

Российская Академия Наук
Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша

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

Локальная обработка
измерений радиосистемы
межпланетных космических аппаратов

Москва
2002

Аннотация

Работа посвящена локальной обработке траекторных измерений космических аппаратов дальнего космоса. Рассмотрены вопросы оценки качества траекторных измерений, а также идентификации аномальных измерений. Ошибки аномальных измерений могут быть обусловлены сбоями работы измерительной аппаратуры, либо большими искажениями при передаче результатов измерений по каналам связи, или другими причинами. Алгоритм идентификации аномальных измерений использует априорную оценку точности траекторных измерений. Рассмотрены составляющие погрешности измерений. Приведены оценки ошибок, обусловленные средой распространения. 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. Вторая часть алгоритма основана на предположении, что аппаратурная ошибка проявляется в добавлении к некоторой группе измерений значения, постоянного по величине. Искаженные измерения не обязательно следуют друг за другом. В одном сеансе измерений может быть несколько групп. Рассмотрены примеры работы алгоритма.

E. Akim, A. Gorokhova, I. Kiseleva, V. Stepaniants, A. Tuchin. Local measurement processing of the interplanetary spacecraft's radio system.

Abstract. The paper devoted to local processing of the interplanetary spacecraft. The problems of anomalous measurements finding and measurement quality estimation are considered. The measurement's errors can be caused by malfunction measuring equipment, great distortions in communication lines or another reasons. The algorithm of the anomalous measurement identification uses the a-priory accuracy estimation of the tracking measurements. The error's components are considered. The estimations of the measurement errors due to environment of the signal passing are given. The anomalous measurement identification algorithm consists of two parts. The first part provides automatic identification when the number of anomalous measurement does not exceed 10% of total measurement number. The second part of algorithm is based on the supposition, that the instrument error is constant magnitude adding to some group of measurements. The distorted measurements do not necessary follow one after another. One measurement session can contain some groups. The examples of the algorithm operating are considered.

Введение

Определению орбит космических аппаратов предшествует первичная обработка траекторных измерений [1], которая решает следующие задачи:

- небесно-механическую интерпретацию измерений;
- идентификацию и удаление аномальных измерений;
- сжатие результатов обработки траекторных измерений;
- оценку качества измерений.

Прием и дешифровка траекторных измерений производятся автоматизированной системой баллистико-навигационного обеспечения управления полетами космических аппаратов (КА) [2]. Задача первичной обработки выбирает информацию из базы данных в структурированном виде, который соответствует содержанию информации, а не способу ее передачи по каналам связи.

Вопросы небесно-механической интерпретации траекторных измерений научных КА, в том числе межпланетных автоматических станций, рассмотрены в [3] и [4]. Настоящая работа посвящена вопросам оценки качества траекторных измерений, а также идентификации аномальных измерений.

Ошибки аномальных измерений могут быть обусловлены сбоями работы измерительной аппаратуры, либо большими искажениями при передаче результатов измерений по каналам связи, или другими причинами. Измерения с такими ошибками необходимо выявить и удалить до решения задачи определения параметров движения КА, поскольку отсутствие грубых ошибок измерений является одним из важнейших условий сходимости статистических методов оценивания параметров.

Алгоритм идентификации аномальных измерений использует априорную оценку точности траекторных измерений. Составляющие аппаратурных погрешностей измерений радиальной скорости и наклонной дальности радиосистемы дальних КА рассмотрены в [5]. В этой же работе приведены оценки этих составляющих, полученные в процессе работы с КА «Фобос-2».

Систематические ошибки измерений радиальной скорости определяются неточностью номинала частоты опорного генератора и фазовой нестабильностью приемопередающего тракта, каждая из которых составляет 0.15 мм/с. Составляющие флуктуационных ошибок, а также оценки их значений для 10-ти секундного интервала накопления показаны в таблице 1.

Таблица 1

<i>Составляющие ошибки</i>	<i>Значение, [мм/с]</i>
Нестабильность частоты опорного генератора	0.3
Фазовая нестабильность аппаратуры на интервале накопления	0.125
Шумовая составляющая	0.05

Составляющие аппаратурной ошибки измерения наклонной дальности приведены в таблице 2.

Таблица 2

<i>Составляющие ошибки</i>	<i>Значение, [м]</i>
Фазовая нестабильность приемопередатчика КА	1.0
Фазовая нестабильность наземной аппаратуры	1.0
Неточность временной привязки	0.6
Неточность знания номинала частоты	0.4

Флуктуационные ошибки измерений дальности определяются дискретом измерителя, составляющим 0.26 м и шумом, составляющим 1.4 м.

Ошибки, связанные с условиями распространения радиоволн в ионосфере и тропосфере, также имеют систематические составляющие [6],[7],[8],[9]. В процессе работы с КА «Фобос-2» учитывалась только тропосферная поправка измерений дальности, вычисляемая как функция влажности, давления и температуры [6]. Значения не учитываемых поправок приведены в таблице 3.

Таблица 3

<i>Поправки</i>	<i>Максимальное значение</i>
Ионосферная поправка измерений наклонной дальности, [м]	1.1
Тропосферная поправка к измерениям радиальной скорости, [мм/с]	0.17
Ионосферная поправка к измерениям радиальной скорости, [мм/с]	0.15

При реализации проекта «Фобос-Грунт» на ответственных участках полета требуется обеспечить запросные измерения радиальной скорости с точностью 0.2 мм/с. Для

достижения такой точности необходимо учитывать поправки к измерениям, вызванные условиями среды распространения. В первом разделе работы рассмотрен этот вопрос. Второй раздел посвящен вопросам идентификации аномальных измерений, сжатию информации и оценки качества измерений.

