

*В. В. БАВЫКИНА, канд. техн. наук, Б. Л. КАЩЕЕВ, д-р. техн. наук,
Ю. А. КОВАЛЬ, д-р. техн. наук, С. Г. КУНДЮКОВ, Ю. А. ЛЕМАН,
Г. В. НЕСТЕРЕНКО, канд. техн. наук, С. Ф. СЕМЕНОВ*

ОЦЕНКА КРАТКОВРЕМЕННОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛОВ ПРИ МЕТЕОРНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН

Кратковременная нестабильность и невзаимность метеорного радиоканала (МРК) определяют предельные точностные характеристики радиометеорного метода сличения шкал эталонов времени. Изучению кратковременной нестабильности метеорного радиоканала посвящено значительное число работ, в которых теоретически и на основе экспериментальных данных исследовались вариации амплитудно-временных и фазовременных характеристик (АВХ и ФВХ), а также доплеровское изменение частоты принимаемых сигналов. Фазовая нестабильность или, что равнозначно, нестабильность времени задержки сигналов, в основном определяет значение трассовой погрешности для ретрансляционных алгоритмов сличения шкал разнесенных эталонов времени.

Требование стабильности означает, что характеристики канала, а, значит, и амплитуда, задержка, частота и начальная фаза принимаемого сигнала остаются неизменными в течение определенного интервала времени. Если интервал наблюдения не превосходит длительности метеорного радиозоха, то говорят о кратковременной нестабильности МРК.

Требование взаимности означает, что характеристики канала одинаковы при распространении по нему в прямом и обратном направлениях, а, следовательно, одинаковы и характеристики принимаемых сигналов, излученных одновременно навстречу друг другу из пунктов хранения шкал времени.

В теории радиометеорной синхронизации понятия стабильности и взаимности обычно используются в смысле кратковременной стабильности временной задержки и взаимности временной задержки сигналов точного времени.

На интервалах времени, превышающих длительность отдельного метеора, МРК обладает значительной амплитудной и фазовой нестабильностью. Широкий спектр масс регистрируемых метеорных частиц (от 10^{-6} г и выше), их начальных скоростей и случайные координаты метеорного следа, ограниченные размерами метеорной зоны и характеристиками антенн, приводят к тому, что линейная плотность электронов следа и длина пути, проходимого электромагнитной волной, изменяются в широких пределах. Следствием этого является значительный диапазон регистрируемых амплитуд отраженных сигналов, определяемый, в основном, динамическим диапазоном приемника (около 100 дБ).

Нестабильность амплитуды отраженного сигнала приводит к изменению помеховой погрешности, обусловленной конечностью отношения сигнал-помеха, и к вариации аппаратурной погрешности, вызванной зависимостью задержки сигнала в трактах от его амплитуды. В этом проявляется взаимозависимость различных видов погрешностей радиометеорной синхронизации.

Для снижения погрешности, обусловленной амплитудной нестабильностью рассеянного сигнала, в аппаратуре сличения используется мгновенная автоматическая регулировка усиления. Наряду с аппаратурными способами снижения погрешности сличения перспективно использование алгоритмов вторичной обработки, учитывающих широкий диапазон амплитуд отраженных сигналов и др. статистические особенности радиометеорного канала.

К настоящему времени выявлены следующие основные причины, вызывающие кратковременную нестабильность времени задержки сигналов (фазовую нестабильность) при метеорном распространении радиоволн:

- 1) дифракция на образующемся метеорном следе [1,2];
- 2) ветровое перемещение отражающей области [2,3];
- 3) диффузное расширение метеорного следа [4,5];
- 4) резонанс в метеорном следе [5];
- 5) многолучевое распространение радиоволн [6].

Экспериментальному исследованию кратковременной фазовой нестабильности МРК посвящено сравнительно небольшое количество работ [3,7,8]. Их основные результаты помещены в табл.1. Сведения о нестабильности могут быть значительно дополнены, если использовать экспериментальные измерения скорости ветра в метеорной зоне, проводимые методом радиолокации метеоров [2].

