



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 114 за 1997 г.



Аким Э.Л., Горохова А.А.,  
Киселева И.П., Степаньянц В.А.,  
Тучин А.Г.

Небесно-механическая  
интерпретация и первичная  
обработка измерений КА  
'Гранат' и 'Интербол'.

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Небесно-механическая интерпретация и первичная обработка измерений КА 'Гранат' и 'Интербол'. / Э.Л.Аким [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 1997. № 114. 21 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=1997-114>



**Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М. В. Келдыша  
Российской академии наук**

**Э.Л. Аким, А.А. Горохова, И.П. Киселева,  
В.А. Степаньянц, А.Г. Тучин**

**НЕБЕСНО – МЕХАНИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ  
И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА  
ИЗМЕРЕНИЙ КА "ГРАНАТ" И "ИНТЕРБОЛ"**

**Препринт №114 за 1997г.**

Российская Академия Наук

Ордена Ленина

Институт прикладной математики

им. М.В. Келдыша

Э.Л. Аким, А.А. Горохова, И.П. Киселева, В.А. Степаньянц, А.Г. Тучин.

**Небесно-механическая интерпретация и первичная обработка  
измерений КА "Гранат" и "Интербол"**

Москва  
1997



# Аннотация

Работа посвящена обработке траекторных измерений космических аппаратов "Гранат" и "Интербол-1", проводимых радиотехнической системой "Квант-Д". Рассмотрены модели измерений радиальной скорости и наклонной дальности. Приведены соотношения, связывающие измеряемые радиотехнические параметры с вектором состояния КА, а также с положением и скоростью движения в пространстве передающей и приемной антенны измерительной системы. Приведено описание алгоритмов локальной обработки и оценки качества траекторных измерений. Приведены оценки качества траекторных измерений, проведенных в 1997 году.

E. Akim, A. Gorokhova, I. Kiseleva, V. Stepaniants, A. Tushin. The models of measurements and local processing trajectory measurements of spacecraft "Granat" and "Interball-1".

This paper presents an analysis of tracking data for spacecraft "Granat" and "Interball-1", performed by a radio system "Kvant-D". The range and doppler models are considered. The equations are given, which connect measured radio engineering parameters of tracking system with the spacecraft's state-vectors and antenna's position and speed. There is the description of the local processing algorithms and evaluating of quality of tracking data. There are the evaluations of quality of tracking data which have been carried in 1997.

# Введение

В Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша выполняются работы по баллистическому обеспечению экспериментов, проводимых на КА "Интербол-1" и "Гранат". Основной задачей, которая решается при выполнении этих работ, является задача определения и прогнозирования параметров движения КА. Для этого используются запросные измерения радиальной скорости и наклонной дальности [1]. Основным средством проведения траекторных измерений для КА "Гранат" и "Интербол-1" является система "Квант-Д" [2]. Бортовые радиокомплексы КА "Гранат" и "Интербол-1" предназначены для проведения траекторных измерений в запросном режиме только в дециметровом диапазоне. Настоящая работа посвящена вопросам небесно-механической интерпретации и первичной обработки траекторных измерений, проводимых системой "Квант-Д" в дециметровом диапазоне.

КА "Гранат" был запущен 1 декабря 1989 года. КА "Интербол-1" — 3 августа 1995 года. Параметры орбит на текущее время приведены в следующей таблице.

| КА   | Дата     | t        | a          | e     | I        | $\Omega$  | $\omega$  | Hmin    |
|------|----------|----------|------------|-------|----------|-----------|-----------|---------|
| Ин-1 | 97 11 07 | 20 38 56 | 102766.449 | .7096 | 72 17 10 | 245 44 46 | 336 19 15 | 23472.8 |
| Гр-т | 97 12 01 | 08 44 41 | 108164.440 | .7197 | 78 35 39 | 229 07 49 | 14 37 48  | 23243.8 |

t время прохождения плоскости экватора Земли (часы, минуты, секунды);  
a большая полуось [км];  
e эксцентриситет;  
I наклонение [градусы, минуты, секунды];  
 $\Omega$  долгота восходящего узла [градусы, минуты, секунды];  
 $\omega$  аргумент перигея [градусы, минуты, секунды];  
Hmin минимальное расстояние от поверхности Земли [км].

Методика небесно-механической интерпретации, изложенная в данной работе, была использована специалистами Украины при создании математического обеспечения Евпаторийского баллистического центра.

Авторы выражают благодарность В.П. Орешкину и С.П. Игнатову — разработчикам системы "Квант-Д", сотрудникам РНИИ Космического приборостроения за рекомендации при разработке алгоритмов.

