

*В. В. ОБЕЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, Ю. А. КОВАЛЬ, д-р техн. наук,
А. А. ТКАЧУК, канд. техн. наук, Е. А. ИВАНОВА*

ОЦЕНКИ И АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОМЕТЕОРНОГО КАНАЛА СИНХРОНИЗАЦИИ

Введение

В основе радиометеорного метода синхронизации (РМС) времени и частоты в базе данных систем лежат высокая кратковременная стабильность и обратимость задержки сигналов при распространении радиоволн метрового диапазона на дальность до 2000 км за счет рассеяния от ионизированных метеорных следов на высоте 80 – 105 км от Земли. РМС, наряду с методами, использующими сигналы спутниковых радионавигационных систем (GPS, ГЛОНАСС), обеспечивает погрешности порядка наносекунд. При этом РМС превосходит другие методы по таким показателям, как производительность измерений, автономность, оперативность, экономичность, скрытность, устойчивость к ионосферным возмущениям [1].

Исследования РМС были начаты в Харькове (ХПИ, далее ХНУРЭ) в начале 70-х годов прошлого века на кафедре ОРТ под руководством проф. Кашеева Б.Л. и проводились в направлениях [1, 2 – 4]:

- теоретические и экспериментальные исследования РМС (исследования характеристик метеорного радиоканала, анализ и синтез алгоритмов синхронизации, поиск путей снижения погрешностей, совершенствование методик обработки результатов измерений);
- разработка, изготовление и внедрение экспериментальных образцов радиометеорных комплексов синхронизации для эталонов времени и частоты Госстандарта;
- разработка, изготовление и испытания макетов аппаратуры в рамках ОКР.

Для служб времени Госстандартов Украины и России разработаны экспериментальные образцы аппаратуры типа МЕТКА-6, его модернизированного варианта МЕТКА-6М, сопряженного с ЭВМ [2]. Метрологические характеристики аппаратуры МЕТКА-6 и МЕТКА-6М оценивались в локационных режимах "сам на себя" и "друг на друга": по независимым измерениям с применением ПКЧ, систем GPS и ГЛОНАСС: по рассеянию результатов наблюдений от среднего значения в каждом сеансе и от сеанса к сеансу: при сравнении между собой результатов измерений в обоих пунктах.

Хотя аппаратура МЕТКА-6 является сравнительно устаревшей (диапазон изменений суммарной погрешности составляет 20 нс), многолетний опыт ее эксплуатации на трассах Госстандарта СССР [2] (в последние годы на трассе Харьков – Москва) позволил накопить уникальную базу данных радиометеорных сличений в реальных условиях эксплуатации.

Постановка задачи

Цель статьи – разработка методики оценки параметров радиометеорного канала синхронизации (РМКС), определяющих производительность и оперативность измерений, с использованием базы данных радиометеорных сличений. Такими параметрами являются: время ожидания метеорных следов; количество «полезных» (обеспечивающих сличение) метеорных следов за сеанс; число сличений за время существования радиоотражения от «полезного» метеорного следа.

В качестве примера методика апробирована на данных, полученных в течение 2001 г. при штатных сравнениях шкалы координированного времени UTC(UA) государственного первичного эталона времени и частоты Украины (НИЦ «Институт метрологии», г. Харьков) и шкалы координированного времени UTC(SU) государственного эталона России (ВНИИФТРИ, пос. Менделеево, Московская обл.). В измерениях использовалась аппаратура МЕТКА-6М (НИЦ «Институт метрологии») и МЕТКА-6 (ВНИИФТРИ).

Целесообразность решения поставленной задачи обусловлена тем, что предложенная в работах [5, 6] имитационная модель метеорного распространения радиоволн с геометрической селекцией метеоров имеет ряд недостатков. Она не учитывает отражения от искривленных и

так называемых "поворотных" следов, доля которых по оценкам некоторых авторов (например, Костылева К. В.) колеблется от 20 до 40 %. Кроме того, в модели принимались конкретные значения физических параметров, например $S=2.5$, $r_0 = 10^{-2} \exp(0,05h)$, в то время как они могут принимать значения в некотором диапазоне. И самое существенное, модель дает сильно завышенные значения численности и коэффициента заполнения при использовании радиометеорной аппаратуры сличения шкал разнесенных эталонов времени в реальных условиях эксплуатации. Пункты сличения, как правило, располагаются в крупных городах, где наличие промышленных помех и отражений от местных предметов сильно искажают результаты идеализированного прогноза.

