

УДК 621.371

В. В. БАВЫКИНА, канд. техн. наук, *Ю. А. КОВАЛЬ*, канд. техн. наук,
А. В. ПОПОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕСОВОЙ
ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ
РАДИОМЕТЕОРНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ШКАЛ ЭТАЛОНОВ
ВРЕМЕНИ**

Одним из направлений повышения точности информационно-измерительных систем является совершенствование алгоритмов статистической обработки измерительной информации. Это в полной мере относится и к радиометеорным системам синхронизации (РМСС) территориально разнесенных шкал хранителей времени.

Одним из недостатков используемых в настоящее время алгоритмов статистической обработки информации в РМСС является отсутствие учета неравноточности результатов измерений как в пределах каждого метеора, так и на различных метеорах [1]. Как показано в [2], при совместной обработке неравноточных рядов измерений целесообразно использовать весовую статистическую обработку, при этом веса могут быть выбраны прямо пропорциональными количеству наблюдений в отдельных рядах и обратно пропорциональными их дисперсиям.

Хотя о принципиальной возможности применения весовой обработки результатов измерений в РМСС упоминалось в работах [3; 4], сопоставительный анализ различных алгоритмов и оценки выигрыша в точности с учетом особенностей радиометеорного метода синхронизации эталонов времени отсутствуют. Решению перечисленных задач и посвящена настоящая работа.

Причинами неравноточности результатов измерений в РМСС являются флуктуации амплитуд принимаемых сигналов как в пределах метеорного следа, так и при переходе от следа к следу; изменение уровня помех; случайные вариации времени задержки в трактах аппаратуры. О количественной оценке неравноточности результатов можно судить по значениям среднеквадратических отклонений (СКО) результатов единичных измерений σ , полученным при обработке экспериментальных результатов и результатов моделирования работы РМСС.

Таблица 1

Номер группы	Пределы изменения амплитуд в группе	Относительное СКО единичного измерения
1	0—10	2,98
2	10—20	1,94
3	20—30	1,33
4	30—40	1,00

В табл. 1 приведены оценки значений σ для четырех групп измерений, отличающихся уровнями амплитуд принимаемых сигналов. Следует отметить, что в пределах каждой группы амплитуды сигналов изменяются в определенных пределах.

Существенно различаются значения СКО для различных метеоров, поскольку метеорные эхо-сигналы отличаются не только уровнем амплитуд сигналов, но и продолжительностью, а значит, числом наблюдений.

Анализ результатов наблюдений, полученных на 110 метеорах, и такого же объема наблюдений на модели РМСС показал, что размах СКО составляет 27,4 раза для реальных измерений и 31,8— для модели.

Была проведена проверка гипотезы о неравноточности наблюдений на i -м и j -м метеорах по критерию Фишера, основанному на распределении статистики:

$$F = \max [\sigma_i^2/\sigma_j^2; \sigma_j^2/\sigma_i^2].$$

Эта гипотеза подтверждается в 60 % случаев с уровнем значимости 0,01.

Проведенный количественный анализ неравноточности результатов измерений в РМСС убедительно показывает, что статистическая апостериорная обработка результатов наблюдений сдвига шкал должна быть весовой.

Обозначим результат единичного измерения (наблюдения) сдвига шкал времени ΔT_{ij} , где i — номер метеорного радиозеха в сеансе ($i=1, m$), j — номер измерения в пределах метеорного зеха ($j=1, n_i$), k — номер импульса в кодовой последовательности ($k=1, M$). Здесь m — количество метеоров за сеанс, n_i — число измерений на i -м метеоре; M — количество импульсов в «пачке».

В настоящее время в существующих образцах аппаратуры результаты наблюдений по каждому из импульсов кодовой последовательности аппаратурно усредняются, что приводит к регистрируемым результатам измерений

$$\Delta T_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \Delta T_{ijk}. \quad (1)$$

Одним из возможных вариантов выбора значений весовых коэффициентов, учитывая известное соотношение между СКО результата измерения и соотношением сигнал-помеха, может быть

$$p_{ij} = \left(\frac{A_{ij}}{A_{\max}} \right)^2,$$

где A_{ij} — амплитуда принимаемой кодовой последовательности; A_{\max} — максимальное значение амплитуды за сеанс. При этом оценку сдвига шкал можно производить или в один этап по всему массиву ΔT_{ij} , или в два этапа — вначале по каждому метеору, а затем по результатам обработки по каждому метеору выполняется вычисление оценок сдвига шкал за сеанс.

Для весовой обработки по всему массиву наблюдений используются соотношения:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta T} &= \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij} \Delta T_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}}; \\ \sigma^2 &= \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij} (\Delta T_{ij} - \overline{\Delta T})^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}}, \end{aligned}$$

где ΔT — среднее арифметическое результатов наблюдений, принимаемое за оценку сдвига шкал времени; σ^2 — оценка дисперсии результата наблюдения.

