

## МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

к.т.н. В.И. Зюбин, С.Д. Недзельский, В.М. Коновалов  
(представил д.т.н., проф. Д.В. Голкин)

В интересах повышения точности оценивания параметров орбиты космических объектов по методу наименьших квадратов предлагается методика формирования весовых коэффициентов радиолокационных измерений, основанная на использовании остаточных невязок сопровождения.

При оценивании параметров орбит космических объектов (КО) по результатам неравноточных радиолокационных наблюдений важное место занимает вопрос адекватного выбора весовых коэффициентов сглаживания. Из-за некорректного назначения весовых коэффициентов измерений при организации итерационных процедур метода наименьших квадратов (МНК) могут наблюдаться расходимость итерационного процесса, существенные отклонения оценок параметров орбиты от фактических, увеличение количества итераций МНК до выполнения выбранного критерия сходимости.

Вышеизложенное не противоречит известным сведениям о том, что точность оценок, полученных по МНК в процессе обработки радиолокационной информации, зависит с одной стороны от фактической точности измерений, характеризуемой ковариационной матрицей  $\mathbf{K}_x$ , а с другой - от способа назначения весовой матрицы  $\mathbf{P}$  [1]. При этом оптимальным способом считается назначение весов в соответствии с формулой

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}_x^{-1},$$

где  $\mathbf{K}_x$  - ковариационная матрица ошибок измерений с диагональными элементами  $\sigma_i^2$  (дисперсиями  $i$ -го параметра измерения).

В действительности, при организации наблюдений, например, в геоцентрической подвижной системе координат, корреляционная матрица ошибок в общем случае недиагональна. Учет этого обеспечивает адекватное оценивание ошибок измерений, однако, требует усложнения процедуры обработки по МНК. Поэтому на практике осуществляется организация наблюдений в радиолокационной (топоцентрической сферической) системе координат или пересчет в эту систему координат полученных результатов наблюдений. В этом случае элементы взаимной корреляции ошибок измерений хоть и существуют, однако, в силу их незначительности, могут быть упущены при обработке. При таком подходе речь может идти о корреляции-

онной матрице ошибок диагонального вида. Тогда, в соответствии с [1], квадратичный функционал МНК преобразуется в сумму независимых квадратов взвешенных невязок параметров измерений, веса которых назначаются в соответствии с формулой  $p_i = 1 / \sigma_i^2$ . Именно здесь и возникает вопрос о том, где при обработке взять конкретные значения ошибок измерений. Ответ на этот вопрос имеет двоякий характер. С одной стороны, в процессе юстировки радиолокационной станции (РЛС), например, с использованием юстировочных космических аппаратов (КА), можно получить необходимые данные. С другой стороны, принимая во внимание влияние на точность измерений многочисленных возмущающих факторов и изменяющихся условий наблюдений, актуальным становится вопрос о рассмотрении ошибок измерений как интегральных ошибок возмущений.

Учитывая, что точность измерений неоднородна в пределах зоны обнаружения РЛС, а ряд возмущающих факторов нестационарен, авторы отдают предпочтение второму варианту. В этом случае при оценивании параметров орбит вместо паспортных ошибок РЛС в расчетах предпочтительнее учитывать невязки  $i$ -х измерений, состоящих из систематических ошибок  $\sigma_{i1}$  и случайных ошибок измерения  $\sigma_{i2}$ , которые в свою очередь учитывают влияние множества возмущающих факторов. Так как перечисленные ошибки являются независимыми, суммарная дисперсия ошибок измерений будет равна  $\sigma_i^2 = \sigma_{i1}^2 + \sigma_{i2}^2$ .

Задача получения и учета составляющих  $\sigma_i$  является сложной, потому что для этого требуется накопить и обработать громадный статистический материал. Если проблемы вычисления систематических ошибок  $\sigma_{i1}$  (к которым относятся ошибки интегрирования, инструментальные, методические, личные ошибки) решаются известными методами [2, 3], то определение ошибок измерения  $\sigma_{i2}$ , учитывающих изменения солнечной активности, геомагнитные возмущения, ошибки временной и геодезической привязки РЛС, изменения питающих напряжений, параметров излучения и ряд других случайных погрешностей, является очень трудоемкой задачей, требующей знания большого количества факторов.

Для разрешения данной проблемы при назначении весовых коэффициентов вместо вышеперечисленных ошибок предлагается учитывать оценки  $\sigma_i$ , полученные на основе невязок измерений к эталонным значениям параметров орбиты. В качестве эталона можно использовать собственно результаты уточнения параметров орбиты по выборке радиолокационных измерений. В этом случае речь идет об использовании остаточных невязок при формировании оценок  $\sigma_i$ . Процесс получения оценок  $\sigma_i$  осуществляется по следующему алгоритму:

- формирование начальных условий (НУ) параметров движения КО;
- сбор радиолокационных измерений;
- идентификация измерений;
- обработка измерений по МНК;
- формирование и накопление массива остаточных невязок по параметрам измерений;
- оценка среднеквадратических ошибок  $\sigma_i$  параметров измерения;
- расчет весовых коэффициентов  $p_i$ .