## 2. Небесно-механическая интерпретация измерений дальности

Фазовый метод измерения дальности, используемый в системе "Квант-Д", основан на измерении временного запаздывания принимаемого дальномерного сигнала относительно запросного. Измеритель дальности построен по двухшкальной схеме. Отсчет по грубой

$f_{0D}$  - опорная частота, равная 7355000 [Гц].

Разрешить неоднозначность и определить измеренное значение по прогнозируемому значению дальности  $D_{pred}$  можно, если прогнозируемое значение отличается от истинного не более, чем  $\frac{D_{res}}{2}$ . В этом случае измеренное значение  $D$  определяется из соотношения

$$D = D_m + \left[ \frac{D_{pred} - D_m}{D_{res}} + 0.5 \right] \cdot D_{res}$$

Выпишем соотношения, позволяющие определять:  $D_{crs}, D_{acc}, D_{res}, D_{brd}, \lambda_{cl}$ . Все эти величины зависят от тактовой частоты  $f_{cl}$ , которая определяется из соотношения

$$f_{cl} = \frac{79}{480} \cdot \left( f_{0D} + \frac{f_{pd1}}{105} \right), \text{ где}$$

$f_{pd1}$  - поправка для компенсации доплеровского сдвига при приеме сигнала на борту КА.

Значение  $\frac{f_{pd1}}{105}$  устанавливается на весь сеанс измерений и передается в 4-6 позициях 2-ой адресной посылки в виде 10-ти разрядного двоичного кода со знаком. Знак передается в крайнем левом разряде 4-ой позиции. Крайний правый разряд 6-ой позиции не используется. Цена младшего разряда кода составляет  $\frac{1000}{2^{10}}$  [Гц].

Значения  $D_{crs}$  и  $D_{acc}$  определяются, исходя из следующих соотношений

$$D_{acc} = c \frac{f_{cl} - 1200000}{2f_{cl} 5000000} N_{acc},$$

$$D_{crs} = \frac{c}{24f_{cl}} N_{crs},$$

где

$c$  - скорость света;

$N_{crs}$  - значение счетчика грубой шкалы, передаваемое по каналам связи. Передается в виде 19-ти разрядного двоичного кода в 16-20 позициях 1-ой информационной посылки. Не используется крайний правый разряд 20 позиции.

$N_{acc}$  - значение счетчика точной шкалы, передаваемое по каналам связи. Передается в виде 11-ти разрядного двоичного кода. В крайнем левом разряде 13-ой позиции передается признак достоверности отсчетов дальности по грубой и точной шкале.

Алгоритм вычисления  $D_{res}$  зависит от режима работы измерителя дальности.

В режиме 30 кгц

$$D_{res} = c \frac{1024}{f_{cl} 20}$$

Длина волны тактовой частоты вычисляется по формуле:

$$\lambda_{cl} = \frac{c}{f_{cl}}$$

Таким образом, выписаны все соотношения, определяющие модель измерений дальности в системе "Квант-Д". Однако следует учитывать две поправки:

- тропосферную поправку;
- поправку, учитывающую геометрию антенны.

Величины, необходимые для вычисления тропосферной поправки, передаточные вместе с измерениями и включают температуру, давление воздуха и парциальное давление водяного пара. Соотношение для учета тропосферной поправки имеет вид:

$$\Delta D_{trop} = - \frac{N_0 \cdot 10^{-5}}{\left( \ln \frac{93}{N_0} \right) \cdot \cos \theta}$$

$$N_0 = \frac{77.6}{T} \cdot \left( P + \frac{4810 \cdot B}{T} \right),$$

где

$T$  - температура в  $K^0$ , температура в  $C^0$  передается в двоично-десятичном коде в 13-14 позициях 2-ой адресной посылки. При этом самый левый разряд 13-ой позиции используется для передачи знака (0 - положительная температура, 1 - отрицательная),



$$T = T[C^0] + 273.15$$

$P$  - воздушное давление в мб. Передается в мм. рт. ст. в 15-17 позициях 2-ой адресной посылки.

$$P_{mb} = \frac{4}{3} \cdot P_{mm.r.t.st}$$

$B$  - парциальное давление водяного пара в мб. Передается влажность в % в 18-19 позициях 2-ой адресной посылки,  $B_{mb} = \frac{B_{\%} \cdot B_{ta}}{100}$

| T C° | -25  | -20  | -15  | -10  | -5   | 0    | +5   | +10  | +15  | +20  | +25  | +30  | +35  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Bta  | 0.88 | 1.25 | 2.05 | 2.86 | 4.48 | 6.11 | 8.72 | 12.3 | 17.0 | 23.4 | 32.9 | 42.4 | 58.1 |

$\theta$  - зенитный угол направления на КА (прогнозируемое значение угла на среднее время сеанса).