Описание предложенной статистической модели

Включение в модель РМКС параметров радиометеорного канала, полученных с использованием базы реальных данных, позволит создать обобщенную статистическую модель (ОСМ) РМКС, которая может обеспечить генерацию результатов сличения шкал эталонов времени, статистически совместимых с полученными при работе аппаратуры в реальных условиях.

Структурная схема ОСМ РМКС изображена на рис. 1. ОСМ РМКС содержит три блока, отмеченные на рисунке пунктиром.

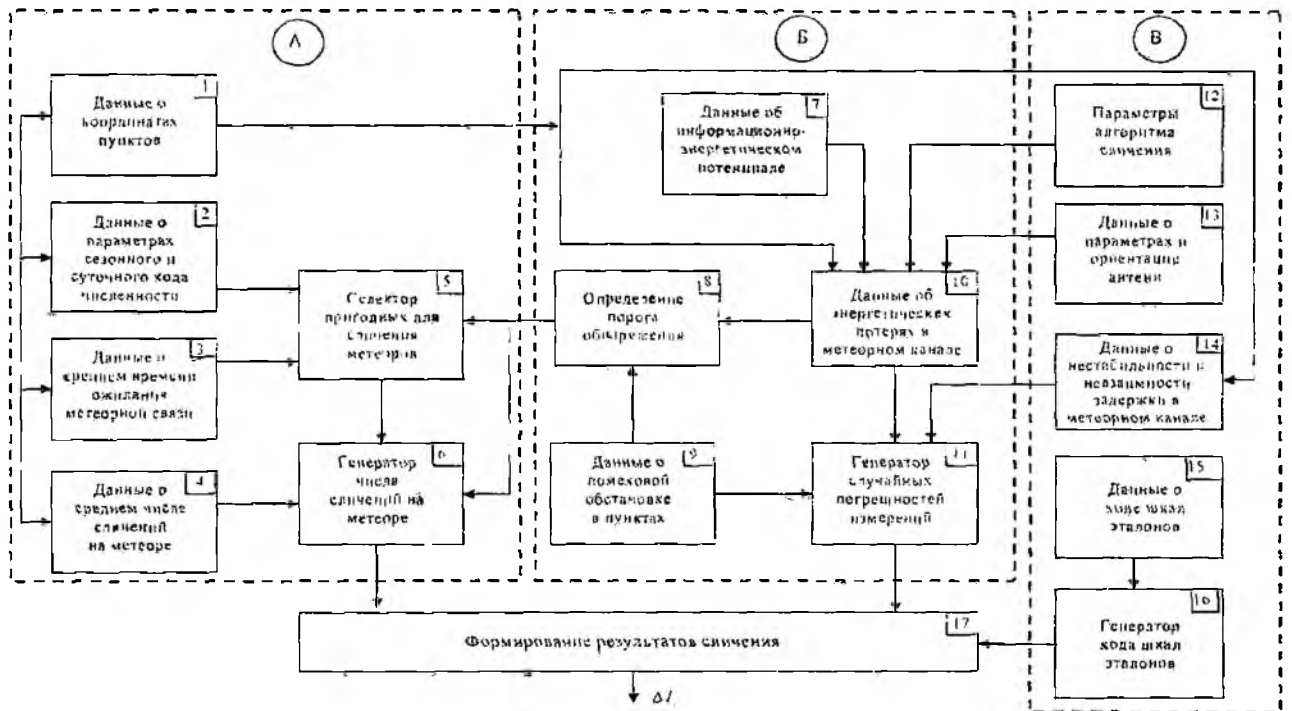


Рис. 1

Блок «А» ОСМ РМКС осуществляет ввод данных о координатах сличаемых пунктов (поз. 1), параметрах суточного и сезонного хода численности (поз. 2), среднем времени ожидания метеора (поз. 3), среднем числе сличений на метеоре (поз. 4). По этим данным блок «А» позволяет селективировать пригодные для сличения метеоры (поз. 5) и генерировать число сличений на этих метеорах (поз. 6).

На выходе блока «Б» генерируются случайные погрешности сличения (поз. 14). В этот блок входят ввод данных об информационно-энергетическом потенциале сигналов (поз. 7), помеховой обстановке в пунктах (поз. 9), энергетических потерях в метеорном канале, а также пороговый уровень обнаружения (поз. 8).

Блок «В» включает ввод специфических для систем синхронизации данных и параметров. Это данные об алгоритме сличения (поз. 12), параметры антенны (поз. 13), параметры нестабильности и взаимности задержки сигналов в метеорном канале (поз. 14), данные о коде шкал сличаемых эталонов (поз. 15). В результате блок «В» генерирует ход шкал эталонов $\Delta T(t)$ (поз. 16).