1. Систематические погрешности измерений, обусловленные средой распространения

В работе [6] показано, что в сферически слоистой атмосфере поправка на фазовый путь ΔL_Φ для сигнала, распространяемого с высоты H до поверхности, может быть вычислена по формуле:

$$\Delta L_\Phi = \int_0^H \frac{\Delta n(h) \cdot (R_3 + h)}{\sqrt{(R_3 + h)^2 - R_3^2 \cos^2 \gamma}} dh, \quad (1.1)$$

где

$\Delta n(h)$ - отличие коэффициента преломления от 1;

R_3 - радиус Земли;

h - высота над поверхностью;

γ - угол места.

Используем это соотношение для получения поправок и оценок регулярных ошибок измерений дальности и скорости, вызванных тропосферой и ионосферой Земли.

1.1. Систематические ошибки измерений, вызванные тропосферой Земли

Для тропосферы Земли справедлива следующая модель зависимости Δn от высоты:

$$\Delta n(h) = N_0^* \cdot 10^{-6} e^{-\beta h}, \quad (1.2)$$

где

N_0^* - Приведенный коэффициент преломления у поверхности Земли, вычисленный по измерениям температуры, давления и влажности у поверхности Земли;

$\beta = -\frac{1}{10} \ln \frac{93}{N_0^*}$ - Параметр модели, вычисляемый из условия постоянства коэффициента преломления на высоте 10 км от поверхности Земли.

Подставляя (1.2) в (1.1) и учитывая, что $\frac{R_3}{R_3 + h} \sim 1$, преобразуем (1.1) к виду:

$$\Delta D_T = \int_0^{H_T} \frac{N_0^* \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\beta h}}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma}} dh = \frac{N_0^* \cdot 10^{-6} \cdot (1 - e^{-\beta H_T})}{\beta \sin \gamma} \approx \frac{N_0^* \cdot 10^{-6}}{\beta \sin \gamma}, \quad (1.3)$$

где

H_T - высота тропосферы.

При работе с КА «Фобос-2» значение тропосферной поправки составляло от 2 до 22 м и учитывалось при обработке измерений.

Теперь, с использованием (1.1) и (1.2), получим соотношение для оценки систематической составляющей ошибки измерений скорости, вызванной тропосферой Земли:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{D}_T &= \frac{d}{dt} \Delta D_{\Phi T} = \int_0^{H_T} \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta n(h) \cdot (R_3 + h)}{\sqrt{(R_3 + h)^2 - R_3^2 \cos^2 \gamma}} \right) dh = \\ &= \int_0^{H_T} \frac{\Delta n(h) \cdot \dot{\gamma} (R_3 + h) R_3^2 \cos \gamma \sin \gamma}{\left((R_3 + h)^2 - R_3^2 \cos^2 \gamma \right)^{\frac{3}{2}}} dh \approx \\ &\approx \int_0^{H_T} \frac{\Delta n(h) \cdot \dot{\gamma} \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma}{\sin^3 \gamma} dh \approx \frac{\dot{\gamma} \cos \gamma}{\sin^2 \gamma} \cdot \frac{N_0^* \cdot 10^{-6}}{\beta} . \end{aligned} \quad (1.4)$$

По данным, приведенным в [5], при работе с КА «Фобос-2» максимальное значение этой поправки составило 0.17 мм/с, но поправка не учитывалась при обработке измерений. При баллистико-навигационном обеспечении полета КА «Фобос-Грунт» эта поправка должна учитываться по формуле (1.4).

1.2. Систематические ошибки измерений, вызванные ионосферой Земли

Для ионосферы Земли справедлива следующая модель для зависимости Δn от высоты:

$$\Delta n(h) = -40.4 \frac{N(h)}{f^2}, \quad (1.5)$$

где

$N(h)$ - электронная концентрация, выраженная в $\frac{1}{\text{см}^3}$;

f - частота сигнала, выраженная в КГц.

Подставляя (1.5) в (1.1), получим

$$\begin{aligned} \Delta D_{II} &= \int_0^{H_{II}} \frac{-40.4 \cdot N(h) \cdot (R_3 + h)}{\sqrt{(R_3 + h)^2 - R_3^2 \cos^2 \gamma}} dh = \\ &= -\frac{40.4}{f^2} \int_0^{H_{II}} \frac{N(h) \cdot (R_3 + h)}{\sqrt{(R_3 + h)^2 - R_3^2 \cos^2 \gamma}} dh , \end{aligned} \quad (1.6)$$

где

H_{II} - высота ионосферы.

Так как КА находится заведомо выше максимума электронной концентрации h_m , можно воспользоваться следующей оценкой [6]:

$$\int_0^{H_{II}} \frac{N(h) \cdot (R_3 + h)}{\sqrt{(R_3 + h)^2 - R_3^2 \cos^2 \gamma}} dh \approx \frac{(R_3 + h_m)}{\sqrt{(R_3 + h_m)^2 - R_3^2 \cos^2 \gamma}} \int_0^{H_{II}} N(h) dh \quad (1.7)$$

Используя (1.7), можно оценить ΔD_{II} :

$$\Delta D_{II} = -\frac{40.4}{f^2} \frac{R_3 + h_m}{\sqrt{(R_3 + h_m)^2 - R_3^2 \cos^2 \gamma}} \int_0^{H_{II}} N(h) dh \text{ [см]} \quad (1.8)$$

Значения ошибок, вносимых ионосферой, для различных углов места при интегральной электронной концентрации $3 \cdot 10^{13}$ эл/см² и $h_m = 300$ км показаны в таблице 4.

Таблица 4

γ , град.	20	40	60	80
ΔD_{II} , м	1.1	0.7	0.6	0.5

Эти значения хорошо согласуются с данными, приведенными в [5]. Систематическая составляющая ошибки измерений радиальной скорости, вносимая ионосферой, определяется угловым перемещением луча ИП-КА по углу места. Поэтому соотношение для оценки можно получить дифференцированием (1.8) по времени. В результате получим:

$$\Delta \dot{D}_u = \frac{40.4}{f^2} \cdot \frac{(R_3 + h_m) \cdot R_3^2 \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma \cdot \dot{\gamma}}{\left((R_3 + h_m)^2 + R_3^2 \cdot \cos^2 \gamma \right)^{\frac{3}{2}}} \cdot \int_0^{H_u} N(h) dh \text{ [см/с]} \quad (1.9)$$

Значения ошибок, обусловленных ионосферой, для различных углов места приведены в таблице 5. Интегральная электронная концентрация и h_m приняты такими же, как и при расчете таблицы 4.