Поправка, учитывающая геометрию антенны, связана с тем, что необходимо перейти от дальности между опорными плоскостями антенн к дальности между точками с известными геодезическими координатами. Эта поправка зависит от используемых антенных устройств. При работе в варианте П2500 - П2500 (прд-прм) соотношение для поправки имеет вид:

$$D_{ant} = 2(a + r \cos \theta),$$

для варианта П400 - П2500:

$$D_{ant} = b + a + r \cos \theta,$$

для варианта П400 - П400:

$$D_{ant} = 2b$$

Здесь  $a, b, r$  - параметры антенн,  $\theta$  - угол места, П400 (в адресах 8), П2500 (в адресах 9):

$$r = 2.5 \text{ [м]}, a = 25.145 \text{ [м]}, b = 17.364 \text{ [м]}.$$

Для других вариантов антенн поправка не учитывается.

Расчетным аналогом измерений расчетной дальности является параметр  $D(t)$ , рассчитываемый по следующей формуле:

$$D(t) = \frac{\|\vec{r}(t_2) - \vec{r}_s(t_1)\| + \|\vec{r}(t_2) - \vec{r}_r(t)\|}{2}$$

$t$  — момент регистрации сигнала на приемной антенне;

$t_1$  — момент излучения сигнала с передающей антенны;

$t_2$  — момент переизлучения сигнала с борта КА;

$\vec{r}_s(t)$  — вектор положения приемной антенны в момент регистрации сигнала  $t$ ;

$\vec{r}_r(t_1)$  — вектор положения передающей антенны в момент времени  $t_1$ ;

$\vec{r}(t_2)$  — вектор состояния КА в момент переизлучения сигнала  $t_2$ .

Моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  определяются из уравнений:

$$\|\vec{r}(t_2) - \vec{r}_r(t)\| = (t - t_2) \cdot c$$

$$\|\vec{r}(t_2) - \vec{r}_s(t_1)\| = (t_2 - t_1) \cdot c,$$

где

$c$  — скорость света.

### 3. Небесно-механическая интерпретация измерений скорости

Для получения модели измерения скорости рассмотрим схему прохождения сигнала. Передающей антенной излучается сигнал, имеющий частоту

$$f_1 = 105 \cdot f_0 + f_{pd1},$$

где

$f_0$  — опорная частота, значения которой приведены в следующей таблице:

| КА       | $f_0$ [Гц]                   |
|----------|------------------------------|
| ИНТЕРБОЛ | 7355000                      |
| ГРАНАТ   | $\frac{19}{7} \cdot 2714705$ |

$f_{pd1}$  — поправка для компенсации доплеровского сдвига при приеме сигнала на борту КА.

Во время проведения измерений  $f_{pd1}$  постоянно.

Приемоответчик КА принимает сигнал с частотой:

$$\tilde{f}_1 = A_1(t) \cdot f_1$$

где  $A_1(t)$  - доплеровский множитель для трассы ИП-КА. Сигнал, переизлученный приемоответчиком КА, имеет частоту:

$$\tilde{f}_2(t) = \frac{126}{105} \cdot \tilde{f}_1(t) = \frac{126}{105} A_1(t) \cdot f_1(t)$$

Антенной наземного приемного тракта принимается сигнал с частотой

$$f_2(t) = A_2(t) \cdot \tilde{f}_2(t)$$

где  $A_2(t)$  - доплеровский множитель для трассы КА-ИП.

Обозначим:

$$A(t) = A_1(t) \cdot A_2(t)$$

Объединяя указанные выше соотношения, получим формулу для зависимости частоты сигнала, который принимается наземной антенной, от частоты излучаемого сигнала.

$$f_2(t) = A(t) \cdot (126 \cdot f_0 + \frac{126}{105} \cdot f_{pd1})$$

Измеряемой величиной является приращение нециклической фазы (интеграла от частоты) сигнала, полученного после гетеродинирования принятого сигнала, т.е.

$$b(t) = \int_{t-\Delta t}^t f_m(\xi) d\xi$$

где

$$f_m(t) = f_2(t) - 126 \cdot f_0 - f_{pd2}(t)$$

$\Delta t$  - мерный интервал.

Здесь  $f_{pd2}(t)$  - частота сигнала, который вырабатывается синтезатором.

$$f_{pd2} = a_0 + a_1 \cdot (t - t_0) + a_2 \cdot \frac{(t - t_0)^2}{2} + a_3 \cdot \frac{(t - t_0)^3}{6}$$

Коэффициенты  $a_0, a_1, a_2, a_3$  и момент времени  $t_0$  постоянны при проведении сеанса измерений и передаются в адресных группах.