Таблица 1

| Авторы | Литература, год | Среднее значение, рад/с | СКО, рад/с | Максимальное значение, рад/с | Несущая частота, МГц | Учитывалось изменение знака |
|---|-----------------|-------------------------|------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Марч Д.Н. | [10], 1966 | $2,5 \cdot 2\pi$ | — | — | — | нет |
| Дудник Б.А. Кащеев Б.Л. Смирнов А.Н | [11], 1971 | — | — | $15 \cdot 2\pi$ | 72 | нет |
| Михайлов В.К. Сидоров В.В. | [3], 1976 | $0,5 \cdot 2\pi$ | $2 \cdot 2\pi$ | $7 \cdot 2\pi$ | — | да |
| Елисеев В.И., Черный В.И. | [7], 1978 | $0,39 \cdot 2\pi$ | $4,9 \cdot 2\pi$ | $12 \cdot 2\pi$ | 57 | да |
| Сидоров В.В., Курганов А.Р. и др. | [8], 1981 | $2,1 \cdot 2\pi$ | — | $8 \cdot 2\pi$ | 60 | нет |
| Кащеев Б.Л., Дудник Б.С., Коваль Ю.А. и др. | [12], 1992 | $2,85 \cdot 2\pi$ | $2,7 \cdot 2\pi$ | $25 \cdot 2\pi$ | 57 | нет |

Недостатками экспериментальных исследований являются сравнительно низкая точность результатов измерений, обусловленная низкой стабильностью частот несущей и гетеродинов (10^{-5}) и недостаточно высокой точностью определения временного положения сигналов, относительно низкий энергетический потенциал излучения (1...8 Дж в импульсах), а также использование сравнительно низкой несущей частоты (30 МГц) при измерении скорости ветра. Результаты исследований, приведенные в табл. 1, существенно отличаются друг от друга. Во многих работах отсутствуют необходимые статистические характеристики, включая вид закона распределения фазовой нестабильности.

Результаты исследований, приведенные в работах [9, 13] показывают, что абсолютная нестабильность временной задержки принимаемого сигнала составляет единицы наносекунд за время, равное периоду сличения. Это существенно для высокоточных систем сличения, которые должны обеспечивать синхронизацию эталонов с погрешностью менее 10 нс. Поэтому необходимы дальнейшие исследования фазовой нестабильности с использованием высокоточных средств измерений с целью более полного статистического описания метеорного канала сличения, определения закона распределения нестабильности и ее числовых характеристик. Такое исследование позволит уточнить вклад трассовой погрешности, обусловленной кратковременной фазовой нестабильностью, в результирующую погрешность сличения и выработать способы ее снижения.

Существенно повысить точность измерения фазовой нестабильности МРК позволил новый радиометеорный комплекс сличения (РМКС), предназначенный для высокоточного сличения шкал разнесенных эталонов времени. В состав этого радиометеорного комплекса «МЕТКА-11» входят: устройство формирования, приема и обработки сигналов; цифровой блок; передающее устройство (ПУ); антенный коммутатор (АК); устройство пилотирования; ЭВМ; источник питания (ИП). Структурная схема аппаратуры «МЕТКА-11» приведена на рис. 1.

Устройство формирования, приема и обработки сигналов состоит из: синтезатора частот (СЧ); формирователя зондирующего сигнала (ФЗС); приемного устройства (ПрУ). Цифровой блок включает в себя: формирователь шкалы времени (ФШВ); кодирующее устройство (КУ); устройство цифровой обработки сигналов (УЦОС); устройство сопряжения с ЭВМ (УС); аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП); формирователь стробов обнаружения (ФСО).