Таблица 5

γ , град.	10	20	40	60	80
$\Delta \dot{D}_{II}$, м/с	0.15	0.12	0.05	0.02	0.01

Значения ионосферных поправок для измерений дальности и скорости могут быть учтены, если на измерительных пунктах разместить приемник сигналов системы спутниковой навигации, работающий на двух частотах. Используя соотношения (1.8) и (1.9), можно пересчитать поправку, полученную для частоты системы спутниковой навигации, в поправку для частоты, на которой работает радиотехническая измерительная система.

2. Идентификация аномальных измерений

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 первой части алгоритма определяются коэффициенты линейной функции от времени для аппроксимации невязок между измеренными и расчетными значениями. Анализируется среднеквадратичное отклонение построенной аппроксимации. Если среднеквадратичное отклонение аппроксимации меньше, чем априорно известное значение среднеквадратичной ошибки измерений, считается, что все измерения качественные. Если среднеквадратичное отклонение аппроксимации больше, чем априорно известная среднеквадратичная ошибка измерений, часть измерений должна быть удалена из последующей обработки. Измерения, для которых величина невязки между измеренным и расчетным значениями больше утроенного значения среднеквадратичного аппроксимации, удаляются из выборки. Процесс построения аппроксимации повторяется.

Если в результате работы первой части алгоритма не удалось идентифицировать и удалить некачественные измерения, включается вторая часть алгоритма. Этот алгоритм основан на предположении, что аппаратная ошибка проявляется в добавлении к некоторой группе измерений значения, постоянного по величине. Искаженные измерения не обязательно следуют друг за другом. В одном сеансе может быть несколько групп измерений. В предположении, что разность между измеренными и расчетными значениями имеет линейный характер, измерения, попадающие в одну группу, должны лежать в определенных границах вокруг некоторой прямой. Алгоритм определяет прямые и границы, а затем формирует группы из исходной совокупности измерений. Допускается, что одно измерение может одновременно входить в несколько групп. Далее производится идентификация групп аномальных измерений. В разделе 2.2.5. рассмотрен алгоритм автоматического выделения групп аномальных измерений. Допускается автоматизированная работа, когда решение о том, какие группы соответствуют аномальным измерениям, принимает оператор.

2.1. Критерий качества измерений на основе линейной аппроксимации невязок между измеренными и расчетными значениями

В данном разделе описан алгоритм отбраковки аномальных измерений, основанный на аппроксимации невязок между расчетными и измеренными значениями простой линейной регрессией.

2.1.1. Входная информация

Входной информацией алгоритма является:

- множество пар (ψ_i, t_i) $i = 1, \dots, N$,
- априорно известное среднеквадратическое значение флуктуационной составляющей ошибки измерений σ_0 ,

где

- ψ_i - измеренное значение (радиальная скорость или наклонная дальность);
- t_i - момент времени, к которому относится i -ое измерение.

Далее, не ограничивая общности, будем считать, что $t_1 < t_2 < \dots < t_N$.

2.1.2. Результат работы алгоритма

Алгоритм может завершаться с положительным или отрицательным кодом ответа. В случае положительного кода ответа формируется подмножество качественных измерений, определяется оценка среднеквадратического значения флуктуационной составляющей ошибки измерений и другие параметры статистической модели. Отрицательный код ответа означает, что невозможно выбрать подмножество качественных измерений.

2.1.3. Описание алгоритма

Алгоритм состоит из трех шагов.

Шаг 1. Преобразование входных данных

Измеренные значения преобразуются в невязки. Моменты времени отсчитываются от середины интервала $[t_1, t_N]$.

$$\begin{aligned} \hat{\psi}_i &= \psi_i - \psi_f(t_i, x_{sv}) \quad , \\ \hat{t}_i &= t_i - \frac{t_1 + t_N}{2} \quad , \quad i = 1, \dots, N, \end{aligned} \tag{2.1}$$

здесь

$\psi_f(t, x_{sv})$ - расчетное значение измеряемого параметра, полученное от некоторого вектора состояния x_{sv} космического аппарата.

Шаг 2. Построение линейной регрессии

Строится линейная регрессия $\hat{\psi}_i = B + A\hat{t}_i + \varepsilon_i$ по множеству пар $(\hat{\psi}_i, \hat{t}_i)$, $i = 1, \dots, N$.

Определение значений A , B , ошибок определения этих значений s_A, s_B , а также среднеквадратического значения s величин ε_i , $i = 1, \dots, N$. Значения A и B определяются по формулам:

$$A = \frac{n \sum_{i=1}^N \hat{t}_i \hat{\psi}_i - \sum_{i=1}^N \hat{t}_i \sum_{i=1}^N \hat{\psi}_i}{n \sum_{i=1}^N \hat{t}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N \hat{t}_i \right)^2} \quad (2.2)$$

$$B = \frac{n \sum_{i=1}^N \hat{t}_i^2 \sum_{i=1}^N \hat{\psi}_i - \sum_{i=1}^N \hat{t}_i \sum_{i=1}^N \hat{t}_i \hat{\psi}_i}{n \sum_{i=1}^N \hat{t}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N \hat{t}_i \right)^2}$$

Среднеквадратическое значение s величин ε_i , $i = 1, \dots, N$ вычисляется по формуле:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{\psi}_i^2}{n-2} - \frac{\left(\sum_{i=1}^N \hat{\psi}_i \right)^2}{n(n-2)} - \frac{\left(n \sum_{i=1}^N \hat{t}_i \hat{\psi}_i - \sum_{i=1}^N \hat{t}_i \sum_{i=1}^N \hat{\psi}_i \right)^2}{n \sum_{i=1}^N \hat{t}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N \hat{t}_i \right)^2} \quad (2.3)$$