$a_0$  передается в виде 30-ти разрядного двоичного кода со знаком в 4-12 позициях 3-ей адресной посылки. Знак передается в 3 разряде (слева) 4-ой позиции. В крайнем пра-

вом разряде 4-ой позиции передается старший разряд двоичного кода. Младший разряд двоичного кода передается в крайнем левом разряде 12-ой позиции. Отрицательное значение передается в дополнительном коде.

$a_1$  - передается в виде 27-разрядного двоичного кода со знаком в 12-19 позициях 3-ей адресной посылки. Знак передается во 2-ом разряде (слева) 12-ой позиции. Старший разряд передается в 3-ем разряде (слева) 12-ой позиции. Младший разряд передается в крайнем левом разряде 19-ой позиции. Отрицательное значение передается в дополнительном коде.

$a_2$  - передается в виде 27-разрядного двоичного кода со знаком в 1-7 позициях 4-ой адресной посылки. Знак передается в крайнем левом разряде 1-ой позиции. Старший разряд передается во 2-ом разряде (слева) 1-ой позиции. Младший разряд передается в крайнем правом разряде 7-ой позиции. Отрицательное значение передается в дополнительном коде.

$a_3$  - передается в виде 31-разрядного двоичного кода со знаком в 8-15 позициях 4-ой адресной посылки. Знак передается в крайнем левом разряде 8-ой позиции. Старший разряд передается в 2-ом разряде (слева) 8-ой позиции. Младший разряд передается в крайнем правом разряде 15-ой позиции. Отрицательное значение передается в дополнительном коде.

$t_0$  - передается в виде двоично-десятичного кода в 1-4 позициях 3-ей адресной посылки. Десятки часов передаются в 1-2 разрядах (слева) 1-ой позиции. Единицы часов передаются в 3-4 разрядах (слева) 1-ой позиции и 1-2 разрядах 2-ой позиции. Десятки минут передаются в крайнем правом разряде 2-ой позиции и двух крайних левых разрядах 3-ей позиции. Единицы минут передаются в 2-х крайних правых разрядах 3-ей позиции и 2-х крайних левых разрядах 4-ой позиции.

Определим масштабные множители  $m_0, m_1, m_2, m_3$  для пересчета коэффициентов  $a_0, a_1, a_2, a_3$ , передаваемых в адресных группах, к значениям, которые используются в формулах.

$$m_0 = 10^3 \cdot 2^{-20} \text{ Гц},$$

$$m_1 = m_0^2$$



$$m_2 = m_1 \cdot 10^3 \cdot 2^{-16},$$

$$m_3 = m_0^3 \cdot 10^3 \cdot 2^{-17}.$$

Получим соотношение, связывающее среднее значение доплеровского множителя на мерном интервале

$$\bar{A}(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t A(\xi) d\xi$$

с измеренной величиной -  $b(t)$ . Эта величина передается в виде 21-го разрядного двоичного кода со знаком в 7-12 позициях 1-ой информационной посылки. Знак передается во втором разряде (слева) 7-ой позиции (0- соответствует знаку '+', 1- знаку '-'). Старший разряд двоичного кода передается в 3-ем разряде (слева) 7-ой позиции. Младший разряд передается в 2-ем разряде (слева) 12-ой позиции. В крайнем левом разряде 7-ой позиции передается признак достоверности измерения (0- достоверное измерение). В крайнем правом разряде 12-ой позиции передается признак режима (0- запросный, 1- беззапросный). Отрицательное значение отсчета передается в дополнительном коде. Цена отсчетной единицы равна 0,01.

В приложении приведены соотношения только для запросного режима.

Введем обозначение:

$$\bar{p}(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t f_{pd2}(\xi) d\xi.$$

Тогда выражение для  $b(t)$  примет вид:

$$b(t) = (126 \cdot f_0 + \frac{126}{105} f_{pd1}) \cdot \bar{A}(t) \cdot \Delta t - 126 \cdot f_0 \cdot \Delta t - \bar{p}(t) \cdot \Delta t$$

Откуда

$$\bar{A}(t) = \frac{\frac{b(t)}{\Delta t} + 126 \cdot f_0 + \bar{p}(t)}{126 \cdot f_0 + \frac{126}{105} f_{pd1}}.$$

Среднее значение доплеровского множителя  $\bar{A}(t)$  на мерном интервале  $\Delta t$  связано со средним значением приращения дальности на этом же мерном интервале. Действительно,

$$\bar{A}(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t A(\xi) d\xi.$$

Так как

$$A(\xi) = \frac{dt^*(\xi)}{d\xi},$$

где  $t^*(\xi)$  - время, соответствующее моменту излучения сигнала, полученного в момент  $\xi$  [3], имеем:

$$\begin{aligned} \bar{A}(t) &= \frac{t^*(t) - t^*(t - \Delta t)}{\Delta t} = \frac{(-t^*(t) + t) - (-t^*(t - \Delta t) + (t - \Delta t)) - \Delta t}{\Delta t} = \\ &= -\frac{c(-t^*(t) + t) - c(-t^*(t - \Delta t) + (t - \Delta t))}{c \cdot \Delta t} + 1 = -\frac{1}{c} \frac{D(t) - D(t - \Delta t)}{\Delta t} + 1 \end{aligned}$$