Предлагаемая методика была апробирована при обработке измерений в рамках сопровождения КА "Січ-1". На начальном этапе сопровождения КА "Січ-1" из-за отсутствия априорных данных об ошибках измерений обработка этих измерений проводилась с заданными паспортными значениями ошибок РЛС (табл. 1, вариант ошибок №1). Результаты расчетов показали некорректность выбора ошибок, так как взвешенная невязка МНК для 19 участков измерений (длительностью 5 - 7 дней каждый) колебалась в пределах от 3 до 6 (вместо ее матожидания, равного "1"). Кроме того, наблюдался регулярный сдвиг невязок, особенно по дальности и радиальной скорости, где паспортные ошибки были достаточно велики. Гистограммы невязок для паспортных ошибок измерений приведены на рис. 1, а среднеквадратичные значения невязок - в первой группе данных табл. 1.

На основе полученного массива среднеквадратичных значений невязок был осуществлен расчет весовых коэффициентов  $p_i$  и вновь проведена обработка измерений. Результаты обработки и гистограммы невязок уточненного прогноза приведены в табл. 1 (вариант № 2) и на рис. 2. В табл. 2 отображен сравнительный анализ сходимости МНК для двух вариантов ошибок.

Таблица 1

Результаты обработки измерений РЛС с различными вариантами весовых коэффициентов

| О Ш И Б К И И З М Е Р Е Н И Й И Н Е В Я З К И М Н К |       |               |                  |            |                |
|---|-------|---------------|------------------|------------|----------------|
| Номер измерительного пункта                         | Канал | Азимут, град. | Уг. места, град. | Дальн., м. | Рад.ск., м.\с. |
| 1. О Ш И Б К И И З М Е Р Е Н И Й, В А Р И А Н Т № 1 |       |               |                  |            |                |
| РЛС № 1   | 1, 2  | 0.167         | 0.583            | 1300       | 2.0            |
| РЛС № 2   | 3, 4  | 0.167         | 0.583            | 1300       | 2.0            |
| РЛС № 3   | 1, 2  | 0.083         | 0.292            | 870        | 2.0            |
| РЛС № 4   | 3, 4  | 0.083         | 0.292            | 870        | 2.0            |
| НЕВЯЗКИ МНК   |       | 0.93          | 1.39             | 961.0      | 2.53           |
| 2. О Ш И Б К И И З М Е Р Е Н И Й, В А Р И А Н Т № 2 |       |               |                  |            |                |
| РЛС № 1   | 1, 2  | 0.7           | 1.0              | 500        | 1.3            |
| РЛС № 2   | 3, 4  | 0.7           | 1.0              | 500        | 1.3            |
| РЛС № 3   | 1, 2  | 0.7           | 1.0              | 500        | 1.3            |

|             |      |      |      |       |     |
|-------------|------|------|------|-------|-----|
| РЛС № 4     | 3, 4 | 0.7  | 1.0  | 500   | 1.3 |
| НЕВЯЗКИ МНК |      | 0.75 | 1.40 | 300.0 | 0.9 |

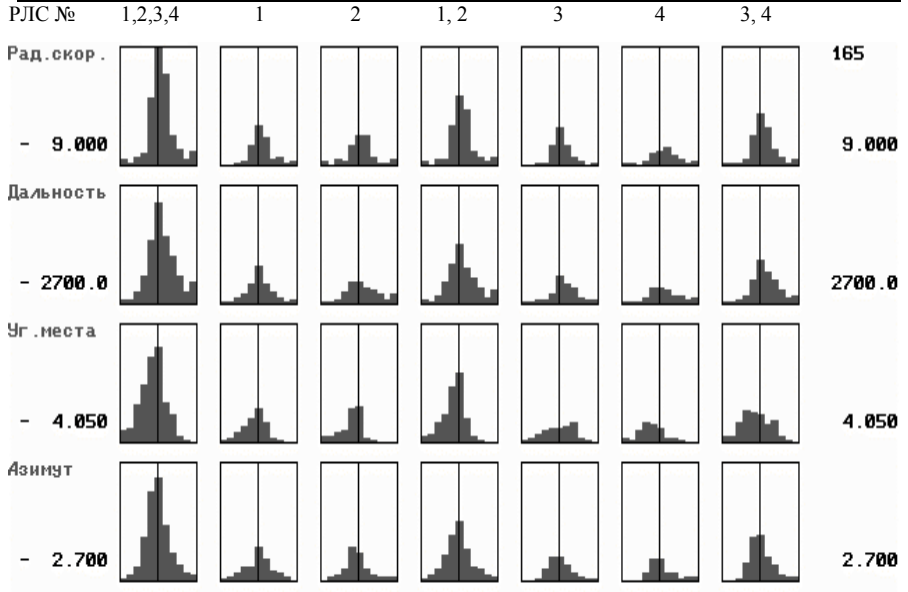


Рис. 1. Гистограммы невязок уточненного прогноза для варианта ошибок №1

| РЛС № | 1,2,3,4 | 1 | 2 | 1, 2 | 3 | 4 | 3, 4 |
|-------|---------|---|---|------|---|---|------|
|-------|---------|---|---|------|---|---|------|