Ошибки определения коэффициентов s_A и s_B вычисляются по формулам:

$$s_A^2 = \frac{\hat{s}^2 n}{n \sum_{i=1}^N \hat{t}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N \hat{t}_i \right)^2} \quad (2.4)$$

$$s_B^2 = \frac{\hat{s}^2 \sum_{i=1}^N \hat{t}_i^2}{n \sum_{i=1}^N \hat{t}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N \hat{t}_i \right)^2}$$

Шаг 3. Анализ результатов

Величина s сравнивается со среднеквадратическим значением флуктуационной составляющей ошибки измерений σ_0 . Если $s < \sigma_0$, все измерения считаются

качественными. Если $s > \sigma_0$, требуется исключить аномальные измерения. Исключаются измерения, для которых выполняется условие:

$$\left| \hat{\Psi}_i - A\hat{t}_i - B \right| > k \cdot s \quad (2.5)$$

Значение коэффициента k выбирается из диапазона $[2.5, 3.0]$ при условии, что количество исключаемых измерений не превосходит 50%. Если такое значение k выбрать можно, множество измерений корректируется и происходит переход к шагу 2. Если k выбрать нельзя, алгоритм завершается с отрицательным кодом.

2.1.4. Методическая погрешность, обусловленная применением линейной регрессии

Была проведена оценка методической погрешности, обусловленная применением линейной регрессии для аппроксимации невязок измеренных и расчетных значений, для орбиты спутника Марса, близкой к круговой, плоскость которой совпадает с плоскостью орбиты Фобоса, а полуось больше, чем полуось орбиты Фобоса, на ~ 300 км (орбита наблюдения КА «Фобос-2»). Расчеты показали, что если опорная и реальная орбиты различаются так, что невязки расчетных значений радиальной скорости не превосходят 15 мм/с, то на 10-ти минутном интервале их можно аппроксимировать линейной регрессией с точностью лучше, чем 0.01 мм/с.

2.2. Критерий качества измерений на основе разбиения массива на группы

2.2.1. Входная информация

Входной информацией алгоритма является такая же информация, что и для алгоритма, рассмотренного в п 2.1.

2.2.2. Выходная информация

Выходной информацией алгоритма является список групп информации с указанием следующих параметров по каждой группе:

- максимальная невязка;
- минимальная невязка;
- начало базового набора;
- конец базового набора;
- число точек базового набора;
- общее число точек массива измерений, которые относятся к данной группе.

Здесь под базовым набором понимается подмножество пар исходного множества, моменты времени которых следуют друг за другом, и для которых выполняется критерий объединения в группы.

2.2.3. Статистическая модель

Рассмотрим случайные величины

$$\varphi_i = A\tau_i + B + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (2.6)$$

где

- A, B - постоянные коэффициенты;
 τ_i - моменты времени;
 ε_i - независимые нормально распределенные случайные величины с нулевым средним и дисперсией σ^2 .

Можно показать, что

$$P \left\{ \left| \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{t_{i+1} - t_i} - \frac{\varphi_{j+1} - \varphi_j}{t_{j+1} - t_j} \right| > k\sigma_0\sqrt{2} \left(\frac{1}{t_{i+1} - t_i} + \frac{1}{t_{j+1} - t_j} \right) \right\} < 1 - 2\Phi(k), \quad (2.7)$$

где

$P\{\dots\}$ - вероятность события, указанного в фигурных скобках;

$$\Phi(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^k e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad - \quad \text{интеграл вероятности.}$$

Например, вероятности 0.995 соответствует $k = 2.58$, а вероятности 0.9995 — $k = 3.29$.

Условие (2.7) используется в алгоритме для разделения пар точек на группы по значению локального наклона.

2.2.4. Описание алгоритма

Алгоритм состоит из четырех шагов.

Шаг 1. Преобразование входных данных

Производится такое же преобразование, как и на первом шаге п. 2.1.3.

Шаг 2. Определение среднего значения локального наклона

На этом шаге алгоритма последовательно анализируются наклоны пар точек $i, i+1$ и формируется массив локальных наклонов. Каждый элемент массива локальных наклонов содержит 5 параметров:

- Da_k - значение варианта наклона между соседними точками;
 Dt_k - обратная величина к приращению времени, по которому получено Da_k ;
 Sxx_k - сумма квадратов приращений невязок, соответствующих данному варианту наклона;
 Sxt_k - сумма произведений приращений невязок на приращение времени;
 Dn_k - число точек с данным вариантом наклона.

Последовательно анализируются наклоны соседних точек i и $i+1$. Проверяется — соответствуют ли друг другу локальные наклоны соседних точек в рамках статистической модели ошибок измерений (условие 2.7). При этом проверяется, что

$$\left| \frac{\hat{\psi}_{i+1} - \hat{\psi}_i}{\hat{t}_{i+1} - \hat{t}_i} - \frac{\hat{\psi}_{i+2} - \hat{\psi}_{i+1}}{\hat{t}_{i+2} - \hat{t}_{i+1}} \right| < k\sigma_0\sqrt{2} \left| \frac{1}{\hat{t}_{i+1} - \hat{t}_i} + \frac{1}{\hat{t}_{i+2} - \hat{t}_{i+1}} \right|, \quad (2.8)$$

где

$\hat{\psi}_i, \hat{\psi}_{i+1}, \hat{\psi}_{i+2}$ - невязки точек $i, i+1, i+2$;
 $\hat{t}_i, \hat{t}_{i+1}, \hat{t}_{i+2}$ - моменты времени, к которым относятся эти невязки.

Если условие (2.8) выполняется, модифицируется массив локальных наклонов. Если условие не выполняется, происходит переход к следующей паре точек.