где  $c$  - скорость света,

$D(t)$  - суммарная дальность по трассе: передающая антенна - КА - приемная антенна, отнесенная к моменту регистрации сигнала  $t$

Таким образом справедливо следующее соотношение для среднего значения приращения дальности на мерном интервале:

$$\frac{D(t) - D(t - \Delta t)}{\Delta t} = c(1 - \bar{A}(t)) = c \cdot \left(1 - \frac{\frac{b}{\Delta t} + 126 \cdot f_0 + \bar{p}(t)}{126 \cdot f_0 + \frac{126}{105} f_{pd1}}\right).$$

Это соотношение является моделью измерения скорости.

Для упрощения расчета допускается интерпретация измерений скорости в виде мгновенного значения, привязанного на середину мерного интервала по формуле:

$$\dot{X}(t_u - \frac{\Delta t}{2}) = -c \cdot \frac{\frac{b}{\Delta t} - \frac{126}{105} f_{pd1} + \bar{p}(t)}{\frac{b}{\Delta t} + 2 \cdot 126 \cdot f_0 + \frac{126}{105} f_{pd1} + \bar{p}(t)},$$

где  $t_u$  - время измерения в информационной посылке.

Расчетным аналогом мгновенного значения скорости является параметр  $\frac{d}{dt} D(t)$ , вычисляемый по формуле:



$$\frac{d}{dt} D(t) = \frac{1}{2} \left( \frac{(\vec{r}(t_2) - \vec{r}_{prd}(t_1), \vec{v}(t_2) - \vec{v}_{prd}(t_1)) \cdot (\vec{r}(t_2) - \vec{r}_{prm}(t) - \vec{v}_{prm}(t))}{\|\vec{r}(t_2) - \vec{r}_{prd}(t_1)\|} + \frac{(\vec{r}(t_2) - \vec{r}_{prm}(t) - \vec{v}_{prm}(t)) \cdot (\vec{r}(t_2) - \vec{r}_{prd}(t_1))}{\|\vec{r}(t_2) - \vec{r}_{prm}(t)\|} \right), \text{ где}$$

$t$  — момент регистрации сигнала на приемной антенне;

$t_1$  — момент излучения сигнала с передающей антенны;

$t_2$  — момент переизлучения сигнала с борта КА;

$\vec{r}_{prm}(t), \vec{v}_{prm}(t)$  — вектор положения и вектор скорости приемной антенны в момент регистрации сигнала  $t$ ;

$\vec{r}_{prd}(t), \vec{v}_{prd}(t)$  — вектор положения и вектор скорости передающей антенны в момент времени  $t_1$ ;

$\vec{r}(t_2), \vec{v}(t_2)$  — вектор состояния КА в момент переизлучения сигнала  $t_2$ .

Как и для расчетного аналога измерения наклонной дальности

$t$  — момент регистрации сигнала на приемной антенне;

$t_1$  — момент излучения сигнала с передающей антенны;

$t_2$  — момент переизлучения сигнала с борта КА.

#### 4. Первичная обработка измерений

Алгоритмы первичной обработки [4] выполняют следующие функции:

- идентификацию аномальных измерений и их удаление из последующей обработки;
- оценку флюктуационной составляющей ошибки;
- формирование нормальных мест, которые являются входной информацией для задачи определения параметров движения;

Алгоритмы первичной обработки основаны на предположении о том, что разность между измеренным и расчетным значением, вызванная неточностью знания орбиты, имеет линейный характер на интервале измерений. Это предположение справедливо для орбит с удалением от Земли на несколько тысяч километров. Для других орбит используются другие алгоритмы [5].

Алгоритм идентификации аномальных измерений состоит из двух частей. Первая часть обеспечивает автоматическую идентификацию в случае, когда аномальных измерений не более 10% от общего числа измерений, а вторая часть предназначена для автоматизированной работы в случае большого количества аномальных измерений.

В ходе работы первой части алгоритма рассогласование между измеренными и расчетными значениями аппроксимируются прямой. Далее анализируется среднеквадратичное построение аппроксимации. Если среднеквадратичное аппроксимации меньше, чем априорно известное среднеквадратичное измерений, считается, что все измерения качественные. Если среднеквадратичное аппроксимации больше, чем априорно известное среднеквадратичное измерений, часть измерений должна быть удалена из последующей обработки. Если имеются измерения, для которых величина рассогласований между измеренным и расчетным значением больше утроенного значения среднеквадратичного аппроксимации, они удаляются из выборки и процесс построения аппроксимации повторяется.