По выходным генераторам блоков ОСМ РМКС формирует результаты сличения (поз. 17).

По выходным генераторам блоков ОСМ РМКС формирует результаты сличения (поз. 17).
Отличительные особенности ОСМ РМКС:

1) сезонные и суточные колебания численности метеоров, длительности радиоэхо воспроизводятся в модели ОСМ РМКС исходя из установленных в результате многолетних экспериментальных и теоретических исследований статистических закономерностей о свойствах падающего на Землю потока метеорных частиц.

2) ОСМ РМКС построена на воспроизведении методом Монте - Карло статистических закономерностей, которым подчиняются параметры радиотехнической модели метеорного канала распространения радиоволн.

3) с учетом прерывистости канала сличения и хода шкал эталонов ОСМ РМКС генерирует результаты сличения сдвига шкал времени, вероятностные характеристики случайных погрешностей сличения и влияющие на них факторы.

4) для адаптации ОСМ РМКС к реальным условиям использован принцип калибровки модели по обучающей выборке, полученной за сеанс малой продолжительности;

5) в ОСМ РМКС не имитируется процесс отражения радиоволн от зеркальной точки метеора, в ней отсутствует геометрическая селекция метеоров.

Определение основных статистических характеристик ОСМ

Для полноценного функционирования ОСМ РМКС необходимы статистические характеристики времени ожидания включения канала сличения (поз. 3 ОСМ РМКС) и числа сличений на метеоре (поз. 34 ОСМ РМКС). Для получения этих характеристик было обработано около 9000 результатов сличений (8916) сдвига шкал, полученных в результате измерений на 93 сеансах, содержащих радиоотражения (радиоэхо) от 371 полезного метеорного следа. Сличения выполнялись в 2001 г. на трассе Харьков (НИЦ «Институт метрологии») – Москва (ВНИИФТРИ). Измерения проводились в среднем два раза в неделю. Начало измерений в основном совпадало с началом суток. Средняя продолжительность сеансов была примерно полтора часа. Сеансы отличались друг от друга числом так называемых «полезных» метеоров, обеспечивающих отражение вперед, в пункт корреспондента, числом измерений, полученных от этих метеоров и общим числом измерений. Протокол измерений содержал не только результаты измерений сдвига шкал, но и информацию о дате и времени появления радиоотражений с точностью до секунды.

Результаты измерений за сеанс при статистической обработке рассматривались как элементы выборки, а общий объем совокупной выборки определяется числом измерений за сеанс. Результаты измерений, полученные от «полезного» метеорного следа, образуют группу: число таких измерений в группе составляет объем группы. Основные статистические показатели обработанных сеансов приведены в табл. 1. Результаты статистического анализа даны в табл. 2.

Общее представление (без статистического анализа и классификации) о распределении метеоров по сеансам, даты которых переведены в порядковые номера дней года, дает рис. 2.