Передающее устройство представляет собой усилитель мощности сигналов, излучаемых в метеорный радиоканал. Для обеспечения электромагнитной совместимости и необходимых тепловых режимов передающее устройство размещено в двух блоках (блок питания и высокочастотный блок). Антенный коммутатор позволяет использовать общий антенно-фидерный тракт для приема и излучения сигналов. Это необходимо для исключения влияния задержки сигналов в антенно-фидерном тракте на результаты измерений сдвига шкал. Устройство пилотирования введено для уменьшения аппаратурных систематических погрешностей и предназначено для измерения временных задержек,

| Характеристика | Значение показателя качества |
|---|---|
| Метод сличения | Встречный |
| Вид сигнала | Составной (13-ти позиционный фазоманипулированный (ФМ) сигнал и двухчастотный сигнал) |
| Длительность импульса, мкс | ФМ сигнал – 13x10 ДЧС – 256x5 |
| Ширина спектра, МГц | 0,2 |
| Импульсная мощность, кВт | 2...4 |
| Дискретность результатов измерений, нс | По огибающей ДЧС – 1,25 По фазе несущей – 0,1 |
| Погрешность, нс | По огибающей ДЧС – 10 |
| Дополнительные измеряемые параметры | Время задержки сигнала при распространении |
| Средняя скорость передачи информации, бод | 100...150 |

Основные особенности технической реализации аппаратуры «МЕТКА-11» – применение цифровой обработки и измерения временного положения сигналов как по фазе огибающей двухчастотного сигнала, так и по фазе несущей частоты; использование фазовой автоподстройки частоты синтезаторов частоты по сигналам эталонов; включение в состав аппаратуры ЭВМ для управления работой комплекса, обработки и вывода информации; применение для пилотирования аппаратурных задержек цифровой зеркальной ретрансляции сигналов и внешней измерительной антенны – позволили осуществлять измерение изменения времени задержки сигнала в метеорном радиоканале с высокой точностью.

В аппаратуре реализованы измерения изменения временной задержки принятого сигнала на несущей частоте 45,5 МГц с периодом измерения $T = 10$ мс. В целях экспериментального исследования временной нестабильности задержки на аппаратуре «МЕТКА-11» был получен достаточно представительный объем экспериментальных данных в локационном режиме и выполнена статистическая обработка массива результатов измерений объемом 1071 элемент, полученного на 142 метеорах. Структуру сеанса хорошо отображает рис. 2, а, на котором представлена гистограмма числа измерений времени задержки, выполненных за время существования радиоотражения от метеорного ионизированного следа. (В дальнейшем для краткости будем употреблять вместо выражения «за время существования радиоотражения от метеорного следа» выражение «на метеоре»). Следует заметить, что на 30 метеорах получено всего по два измерения. На рис. 2, в показано, как распределяются значения коэффициента, характеризующего наклон регрессионных модельных прямых, в зависимости от числа измерений на метеоре.

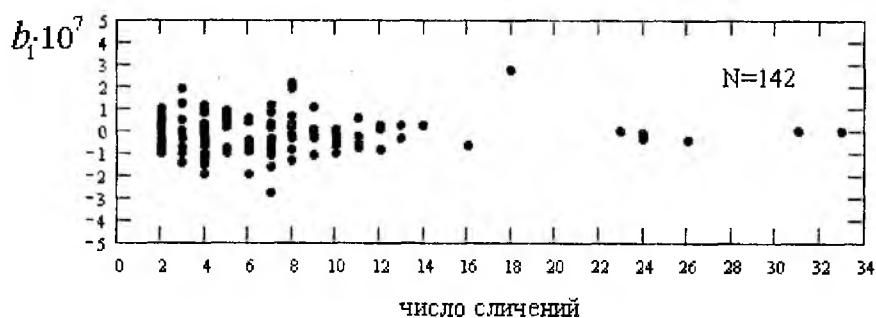
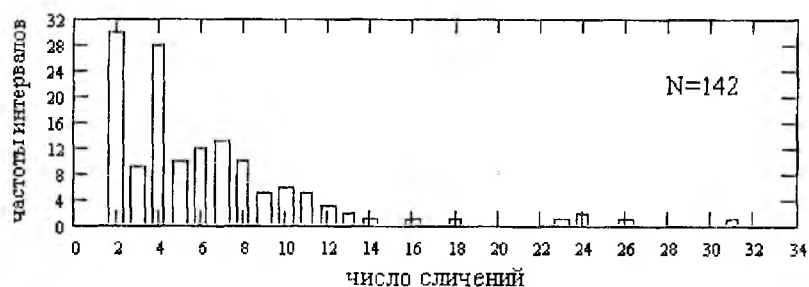