Если в результате работы первой части алгоритма не удалось отбросить некачественные измерения, включается вторая часть алгоритма, которая в практике первичной обработки получила название предварительный отбор. Алгоритм предварительного отбора основан на предположении, что аппаратная ошибка проявляется в том, что к некоторой группе не обязательно подряд идущих измерений, добавляется постоянная по величине ошибка. Причем таких групп в рамках совокупности измерений одного сеанса может быть несколько. В предположении о том, что разность между измеренными и расчетными значениями имеет линейный характер, измерения, попадающие в одну группу, должны лежать в некоторой трубке вокруг соответствующей прямой. Алгоритм предварительного отбора позволяет построить такие трубки и сформировать группы из исходной совокупности измерений, соответствующие трубкам. Допускается, что одно измерение может одновременно входить в несколько групп. Решение о том, какие группы соответствуют аномальным измерениям, принимает оператор.

Характеристики качества измерений в 1997 году для КА "Гранат" и "Интербол-1" приведены в таблице 1. Для каждого сеанса измерений, вида измерений (скорость или дальность) и комплекта определялось число измерений (в процентах), которое удовлетворяет критериям качества, описанным выше. Далее определялось число сеансов (в процентах), для которых процент качественных измерений лежит в диапазоне: 95-100, 90-95, 80-90 и менее 80. Например, измерения второго комплекта наклонной дальности по КА "Гранат" в 91.82% случаев имели не более 5% процентов аномальных измерений. Только

58,33% измерений второго комплекта радиальной скорости содержали не более 5 процентов аномальных измерений.

Таблица 1. Число сеансов (в процентах), в которых процент качественных измерений лежит в указанном диапазоне (столбец 1).

|                                | Гранат           |             |                 |             | Интербол         |             |                 |             |
|--------------------------------|------------------|-------------|-----------------|-------------|------------------|-------------|-----------------|-------------|
|                                | Радиал. скорость |             | Накл. дальность |             | Радиал. Скорость |             | Накл. дальность |             |
| Процент качественных измерений | 1-ый компл.      | 2-ой компл. | 1-ый компл.     | 2-ой компл. | 1-ый компл.      | 2-ой компл. | 1-ый компл.     | 2-ой компл. |
| 95-100                         | 87.27            | 91.82       | 82.69           | 79.05       | 64.77            | 58.33       | 79.76           | 84.62       |
| 90-95                          | 7.88             | 2.52        | 12.18           | 13.51       | 17.05            | 28.57       | 11.90           | 11.94       |
| 80-90                          | 1.22             | 1.26        | 3.20            | 4.73        | 10.22            | 9.52        | 7.14            | 2.56        |
| менее 80                       | 3.64             | 4.40        | 1.92            | 2.70        | 7.95             | 3.97        | 1.19            | 1.28        |

Оценка флюктуационной составляющей ошибки измерений наклонной дальности приведена в таблице 2. Для каждого КА, сеанса и комплекта определялась величина флюктуационной составляющей ошибки. Далее определялось число сеансов (в процентах), в которых флюктуационная составляющая лежит в диапазоне: менее 30 [м], 30-40 [м], 40-50 [м], 50-60 [м], более 60[м]. Например, измерения второго комплекта по КА "Гранат" в 12,84% случаев имеют флюктуационную ошибку более 60 [м].

Таблица 2. Число сеансов (в процентах), в которых флюктуационная составляющая ошибки измерений дальности лежит в указанном диапазоне (столбец 1).

| Величина флюктуационной ошибки [м]. | Гранат        |               | Интербол      |               |
|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                     | 1-ый комплект | 2-ой комплект | 1-ый комплект | 2-ой комплект |
| менее 30                            | 0.64          | 1.36          | 1.19          | 2.56          |
| 30-40                               | 30.77         | 32.43         | 39.29         | 39.74         |
| 40-50                               | 51.28         | 36.49         | 42.86         | 43.59         |
| 50-60                               | 8.97          | 16.89         | 11.90         | 12.82         |
| более 60                            | 8.33          | 12.84         | 4.76          | 1.28          |

Оценка флюктуационной составляющей измерений радиальной скорости приведена в таблице 3. Аналогично тому, как это делалось для измерений наклонной дальности, для каждого КА, сеанса и комплекта определялась величина флюктуационной составляющей ошибки и число сеансов (в процентах), в которых эта величина лежит в заданных пределах: 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, более 40 [мм/сек]. Например, измерения второго комплекта по КА "Интербол-1" в 84,52% случаев имеют флюктуационную составляющую ошибки менее 5 [мм/сек].