Модификация массива локальных наклонов производится следующим образом. В начале ищется такой элемент m , для которого выполняется:

$$\left| \frac{\hat{\psi}_{i+1} - \hat{\psi}_i}{\hat{t}_{i+1} - \hat{t}_i} - Da_m \right| < k\sigma_0\sqrt{2} \left| \frac{1}{\hat{t}_{i+1} - \hat{t}_i} + Dt_m \right|. \quad (2.9)$$

Если такой элемент найден, модифицируются значения Sxx_m , Sxt_m и Dn_m . При модификации Dn_m увеличивается на единицу, а

$$Sxx_m = Sxx_m^{prev} + (\hat{\psi}_{i+1} - \hat{\psi}_i)^2, \quad (2.10)$$

$$Sxt_m = Sxt_m^{prev} + (\hat{\psi}_{i+1} - \hat{\psi}_i)(\hat{t}_{i+1} - \hat{t}_i).$$

Здесь Sxx_m^{prev} и Sxt_m^{prev} — значения на предыдущем шаге. Если в массиве локальных наклонов имеется несколько наклонов, для которых выполняется условие (2.9), выбирается элемент с минимальным значением индекса m . Если в массиве локальных наклонов нет элемента, для которого выполняется условие (9), формируется новый элемент.

После завершения формирования массива локальных наклонов, определяется средний локальный наклон. Для этого выбирается элемент \hat{m} массива локальных наклонов с максимальным числом точек. Среднее значение локального наклона определяется по формуле:

$$a = \frac{Sxx_{\hat{m}}}{Sxt_{\hat{m}}}. \quad (2.11)$$

Следует отметить, что вычисление среднего локального наклона по формуле (2.11) соответствует условию минимума функционала:

$$\sum_{j \in I_{\hat{m}}} \left(a(\hat{t}_{j+1} - \hat{t}_j) - (\hat{\psi}_{i+1} - \hat{\psi}_i) \right)^2, \quad (2.12)$$

где

$I_{\hat{m}}$ - множество значений индекса по исходному массиву, определяющих первые точки пар, соответствующих элементу \hat{m} массива локальных наклонов.

Шаг 3. Формирование групп

На этом шаге алгоритма формируется массив групп. Каждый элемент массива содержит 6 параметров:

- $G \max_k$ - максимальная невязка группы;
- $G \min_k$ - минимальная невязка группы;
- $G \text{start}_k$ - время первой точки группы;
- $G \text{stop}_k$ - время последней точки группы;
- $G \text{nm}_k$ - число точек, по которым была построена группа;
- $G \text{na}_k$ - число точек, которые могут быть отнесены к данной группе.

Формирование массива групп происходит следующим образом. Последовательно просматриваются точки исходного массива. Проверяется условие

$$\left| (\hat{\psi}_{i+1} - \hat{\psi}_i) - a(\hat{t}_{i+1} - \hat{t}_i) \right| < k\sqrt{2}\sigma_0. \quad (2.13)$$

Если условие (2.13) выполняется, корректируются параметры текущего m -го элемента массива: $G \max_k$, $G \min_k$, $G \text{start}_k$, $G \text{stop}_k$ и $G \text{nm}_k$. В противном случае начинает формироваться новый элемент массива групп. После завершения формирования массива групп, для каждого элемента массива групп определяется число точек исходного массива, которое можно отнести к данной группе. Для этого проверяется: попадает ли невязка проверяемой точки в интервал между минимальной и максимальной невязкой группы. Одна точка может быть отнесена к нескольким группам.

Шаг 4. Анализ результатов

Сначала исключаются точки, которые не относятся ни к какой группе. Как правило, это отдельные аномальные точки. Затем анализируются группы и отмечаются те из них, которые соответствуют аномальным измерениям. Затем исключаются точки, относящиеся к отмеченным группам.

Выделение групп аномальных измерений может производиться автоматически или вручную. При работе по проекту «Фобос-2» использовалась ручная технология. Алгоритм автоматического выделения групп аномальных измерений приведен в разделе 2.2.5.

2.2.5. Выделение групп аномальных измерений

Алгоритм состоит из 5 шагов.

Шаг 1. Построение линейных регрессий

Для каждой группы k выбираются точки, по которым была построена группа и по этим точкам строится линейная регрессия:

$$\psi_{i_k} = B_k + A_k \hat{t}_{i_k} + \varepsilon_{i_k}, \quad (2.14)$$

где

$$i_k \in J_k$$

J_k - множество значений индекса по исходному массиву, соответствующее точкам группы k ;

$\{\hat{\psi}_{i_k}, \hat{t}_{i_k}\}$ - массив исходных пар после преобразования (см. п. 2.1.3).

Наряду с параметрами линейной регрессии B_k и A_k определяются величины:

$s_{0,k}$ - среднеквадратическое величин ε_{i_k} ;

$s_{B,k}$ - ошибка определения B_k .

Шаг 2. Контроль по среднеквадратическим значениям

Из дальнейшего рассмотрения удаляются группы, у которых $s_{0,k} > \sigma_0$.

Шаг 3. Установка веса группы

Для каждой группы определяется значение параметра $Nall_k$ — число точек, которое может быть отнесено к данной группе.

$$Nall_k = Nb_k + \sum_{\substack{i \neq k \\ |B_i - B_k| < s_{B,k}}} Nb_i, \quad (2.15)$$

где

Nb_i - число точек, по которым была построена группа i .

Шаг 4. Выбор основной группы

Выбирается группа k^* , для которой значение $Nall_{k^*}$ максимально. Если имеется несколько таких групп, выбирается группа с минимальным значением индекса.

Шаг 5. Выделение групп некачественных измерений

Исключаются все группы, точки которых не могут быть отнесены к группе, выбранной на шаге 4, т.е. если выполняется условие

$$\left| B_i - B_{k^*} \right| \geq s_{B,k^*}, \quad (2.16)$$

группа исключается.