Рис. 2

Полученные на каждом метеоре временные ряды содержат достаточно четкие детерминированные изменения временной задержки – тренды. Пример результатов единичных измерений τ_{pi} изменения задержки принимаемого сигнала, выраженных в наносекундах, за время существования радиотражения от метеорного следа представлен на рис. 3, а и с точками. На этих же рисунках пунктирными линиями показаны линейные регрессионные модели первого и второго порядков соответственно, а на рис 3, б и 3, д приведены остатки, позволяющие судить о степени несоответствия модели экспериментальным данным. Для выявления трендов времени задержки и исследования экспериментальных результатов применялся математический аппарат прикладного регрессионного анализа [14].

Для каждой группы исходных данных, полученных за время существования радиоэхо от метеорного следа, проверялась линейная по параметрам модель, матричная запись которой имеет вид

$$Y = X \cdot \beta + \epsilon, \quad (1)$$

где Y – вектор результатов единичных измерений, элементами которого являются $Y_i = \tau_{pi}$; X – матрица независимых переменных, каждая i -я строка которой имеет вид $(1, X_i)$ для модели первого порядка и $(1, X_i, X_i^2)$ для модели второго порядка, причем, $X_i = i \cdot T$, где i – номер периода измерения, $T = 10$ мс; β – вектор параметров временной задержки, подлежащих оцениванию; $\beta = [\beta_0 \ \beta_1]$ и $\beta = [\beta_0 \ \beta_1 \ \beta_2]$ – для моделей первого и второго порядков соответственно; ϵ – вектор погрешностей.