Таблица 3. Число сеансов (в процентах), в которых флюктуационная составляющая ошибки измерений скорости лежит в указанном диапазоне (столбец 1).

| Величина флюктуационной ошибки [мм/сек]. | Гранат        |               | Интербол      |               |
|------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                          | 1-ый комплект | 2-ой комплект | 1-ый комплект | 2-ой комплект |
| 0-5                                      | 2.42          | 1.89          | 81.82         | 84.52         |
| 5-10                                     | 6.67          | 7.55          | 14.77         | 11.90         |
| 10-15                                    | 10.30         | 11.32         | 0.0           | 0.0           |
| 15-20                                    | 29.09         | 30.19         | 2.27          | 0.0           |
| 20-25                                    | 8.48          | 9.43          | 0.0           | 0.0           |
| 25-30                                    | 10.91         | 9.43          | 0.0           | 0.0           |
| 30-35                                    | 20.00         | 16.98         | 0.0           | 1.19          |
| 35-40                                    | 10.30         | 10.69         | 0.0           | 1.19          |
| более 40                                 | 1.82          | 2.52          | 1.14          | 1.19          |

#### Приложение 1. Структура адресных и информационных посылок

Для передачи измерений в дециметровом диапазоне используются четыре вида адресных посылок: АП-1, АП-2, АП-3, АП-4 и два вида информационных: ИП-1 и ИП-2. Каждая посылка состоит из 24-х элементов (позиций). Каждый элемент содержит четыре разряда, которые номеруют слева, начиная с 1. Номера позиций и шестнадцатеричные коды, используемые для идентификации типа посылки, показаны в следующей таблице 4.

Таблица 4. Типы посылок и их окраска для идентификации.

|      | 1 | 2 | 3 — 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|------|---|---|--------|----|----|----|----|----|----|----|
| АП-1 |   |   | ...    |    |    | В  | В  | В  |    |    |
| АП-2 |   |   | ...    |    |    | В  | 1  | С  |    |    |
| АП-3 |   |   | ...    |    |    | В  | 2  | С  |    |    |



|      |  |  |  |  |  |   |   |   |  |  |
|------|--|--|--|--|--|---|---|---|--|--|
| АП-4 |  |  |  |  |  | В | 3 | С |  |  |
| ИП-1 |  |  |  |  |  |   |   | 1 |  |  |
| ИП-2 |  |  |  |  |  |   |   | 2 |  |  |

## Приложение 2. Пример расшифровки адресных и информационных посылок

Пример рассмотрен на основе измерений нип 22 комплекта 1 сеанса 781, содержащегося в файле s0078k1.410, который был получен из Вальтории по сети INTERNET 22/12/1995 по объекту "ИНТЕРБОЛ".

Пример расшифровки адресных посылок.

2212951507814100226bbb16 - 1-я адресная посылка  
 05501e8315100176559b1c2a - 2-я адресная посылка  
 5503ff143960000000b2c2b - 3-я адресная посылка  
 000000000000000000b3c20 - 4-я адресная посылка

Результаты расшифровки:

date\_base = 22/12/95 дата  
 time\_base = 15:00:00 время  
 sit\_twi = 781 номер массива  
 nob = 410 номер объекта  
 nip = 22 номер нипа  
 cmp = 0 комплект  
 freg = 55 признак канальной частоты  
 $N_s$  = 8 номер передающей антенны  
 $N_r$  = 3 номер приемной антенны  
 sign\_f\_channel = 1 номер частотного канала для передачи и приема  
 $N_B$  = 5 комбинация бортовой аппаратуры  
 sign\_diap = 1 диапазон дальномерных частот  
 sign\_tm\_v = 0 время усреднения дельта t=10 сек  
 $\frac{f_{pd1}}{105}$  = 15  
 температура = 1 [C°]  
 давление = 765 [мм.рт.ст.]  
 влажность = 59 [%]  
 t0 = 15:40:00

a0 = -1931476  
 a1 = 0  
 a2 = 0  
 a3 = 0  
 t01 = 0  
 a01 = 0  
 a11 = 0  
 a21 = 0  
 a31 = 0

Пример расшифровки информационных посылок.

154500016bb89ba0024a017e - 1-я информационная посылка

t = 15:45:00  
 b(r) = 46556  
 $N_{acc}$  = 442  
 $N_{crs}$  = 293

признак когерентных измерений = 0

rel = 1 достоверность (дальность-недост., скорость-достоверна)  
 n\_inf\_s = 1

значение скорости = 588.946 [м/сек] для времени = 15.44.55.

