3,7	F	088 29	-37 37	η Зайца
125	4,0	K	089 12	-66 15	η Голубя
126	1,9	A	089 30	+21 30	β Возничего (25)
127	3,7	G	089 30	+30 51	δ Возничего
128	2,7	A	089 31	+13 46	θ Возничего
129	3,1—3,9	M	093 01	-00 54	η Близнецов
130	4,0	K	093 50	-29 40	γ Единорога
131	3,0	M	094 53	-00 49	μ Близнецов
132	2,0	B	096 46	-41 15	β Большого Пса
133	3,0	B	096 58	-53 23	ζ Большого Пса
134	3,8	B	097 52	-30 16	β Единорога
135	3,8	G	098 00	-56 43	δ Голубя
136	1,9	A	098 41	-06 45	γ Близнецов
137	3,1	G	099 31	+02 04	ε Близнецов
138	3,6	A	100 42	+11 02	θ Близнецов
139	3,4	F	100 47	-10 06	ξ Близнецов
140	4,0	K	101 19	-42 20	ν ² Большого Пса
141	-1,5	A	103 40	-39 36	α Большого Пса (Сирнус) (00)
142	-0,7	F	104 33	-75 50	α Киля (Канопус) (01)
143	3,7—4,5	G	104 34	-02 03	ζ Близнецов
144	3,2	B	106 44	-66 05	ν Кормы
145	3,8	K	107 45	-46 47	ο ¹ Большого Пса
146	3,5	A	108 06	-00 11	δ Близнецов
147	4,0	B	108 09	-55 09	κ Большого Пса
148	3,6	A	108 22	-05 38	λ Близнецов
149	3,8	G	108 32	+05 45	ι Близнецов
150	1,6	A	109 49	+10 06	α Близнецов (Кастор)

4. Испытания системы автономной навигации и тренировки экипажей -с

При полетах автоматических КА «Л-1» (Зонды 5-8) работа бортовой навигационной системы моделировалась на стенде параллельно с работой наземного комплекса. Моделирование показало, что бортовая система автономной навигации практически не уступала наземному комплексу – и по быстродействию, и по точности. Обработка измерений, определение орбиты и расчет коррекции занимали ~ 2 часа.

К сожалению, полет КА «Л-1» был реализован только в автоматическом варианте, и система «Альфа» не работала в режиме реального пилотируемого полета к Луне и обратно.

Тем не менее, результаты наземного моделирования и испытаний дали веские основания сделать вывод о потенциально высоких характеристиках системы.

Опыт создания системы автономной навигации для КА Л-1, предназначенного для пилотируемого облета Луны, показал перспективность автономных систем навигации. Даже для весьма ограниченных возможностей БЦВМ в те годы (1966-1968 гг.) эта система показала высокие характеристики по точности и быстродействию, практически не уступавшие характеристикам наземного командно-вычислительного комплекса. Представляется, что в современных условиях миниатюризации электронно-вычислительной техники за системами автономной навигации большое будущее.

В заключение отметим, что в разработке системы навигации принимал участие большой коллектив. Это, кроме авторов доклада, сотрудники ИПМ АН СССР (Егоров В.А., Золотухина Н.И., Сазыкин Г.Р., Златоустов В.А., Смоляков Э.Р.), сотрудники ЦКБЭМ (Носкин Г.В., Чернышев К.К. , Шутенко В.М., Стишев Ю.В., Зыбин Ю.Н., Гаушус Э.В. и др.), сотрудники НИИ МП (БЦВМ) – Букреев И.Н., Флоровский А.С., Гуськов Г.Я. и др., разработчики секстанта. Разработке системы оказали большое внимание и содействие Королев С.П., Черток Б.Е., Раушенбах Б.В., Келдыш М.В., Охоцимский Д.Е. Авторы признательны Н.П. Бересневу и Г.В. Носкину за помощь в подготовке доклада.

Данное исследование выполнено при поддержке РФФИ (Грант 06-01-00531) и Гранта научной школы НШ-1123.2008.1

6. ЛИТЕРАТУРА - а

1. *Аким Э.Л., Энеев Т.М.* Определение параметров движения космического летательного аппарата по данным траекторных измерений. *Космические исследования*, 1963, т. 1, № 1. С. 5-50.
2. *Береснев Н.П., Легостаев В.П.* Система управления автоматической станции Луна-9. *Космические исследования*, 1968 г., т. 6, № 4, с. 454-461.
3. *Дашков А.А., Ивашкин В.В.* К истории разработки космического аппарата «Луна-9» для мягкой посадки на Луну. // Препринт, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 1988, N 184. 28 с.
4. *Егоров В.А.* О некоторых задачах динамики полета к Луне. – *Успехи физических наук*, 1957, т. 63, вып. 1а, с. 73-117.
5. *Егоров В.А.* Пространственная задача достижения Луны. М.: Наука, 1965, 224.
6. *Ивашкин В.В.* К истории развития космической навигации. // Препринт, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 1993, N 50. 15 с.
7. *Космонавтика.* Энциклопедия. Гл. ред. В.П. Глушко. М.: Советская энциклопедия. 1985, 528 с.
8. *Лидов М.Л., Охоцимский Д.Е., Тесленко Н.М.* Исследование одного класса траекторий ограниченной задачи трех тел. *Космические Исследования*. 1964, т. 2, вып. 6. С. 843-852.

6. ЛИТЕРАТУРА - б

9. *Мишин В.П.* Полеты во сне и наяву. М.: Правда, № 293 (26011), 20 октября 1989.
10. *Охоцимский Д.Е., Сихарулидзе Ю.Г.* Основы механики космического полета. М.: Наука, 1990. 448 с.
11. *Раушенбах Б.В.* Межконтинентальная крылатая ракета «Буря». XVII Научные Чтения по Космонавтике. Москва, январь 1993.
12. *Черток Б.Е.* Ракеты и люди. Лунная гонка. // Москва: «Машиностроение», 1999. Глава I, пп. 20-21. С. 25-26.
13. *Draper C.S., Wrigly W., Hoag D.G., Battin R., et al.* Space Navigation, Guidance and Control. Ed. Miller J.E., W. and J. Mackay and Co LTD. London and Chatham. England.
14. *Ivashkin V.V.* On the History of Space Navigation Development. // AAS History Series, Volume 22. IAA History Symposia (Graz, Austria, 1993), Volume 14. 1998. Pp. 271-278.
15. *Treder A.J.* Autonomous Navigation – when Will Have It? Navigation Journal of the Institute of Navigation. Vol. 2, No. 2, Summer 1987. Pp. 93-114.