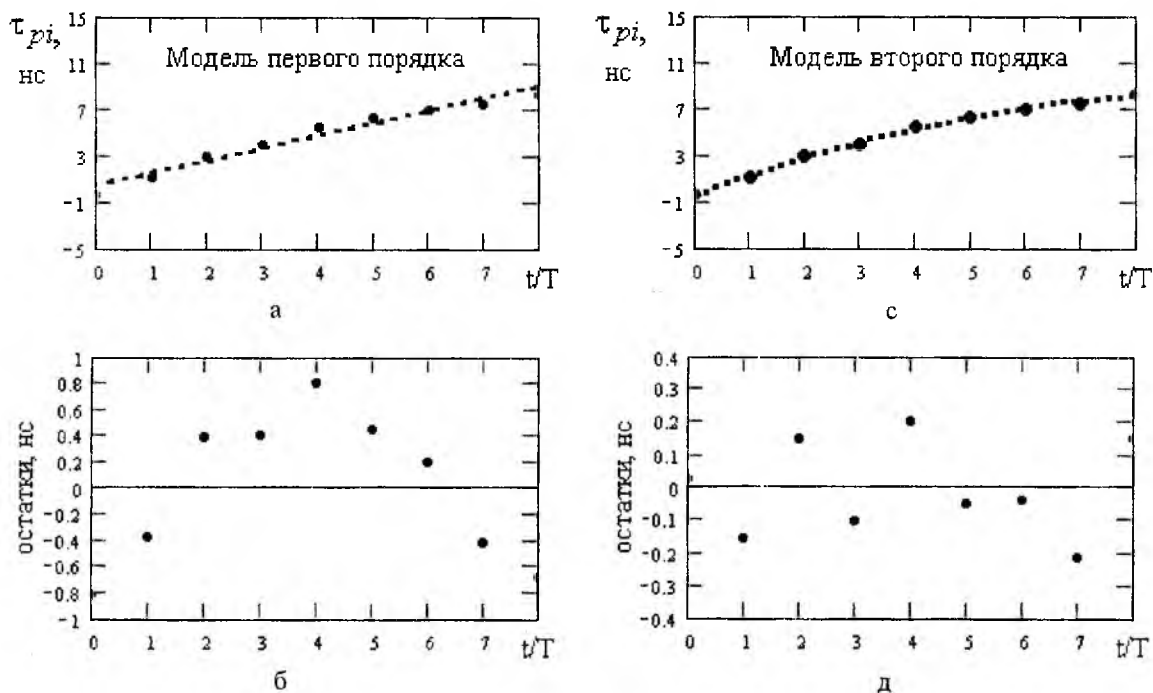


Рис. 3

Оценка вектора β определялась методом наименьших квадратов как

$$b = (X'X)^{-1} X'Y, \quad (2)$$

где X' – матрица, полученная транспонированием матрицы X ; $(X'X)^{-1}$ – матрица, обратная матрице $X'X$. Для модели первого порядка имеем $b' = [b_0 \ b_1]$, а для модели второго порядка – $b' = [b_0 \ b_1 \ b_2]$. Модель первого порядка рассчитывалась и проверялась на адекватность только для 112 метеоров, на каждом из которых было получено более двух измерений, а модель второго порядка – на 104 метеорах, на которых было получено четыре и более сличений.

Вектор остатков рассчитывался по формуле

$$E = Y - \hat{Y}, \quad (3)$$

Таблица 3

| Источник вариации | Число степеней свободы | Сумма квадратов SS | Средние квадраты MS |
|--------------------------|------------------------|--------------------|---------------------|
| Обусловленный регрессией | p | $b'XY$ | MS_r |
| Остаток | $n-p$ | $Y'Y - b'XY$ | MS_e |
| Общий | n | $Y'Y$ | |

где \hat{Y} – предсказанное значение отклика регрессионной модели.

В работе был выполнен дисперсионный анализ в соответствии с общей формой таблицы дисперсионного анализа, представленной в табл. 3. Применялась методика дисперсионного анализа, используемая в прикладном регрессионном анализе [14]. Здесь n – число измерений на метеоре (в нашем

случае); $p = 1$ для модели первого порядка и $p = 2$ для модели второго порядка. Средние квадраты вычислялись как отношение суммы квадратов к числу степеней свободы.

Выборочная дисперсия остатков определялась как

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2}, \quad (4)$$

где s – выборочное среднеквадратическое отклонение (СКО) остатков.

Мера полезности параметров β_i (кроме β_0) в моделях первого и второго порядков оценивалась с помощью квадрата множественного коэффициента корреляции

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y)^2}, \quad (5)$$

который показывает в процентах насколько разброс исходных данных может быть объяснен рассчитанной регрессионной моделью. Значимость регрессии проверялась по F –критерию (критерию Фишера): вычислялось отношение

$$F = \frac{MS_r}{MS_e} \quad (6)$$

и сравнивалось со 100(1- α) %-ой табличной точкой $F(1; n-2)$ – распределения [22]; во всех случаях, когда расчетное значение F превышало критическое, соответствующее 95 %-ой точке $F(1; n-2; 0,95)$ – распределения, гипотеза $H_0: \beta_1 = 0$ отбрасывалась с риском ошибиться не более чем в 5 % случаев.

Результаты расчетов по формулам (1) – (6) для данных, полученных на одном из метеоров и приведенных на рис. 3, сведены в табл. 4.

Таблица 4

| Основные характеристики | Для модели первого порядка | Для модели второго порядка |
|--|--|---|
| Уравнение модели в общем виде | $\tau_{pi} = b_0 + b_1 \cdot iT$ | $\tau_{pi} = b_0 + b_1 \cdot iT + b_2 \cdot (iT)^2$ |
| Коэффициенты моделей | $b_0 = 0,418$ нс; $b_1 = 1,074 \cdot 10^{-7}$ | $b_0 = -0,42$ нс; $b_1 = 1,792 \cdot 10^{-7}$; $b_2 = -0,09 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ |
| Уравнение модели для данных, представленных на рис. 3, $T = 10$ мс | $\tau_{pi} = 0,418 + 1,074 \cdot i$ нс | $\tau_{pi} = -0,42 + 1,792 \cdot i - 0,09 \cdot i^2$ нс |
| Выборочное СКО остатков | 0,615 нс | 0,157 нс |
| Квадрат коэффициента коррелции | 96,2 % | 99,8 % |
| Расчетное значение F | 183,04 | 2927,7 |
| Табличное значение F | 5,59 | 5,99 |