время в информ. посылке=56700

время для многочлена=56400

значение многочлена1= $a_0 \cdot (t - t_0 - \text{дельта}t) - 1931476 \cdot 10^3 / 2^{20} \cdot (56700 - 56400 - 10) = -1841.999 \cdot 290$

значение многочлена2= $a_0 \cdot (t - t_0) - 1841.999 \cdot (56700 - 56400) = -1841.999 \cdot 300$

интеграл многочлена= $(-1841.999 \cdot 300 - (-1841.999 \cdot 290)) / 10 = -1841.999$

$b / (\text{дельта}t \cdot 100) = 46556 / (10 \cdot 100) = 46.556$

$126 \cdot f_{pd1} / 105 = 126 \cdot 15 \cdot 1000 / 1024 = 1845.703$

$2 \cdot 126 \cdot f_0 = 252 \cdot 7355000 = 1853459999.928$

$v = -299792458 \cdot (46.556 + (-1841.999) - 1845.703) / (46.556 + (-1841.999) + 1845.703 + 1853459999.928) = 588.946$

15455001909801c028440177 - 2-я информационная посылка



$$t = 15:45:50$$

$$b(t) = 51276$$

$$N_{acc} = 28$$

$$N_{cst} = 5154$$

$$\text{признак когерентных измерений} = 0$$

$$n_{inf} = 0 \text{ достоверность (дальность-достоверна, скорость-достоверна)}$$

$$n_{inf_s} = 1.$$

$$\text{значение скорости} = 588.183 \text{ [м/сек]} \text{ для времени } = 15.45.45$$

$$\text{значение дальности} = 162359.766 \text{ [км]} \text{ для времени } = 15.45.5$$

$$t = 56740$$

$$f_{pd} = 15 \cdot 1000 / 1024 = 14.648$$

$$f_{cl} = (7355000 + 14.648) \cdot 79 / 480 = 1210512.827555$$

$$\lambda_{cl} = 0.247657$$

$$D_{acc} = 0.00026 \cdot 28 = 0.00729$$

$$D_{cst} = 0.0110319 \cdot 5154 = 53184426$$

$$D_{brd} = 2471656$$

$$D_{cst} = 4.355$$

$$D_{res} = 5072.023526$$

$$D_m = D_{acc} + 429 \cdot \lambda_{cl} / 2 + D_{cst} - D_{brd} = 55.013146$$

$$D_{pred} = 162358.365466$$

$$D = D_m + 32 \cdot D_{res} = 162359.765977$$

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 96-01-01060).

## Литература

1. Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных. Коллектив авторов под ред. Агаджанова П.А., Дулевича В.Е., Коростелева А.А., "Советское радио", М., 1969.
2. Дополнение к эскизному проекту по подготовке к выполнению программы "Фобос". Отчет РНИИ Космического приборостроения, 1988.

3. У. Берке. Пространство—время, геометрия, космология. // Перевод с английского под редакцией Д.В. Гальцева, "Мир", М., 1985.

4. Поле тяготения Луны и движение ее искусственных спутников / Э.Л. Аким, И.К. Бажинов, В.П. Павлов, В.Н. Почукаев; Под ред. акад. В.С. Авдуевского, Машиностроение, М., 1984.

5. А. Г. Тучин, Горохова А.А. Локальная обработка измерений дальности для околоземных орбит космических аппаратов. Препринт Ин. прикл. матем. им. М.В. Келдыша РАН, 1990 г., N 99.

6. С. Ф. Марин, В.В. Сазонов. Оценка точности определения движения КА "Интербол-1" по данным траекторных измерений. Препринт Ин. прикл. матем. им. М.В. Келдыша РАН, 1996 г., N 83.

Э.Л.Аким, А.А.Горохова, И.П.Киселева, В.А.Степанянц,  
А.Г.Тучин. "Небесно-механическая интерпретация и перыч-  
ная обработка измерений КА "Гранат" и "Интербол."

Подписано в печать 29.12.97г. Заказ № 180.  
Формат бумаги 60X90 1/16. Тираж 59 экз.

055 (02)2

Отпечатано на ротационных в Институте прикладной математики АН

Москва, Миусская пл. 4.



Все авторские права на настоящее издание принадлежат Институту прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН.

Ссылки на издание рекомендуется делать по следующей форме: и. о., фамилия, название, препринт Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, год, номер.

Адрес: Россия, 125047, Москва А-47, Миусская пл. дом 4  
Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН,  
Редакционно-издательская группа.

Publication and distribution rights for this preprint are reserved by the Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russia Academy of Sciences.

The references should be typed by the following form: initials, name, title, preprint, Inst. Appl. Mathem., Russia Academy of Sciences, year, N(number).

Distribution. The preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics, the Russia Academy Sciences are sold in the bookstores "Academkniga", Moscow and are distributed by the Russia Academy of Sciences Library as an exchange.

Address: Russia, 125047, Moscow A-47, Miusskaya Sq. 4, the Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russia Ac. of Sc., Information Bureau.