2.3. Примеры работы алгоритмов

Примеры работы алгоритма на измерениях, полученных по КА «Фобос-2» в 1988-1989 гг, показаны на рисунках 1-4. В верхней части каждого рисунка показаны невязки измеренных и расчетных значений для всех измерений. Треугольными метками отмечены аномальные измерения. В нижней части рисунка показаны только измерения, оставшиеся после удаления аномальных измерений. Сплошной линией показана линейная функция, аппроксимирующая невязки и построенная по алгоритму 2.1. По оси ординат отложены

невязки в м (рис. 1-3) и мм/с (рис. 4). По оси абсцисс отложено время в часах, минутах, секундах.

Результаты локальной обработки всех массивов измерений, проведенных в сантиметровом диапазоне по КА «Фобос-2», показаны в таблице 6.

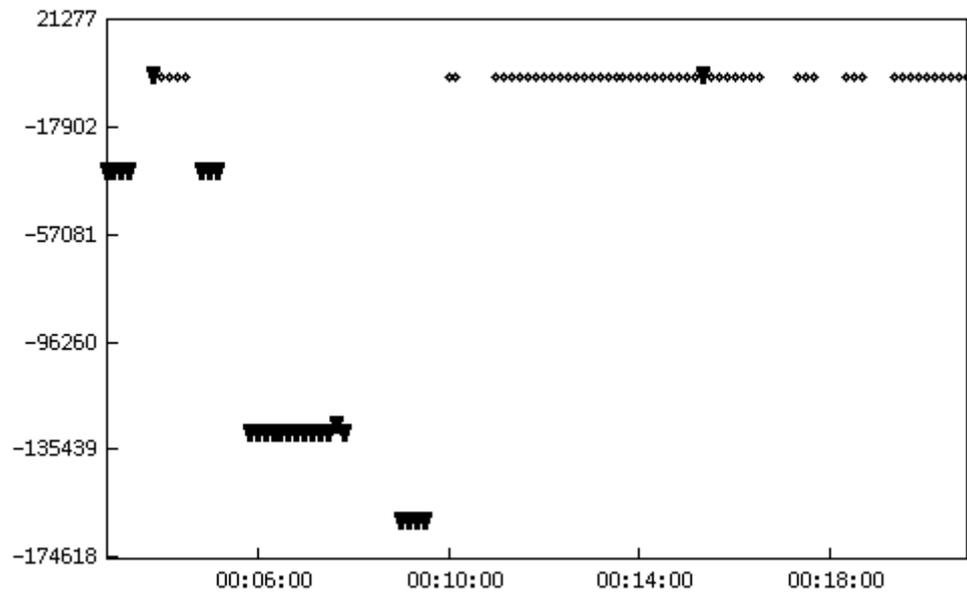
Таблица 6

Участок	Тип измерений	Всего массивов	Потребовалось применение алгоритма 2.2	Получен положительный результат
Участок перелета Земля-Марс	Измерения наклонной дальности	159	31	26
	Измерения радиальной скорости	192	22	11
Участок полета по орбите искусственного спутника Марса	Измерения наклонной дальности	8	2	2
	Измерения радиальной скорости	273	16	8

Литература

1. Э.Л. Аким, И.К. Бажинов, В.П. Павлов, В.Н. Почукаев. Поле тяготения Луны и движение ее искусственных спутников. М.: Машиностроение, 1984.
2. Тучин А.Г., Шатаев В.В. Реализация реляционной СУБД с языком данных типа SQL // Препринт № 54, М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 1990, 28 с.
3. Небесно-механическая интерпретация и первичная обработка измерений КА "Гранат" и "Интербол". Э.Л. Аким, А.А. Горохова, И.П. Киселева, В.А. Степаньянц, А.Г. Тучин // Препринт № 83, М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 1996, 21 с.
4. Небесно-механическая интерпретация измерений радиосистемы межпланетных космических аппаратов «Квант-Д». Э.Л. Аким, А.А. Горохова, И.П. Киселева, В.А. Степаньянц, А.Г. Тучин // Препринт №2, М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2002, 21с.
5. Радиосистемы межпланетных космических аппаратов. Р.В.Бакитько, М.Б. Васильев, А.С. Веницкий и др. // М.: Радио и связь, 1993, 328 с.
6. М.А. Колосов, Н.А. Арманд, О.И. Яковлев. Распространение радиоволн при космической связи // М.: Связь, 1969, 155 с.
7. Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных. Под ред. П.А. Агаджанова, В.Е. Дулевича, А.А. Коростелева // М.: Советское радио, 1969, 504 с.
8. Ф.Б. Черный. Распространение радиоволн // М.: Советское радио, 1972, 464 с.
9. А.Г. Квашнин, А.Г. Тучин. Баллистическое обеспечение радиоинтерферометрических измерений // Препринт № 98, М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 1992, 26 с.