Для данного примера модель первого порядка объясняет разброс данных на 96,2 %, а модель второго порядка – на 99,8 %. Расчетные значения F – критерия весьма существенно превосходят табличные значения, это позволяет сделать вывод, что принятые модели адекватны. Выборочное СКО остатков для модели первого порядка почти в четыре раза превосходит соответствующую статистику модели второго порядка, что безусловно свидетельствует в пользу предпочтительного выбора модели второго порядка. Однако существенно меньший вклад квадратичной составляющей ($-0,09$ нс) в изменение времени задержки за период измерений по сравнению с вкладом линейной компоненты модели первого порядка ($1,074$ нс) позволяет остановиться на модели первого порядка.

Такие расчеты были выполнены для всех радиотражений от 112 (104) метеорных следов, для которых проверялась регрессионная модель первого (второго) порядка. Затем была выполнена статистическая обработка результатов этих расчетов. На рис. 4 и рис. 5 соответственно показаны гистограммы распределения для коэффициентов регрессионных моделей, выборочных СКО остатков и для квадрата коэффициента корреляции. На этих рисунках N – число обработанных метеорных следов.

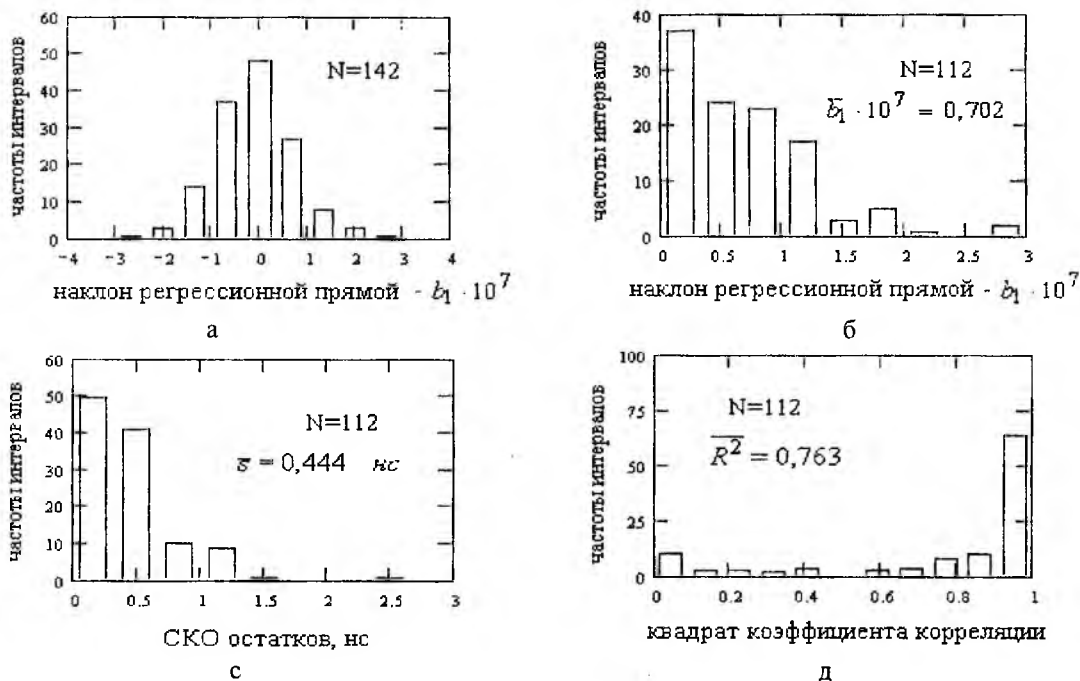


Рис. 4

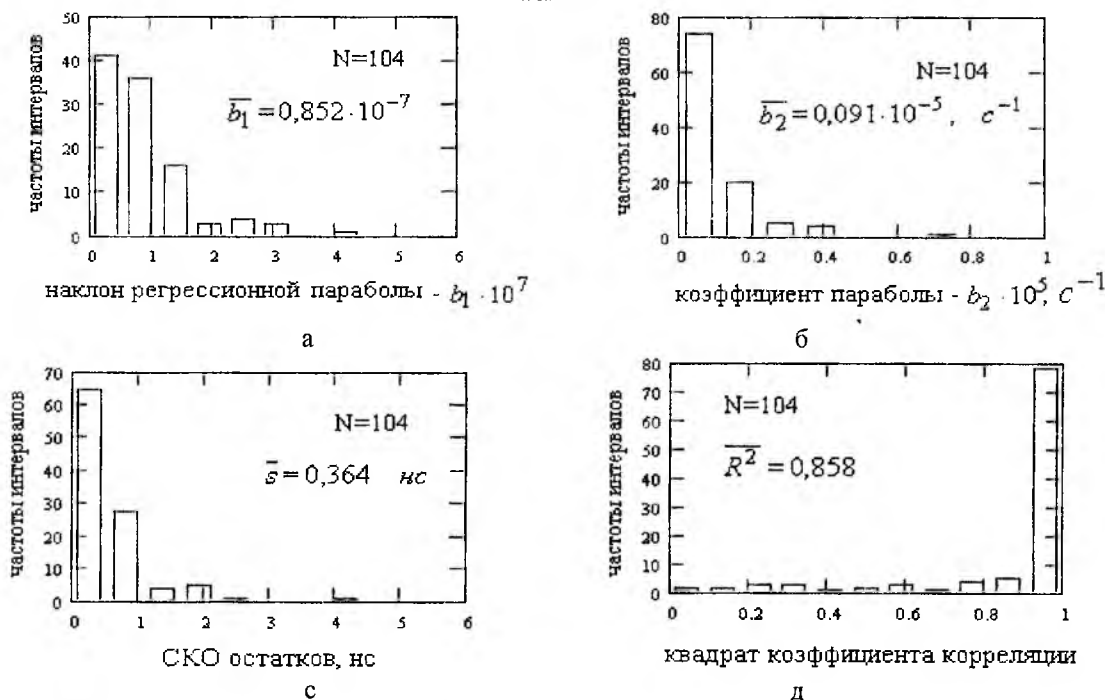


Рис. 5