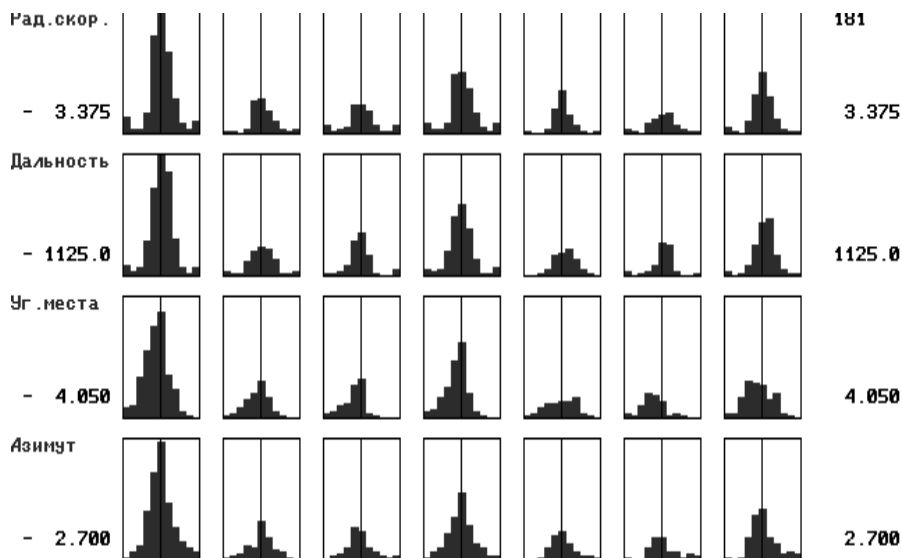


Рис. 2. Гистограммы невязок уточненного прогноза для варианта ошибок №2

Таблица 2

Сходимость МНК (число итераций и взвешенная невязка)  
при различных вариантах ошибок измерений РЛС

| NN   | 1-й вариант |      | 2-й вариант |      | NN   | 1-й вариант |      | 2-й вариант |      |
|------|-------------|------|-------------|------|------|-------------|------|-------------|------|
|      | Nmnk        | Rmnk | Nmnk        | Rmnk |      | Nmnk        | Rmnk | Nmnk        | Rmnk |
| 1.   | 3           | 3.36 | 5           | 1.12 | 11.  | 3           | 4.84 | 4           | 1.00 |
| 2.   | 4           | 3.17 | 4           | 1.03 | 12.  | 3           | 3.99 | 5           | 1.04 |
| 3.   | 6           | 3.83 | 4           | 1.10 | 13.  | 3           | 4.30 | 4           | 1.01 |
| 4.   | 8           | 4.02 | 5           | 1.14 | 14.  | 3           | 7.08 | 6           | 1.03 |
| 5.   | 3           | 4.75 | 4           | 1.22 | 15.  | 3           | 3.96 | 4           | 1.10 |
| 6.   | 5           | 4.21 | 4           | 1.00 | 16.  | 3           | 4.76 | 3           | 1.25 |
| 7.   | 4           | 4.33 | 3           | 1.17 | 17.  | 4           | 4.28 | 4           | 1.08 |
| 8.   | 5           | 4.38 | 5           | 1.27 | 18.  | 3           | 5.55 | 4           | 1.09 |
| 9.   | 4           | 3.34 | 4           | 1.26 | 19.  | 3           | 4.85 | 4           | 0.91 |
| 10.  | 3           | 5.07 | 4           | 1.21 |      |             |      |             |      |
| Time | 02:55:06    |      | 01:25:08    |      | Time | 02:55:06    |      | 01:25:08    |      |

Анализ данных таблиц и графиков позволил сделать выводы:

- получение ошибок измерений согласно предлагаемой методике (а, следовательно, корректное назначение весовых коэффициентов) существенно улучшает точность полученных результатов (снижает величины невязок);

- взвешенная невязка метода наименьших квадратов при таком подходе приближается к "1";
- скорость сходимости метода наименьших квадратов (число итераций) увеличивается в 1,5 - 2 раза (табл. 2);
- смещение гистограмм (т.е. математических ожиданий оцениваемых параметров) также снижается.
- уменьшается разность прогнозных и уточненных начальных условий.

Таким образом, предлагаемая методика представляет собой адаптивную схему формирования весовых коэффициентов с обучением, где обучающим фактором является массив остаточных невязок параметров измерений с эталонными значениями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мудров В.И. , Кушко В.Л. Методы обработки измерений. – М.: Радио и связь, 1983. – 304 с.
2. Агаджанов П.А. , Дулевич В.Е. , Коростелев А.А. Космические траекторные измерения. – М.: Сов. радио, 1969. – 504 с.
3. Хьюбер П. Робастность в статистике. – М.: Мир, 1984. – 467 с.

*Поступила в редколлегию 15.03.2001*

---