При весовой обработке в два этапа для наблюдений, полученных на i -ом метеоре, вычисляются оценка сдвига шкал

$$\Delta T_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} p_{ij} \Delta T_{ij}}{\sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}}; \quad (2)$$

оценка дисперсии результата наблюдения

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} p_{ij} (\Delta T_{ij} - \Delta T_i)^2}{\sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}}; \quad (3)$$

оценка дисперсии результата измерения

$$\sigma_{\Delta T_i}^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n_i} M/\sigma_{ij}^2}; \quad (4)$$

весовой коэффициент измерения на i -м метеоре

$$p_i = \frac{n_i}{\sigma_i^2}. \quad (5)$$

Далее определяются характеристики измеряемой величины за сеанс: оценка сдвига шкал, оценка дисперсии результата наблюдения и оценка дисперсии результата измерения соответственно

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^m p_i \Delta T_i}{\sum_{i=1}^m p_i}; \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^m p_i (\Delta T_i - \Delta \bar{T})^2}{\sum_{i=1}^m p_i}; \quad (7)$$

$$\sigma_{\Delta T}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^m n_i / \sigma_i^2}. \quad (8)$$

Для проверки рассмотренных алгоритмов была проведена весовая статистическая обработка массива реальных наблюдений с известным значением измеряемой величины (табл. 2). Для сравнения приведены результаты невесовой статистической обработки в один и в два этапа.

Таблица 2

Вид обработки		СКО результата наблюдения, нс
Обработка в один этап	невесовая	118
	весовая	78
Обработка в два этапа	невесовая	42
	весовая	29

При обработке в один этап без учета веса наблюдений использовались соотношения

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \Delta T_{ij}}{\sum_{i=1}^m n_i};$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (\Delta T_{ij} - \Delta \bar{T})^2}{\sum_{i=1}^m n_i - 1}.$$

Невесовая обработка в два этапа производилась по формулам

$$\Delta T_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} \Delta T_{ij}}{n_i}; \quad (9)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (\Delta T_{ij} - \Delta T_i)^2}{n_i - 1}; \quad (10)$$

$$\sigma_{\Delta T_i}^2 = \frac{\sigma_i^2}{n_i} \quad (11); \quad \Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta T_i}{m}; \quad (12)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\Delta T_i - \Delta \bar{T})^2}{m - 1} \quad (13); \quad \sigma_{\Delta \bar{T}}^2 = \frac{\sigma^2}{m}. \quad (14)$$

Очевидно, что обработка в два этапа по сравнению с обработкой в один этап, а также весовая обработка по сравнению с невесовой дают выигрыш в точности определения сдвига шкал времени.

Обработка результатов реальных измерений показывает, что выбор весовых коэффициентов прямо пропорционален квадрату нормированной амплитуды принимаемой кодовой последовательности, хотя в целом и приводит к повышению точности измерения сдвига шкал при статистической обработке, однако не в такой степени, как можно было ожидать, исходя из диапазона изменения полученных p_{ij} . Это объясняется большими отклонениями результатов измерений в начале и конце радиометеорного эха, хотя амплитуды принимаемых сигналов, а значит, и p_{ij} при этом сравнительно велики. Кроме этого, возможно изменение уровня помех в течение длительных сеансов измерений. Поэтому более объективными могут быть значения весовых коэффициентов, полученные в результате статистической обработки результатов наблюдений за период сличения, т. е. по «пачке» импульсов:

$$p_{ij} = \frac{1}{\sigma_{ij}^2}, \quad (15)$$

$$\text{где } \sigma_{ij}^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (\Delta T_{ijk} - \Delta T_{ij})^2. \quad (16)$$

Аппаратурная реализация таких измерений и вычислений, учитывая широкое использование средств вычислительной техники в современных РМСС, не вызывает принципиальных затруднений. При этом целесообразно сохранить измерение амплитуд принимаемых сигналов с целью диагностики канала и аппаратуры.

В зависимости от того, на каких этапах вводить весовую обработку результатов наблюдений, можно предложить четыре алгоритма обработки (табл. 3).

Таблица 3

Алгоритм	1	2	3	4
Весовая обработка в течение метеора	нет	нет	есть	есть
Весовая обработка за сеанс	нет	есть	нет	есть
Используемые формулы	(1), (16) (9)–(14)	(1), (16), (9)–(11), (6)–(8)	(1), (15), (16), (2)–(5), (12)–(14)	(1), (15), (16), (2)–(8)

Таблица 4

Алгоритм	1	2	3	4
Относительное значение	37	9,95	7,4	1

Рассмотренные четыре алгоритма статистической обработки были проверены на результатах наблюдений известной величины, полученных в результате моделирования работы РМСС (табл. 4).

Расчеты показали, что наиболее перспективна полная (двойная) весовая обработка результатов измерений и в пределах радиометеорного эха, и за сеанс (алгоритм 4) / Практическое использование двойной весовой обработки потребует, помимо используемого в настоящее время аппаратурного усреднения результатов наблюдения в «пачке», реализовать вычисление σ_{ij} в соответствии с формулой (16).

Список литературы: 1. *Новый комплекс аппаратуры для сличения эталонов времени и частоты по радиометеорному каналу*/Б. С. Дудник, Б. Л. Кашеев, Ю. А. Коваль и др.//Измер. техника. 1986, № 4. С. 15—16. 2. *Бурдун Г. Д., Марков Б. Н.* Основы метрологии. М., 1985. 256 с. 3. *Сидоров В. В.* Управление шкалами времени при измерениях по метеорным отражениям//Метеор. распространение радиоволн. 1979. № 14. С. 89—103. 4. *Анализ путей совершенствования радиометеорной системы синхронизации эталонов времени Госстандарта СССР*/С. Б. Пушкин, Б. Л. Кашеев, Б. С. Дудник и др.//Докл. VII науч.-техн. конф. «Метрология в радиоэлектронике». М., 1988. С. 307—308.

Поступила в редакцию 13.04.89