На рис. 4, а показана гистограмма для коэффициента b_1 с учетом знака, построенная по всем экспериментальным данным для всех метеорных следов ($N=142$). На рис. 2, б также для всего объема данных приведены результаты расчета наклона регрессионной прямой с учетом знака и распределения по числу измерений на каждом метеоре. В остальных случаях при статистическом анализе рассматриваются коэффициенты регрессионных моделей без учета знака, так как они определяют значения трассовой погрешности.

Итоговые результаты статистического анализа параметров моделей и их показателей качества приведены в табл. 5, в которую сведена информация о числовых значениях выборочных средних, выборочных СКО и максимальных значениях коэффициентов регрессионных моделей, выборочных СКО остатков, квадратов коэффициентов корреляции.

Таблица 5

| Основные характеристики | | Числовые значения | | | | | |
|---|--------------------------|----------------------------|--------|--------------|----------------------------|--------|--------------|
| | | для модели первого порядка | | | для модели второго порядка | | |
| | | среднее | СКО | максимальное | среднее | СКО | максимальное |
| Коэффициенты модели | $b_1 \cdot 10^7$ | 0,702 | 0,565 | 2,782 | 0,852 | 0,759 | 4 |
| | $b_2 \cdot 10^5, c^{-1}$ | — | — | — | 0,091 | 0,11 | 0,709 |
| Фазовая нестабильность при несущей 45,5 МГц в рад·с ⁻¹ | | 3,2·2π | 2,6·2π | 12,7·2π | 3,9·2π | 3,5·2π | 18,2·2π |
| Выборочное СКО остатков в нс | | 0,444 | 0,357 | 2,569 | 0,364 | 0,337 | 2,411 |
| Квадрат коэффициента корреляции в % | | 76,3 | 31,4 | 1 | 85,8 | 24,3 | 1 |
| Расчетное значение F -критерия | | 498,3 | 1663 | 12720 | 547,6 | 1436 | 11310 |