До удаления аномальных измерений



После удаления аномальных измерений

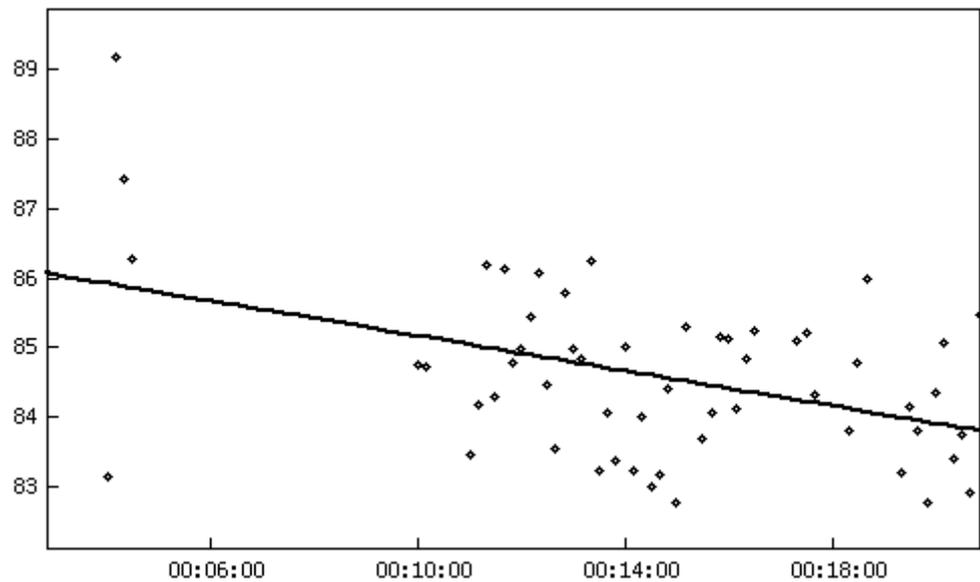


Рис.1. Невязки измеренных и расчетных значений до и после удаления аномальных измерений. По оси ординат — значения невязок в м, по оси абсцисс — время. Измерения наклонной дальности 1-го комплекта 292-го сеанса, проведенного из Евпатории 1988/08/19.

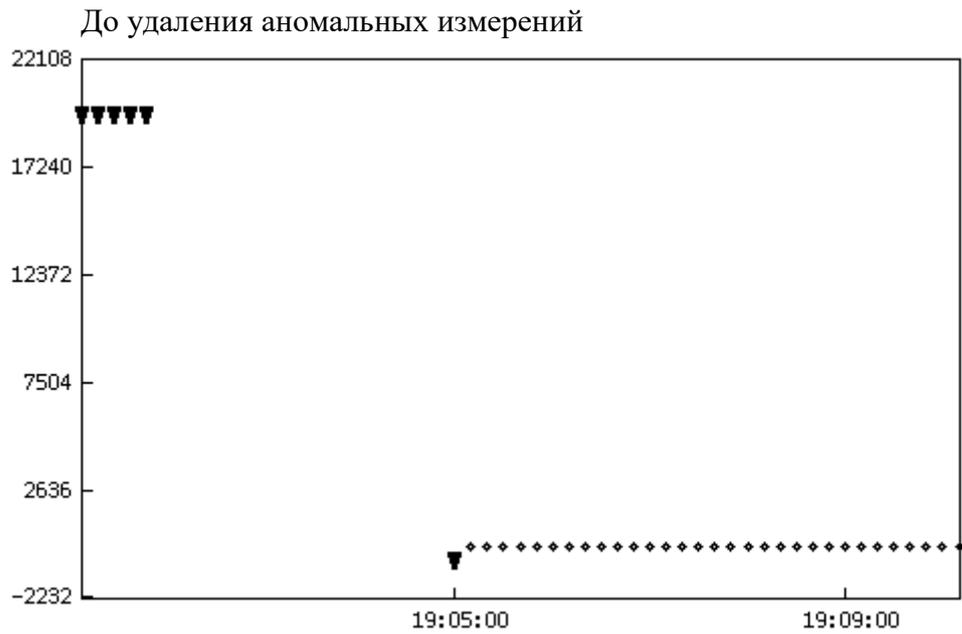


Рис.2. Невязки измеренных и расчетных значений: до и после удаления аномальных измерений. По оси ординат — значения невязок в м, по оси абсцисс — время. Измерения радиальной скорости 2-го комплекта 833-го сеанса, проведенного из Евпатории 1988/10/20.