В радиометеорном сличении шкал времени практический интерес имеет абсолютные изменения времени задержки в канале на интервалах времени, соизмеримых с периодом сличения. На таких интервалах, как правило, вклад линейного члена уравнения регрессии в измерение задержки значительно превышает вклад квадратичного члена. Поэтому при оценке нестабильности метеорного канала сличения можно руководствоваться только значением коэффициента b_1 , характеризующего скорость изменения задержки сигналов.

Так как средняя нестабильность времени задержки сигнала на трассе всегда ниже аналогичной величины в локационном режиме, то можно сделать вывод, что полученные результаты исследования будут соответствовать предельным значениям трассовой погрешности.

Список литературы: 1. Сидоров В.В., Андрианов Н.С. Доплеровские явления в метеорных отражениях и предупреждение многопутного распространения // Метеорное распространение радиоволн. Казань: 1963. Вып. 1. С. 179-187. 2. Лизогуб В.В. Детерминированные компоненты фазы метеорного радиоэха // Метеорные исследования. М.: 1978. Вып. 5. С. 51-61. 3. Михайлов В.К., Сидоров В.В. Фазовая нестабильность метеорного канала РРВ, вызванная ветровым перемещением отражающей области // Метеорное распространение радиоволн. Казань: 1976. Вып. 12. С.3-14. 4. Михайлов В.К., Сидоров В.В. К вопросу об относительной фазовой нестабильности каналов РРВ, разнесенных по частоте // там же С. 15-36. 5. Сидоров В.В., Михайлов В.К., Иванушкина Т.С. Влияние резонанса в метеорном следе и диффузного расширения на фазовую нестабильность метеорного канала // Метеорное распространение радиоволн. Казань: 1980. Вып. 16. С. 53-54. 6. Иванушкина Т.С., Михайлова Н.Ю., Сидоров В.В. К вопросу о влиянии многолучевости на полосу пропускания метеорного канала // там же Вып. 14. С. 77-85. 7. Елисеев В.И., Черный В.И. Исследование параметров доплеровского смещения частоты метеорной линии связи // Радиотехника. 1978. Вып. 47. С.14-17. 8. Экспериментальное исследование фазовой нестабильности и относительной фазовой невязки при метеорном и E_s -распространении радиоволн / В.В.Сидоров, А.Р.Курганов А.Р. А.Н.Глеухов и др. // Метеорное распространение радиоволн. Казань: 1981. Вып. 17. С. 30-37. 9. Кащеев Б. Л., Дудник Б. С., Нестеренко Г. В. и др. Передача случайной информации о сдвиге шкал времени по радиометеорному каналу с использованием ЛЧМ-сигнала // Исследования в области измерений времени и частоты. Сб. науч. трудов ВНИИФТРИ. М.: 1989. С. 73-76. 10. March D. N. The phase stability of VHF meteor trail forward scatter channel // Dissertation. 1966. 11. Дудник Б.С., Кащеев Б. Л., Смирнов А. Н. О привязке эталонов времени к использованию метеорных следов // Вестник Харьковского политехнического института. 1971. № 54, Вып.3. С. 29-34. 12. Дудник Б. С., Кащеев Б. Л., Коваль Ю. А., Попович А. В. и др. Исследование кратковременной фазовой нестабильности метеорного радиоканала сличения эталонов времени // Харк. ин-т радиоэлектрон. Харьков: 1992. 15с. Деп. в УкрИНТЭИ 17.08.92, № 1273. Ук.92. 13. Кащеев Б. Л., Дудник Б. С., Коваль Ю. О. и др. Аналіз фазової стабільності метеорного радіоканалу звірення шкал еталонів часу // Бюлет. УАА. К: Наукова книга. 1996. № 9. С.50-51. 14. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: В 2-х кн. Кн. 1 / Пер.с англ. М.: Финансы и статистика. 1986. 366 с.