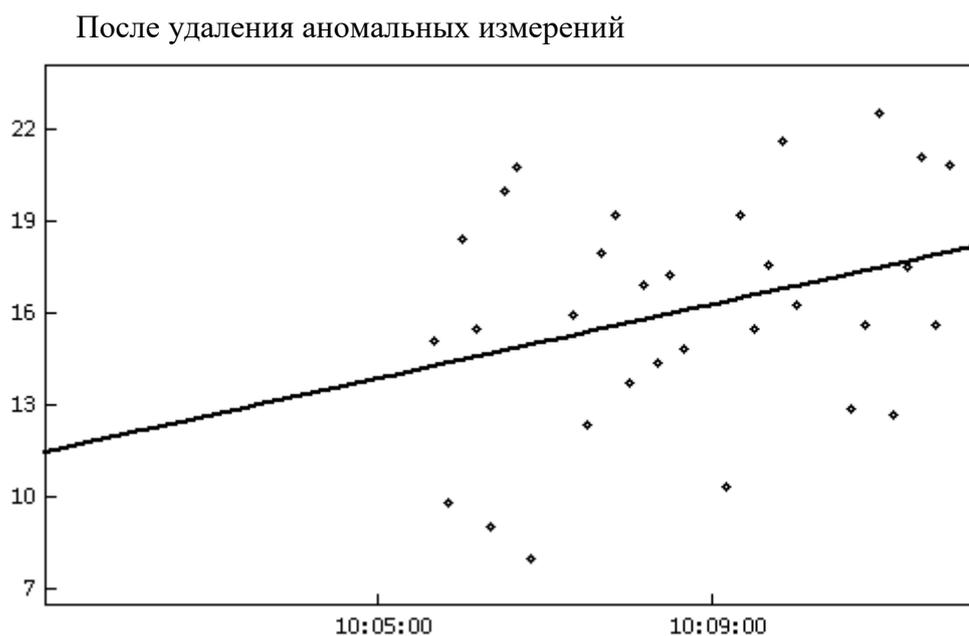
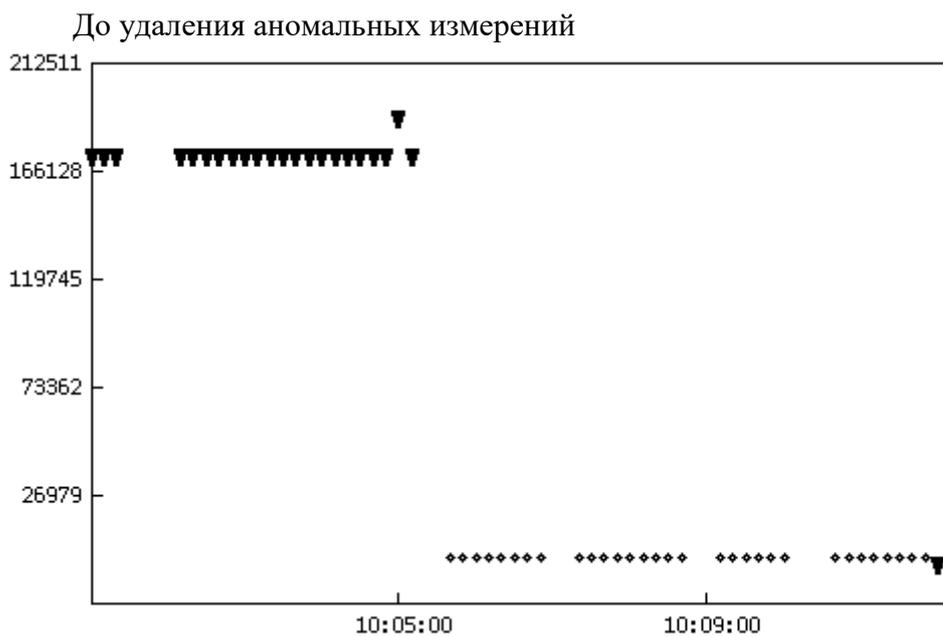
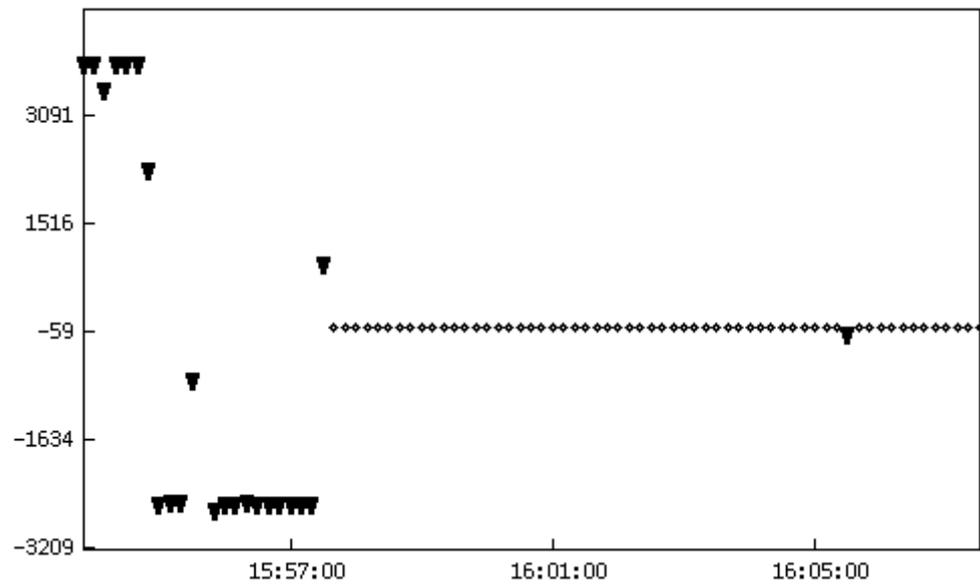


Рис.3. Невязки измеренных и расчетных значений: до и после удаления аномальных измерений. По оси ординат — значения невязок в м, по оси абсцисс — время. Измерения наклонной дальности 2-го комплекта 353-го сеанса, проведенного из Уссурийска 1988/12/06.

До удаления аномальных измерений



После удаления аномальных измерений

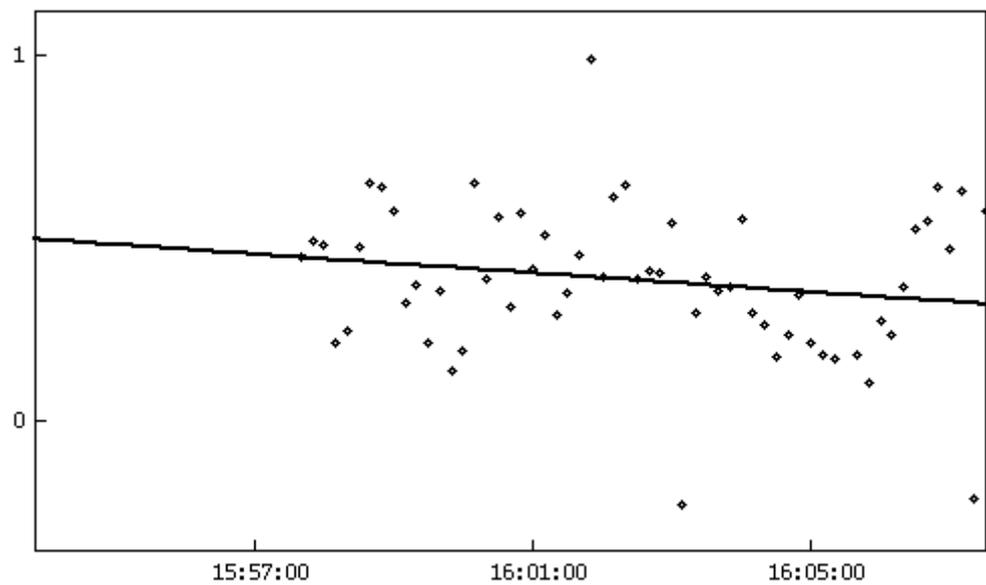


Рис.4. Невязки измеренных и расчетных значений до и после удаления аномальных измерений. По оси ординат — значения невязок в мм/с, по оси абсцисс — время. Измерения радиальной скорости 1-го комплекта 831-го сеанса, проведенного из Евпатории 1989/01/20.