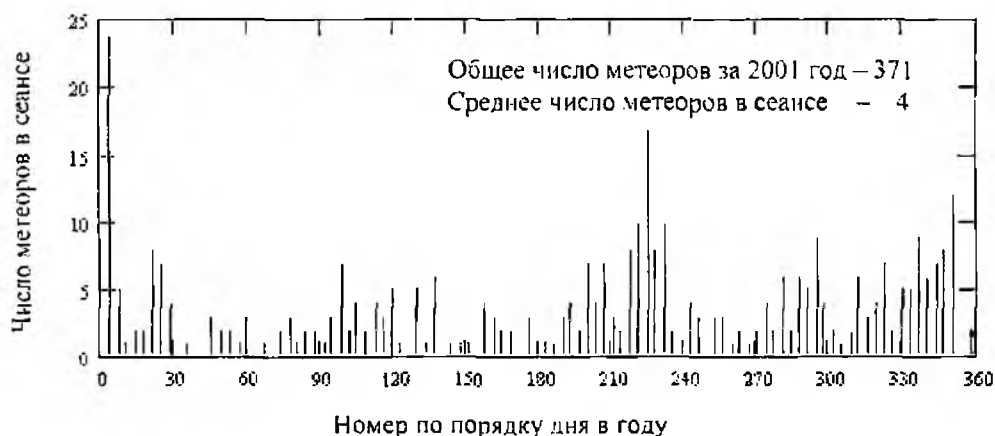


Рис. 2

Таблица 1

| Характеристика | | Значение | Процент |
|--|---|----------|---------|
| Число сеансов с числом измерений | минимальным, равным единице | 2 | 2,2 |
| | малым (от 2 до 10) | 17 | 18,3 |
| | близким к среднему (от 10 до 100) | 51 | 54,8 |
| | равным или большим 100 | 23 | 17,7 |
| Число сеансов с числом метеорных следов | меньшим 3 | 41 | 44,1 |
| | близким к среднему (от 3 до 5 включительно) | 30 | 32,2 |
| | большим 5 | 22 | 23,7 |
| Общее число обработанных сеансов | | 93 | 100 |
| Характеристика | | Значение | |
| Число метеорных следов в сеансе | Максимальное | 24 | |
| | Среднее | 4 | |
| | Медианное | 3 | |
| | Минимальное | 1 | |
| Общее число «полезных» метеорных следов во всех обработанных сеансах | | 371 | |
| Число результатов измерений в сеансе | Максимальное | 1496 | |
| | Среднее | 96 | |
| | Медианное | 24 | |
| | Минимальное | 1 | |
| Число результатов измерений, полученных на метеорном следе | Максимальное | 254 | |
| | Среднее | 25 | |
| | Медианное | 5 | |
| | Минимальное | 1 | |
| Общее число результатов измерений | | 8916 | |
| Время ожидания связи в минутах | Максимальное | 90 | |
| | Среднее | 16 | |
| | Медианное | 9 | |
| | Минимальное | 0,05 | |
| Общее число пауз | | 278 | |

Круговая диаграмма (рис. 3), показывает, как распределены сеансы по числу "полезных" метеоров в них. Она явилась результатом классификации всех сеансов на три категории:

– к первой категории с малым числом метеоров отнесены сеансы с одним либо двумя метеорами;

– вторая категория включает сеансы со средним числом метеоров (от трех до пяти включительно);

– третья категория содержит сеансы с большим (больше пяти) числом метеоров.

Интересно отметить, что сеансы, приходящиеся на даты: 3 января; 8, 12 и 19 августа; 16 декабря, содержат больше десяти метеоров.

Гистограмма распределения метеоров по сеансам приведена на рис. 4. Число интервалов группирования выбиралось равным 24, т. е. равным наибольшему числу метеоров в сеансе.

Таблица 2

| Статистическая характеристика | Число метеоров в сеансе | Время ожидания связи в минутах | Число сличений за метеор | Число сличений за сеанс | Длительность радиоэхо, мс |
|---|-------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Объем выборки – число | сеансов – 93 | пауз – 278 | метеоров – 371 | сеансов – 93 | радиоэхо – 371 |
| Общее число | метеоров – 371 | – | сличений – 8916 | сличений – 8916 | – |
| Максимальное значение | 24 | 90 | 254 | 1496 | 5080 |
| Минимальное значение | 1 | 0,05 | 1 | 1 | 20 |
| Выборочное среднее | 4 | 16 | 25 | 95,8 | 500 |
| Выборочная медиана | 3 | 9 | 5 | 24 | 100 |
| Выборочное СКО | 3,6 | 18,7 | 50,2 | 214 | 1004 |
| Выборочная дисперсия | 12,9 | 350,8 | 2521 | 45730 | $1,009 \cdot 10^6$ |
| Коэффициент асимметрии | 2,73 | 1,6 | 2,96 | 4,99 | 2,96 |
| Коэффициент эксцесса | 10,61 | 2,14 | 8,44 | 27,5 | 8,44 |
| Число интервалов группирования | 24 | 28 | 254 | 150 | 254 |
| Гипотетический закон распределения | экспоненциальный | экспоненциальный | экспоненциальный | экспоненциальный | экспоненциальный |
| Рассчитанное значение Хи-квадрат | 29,7 | 67,6 | 47980 | – | 47980 |
| Уровень значимости гипотезы | 0,05 | 0,05 | 0,05 | – | 0,05 |
| Число степеней свободы | 22 | 26 | 252 | – | 252 |
| Пороговое значение Хи-квадрат | 33,9 | 38,9 | 290 | – | 290 |
| Гипотеза о законе распределения принимается | да | нет | нет | – | нет |
| Вероятность ошибки первого рода – принять неверную гипотезу | 0,05 | – | – | – | – |
| Гистограмма распределения | рис. 4 | рис. 4 | рис. 8, 9 | – | – |
| Эмпирическая функция распределения | – | рис. 1.11 | рис. 10 | рис. 7 | – |

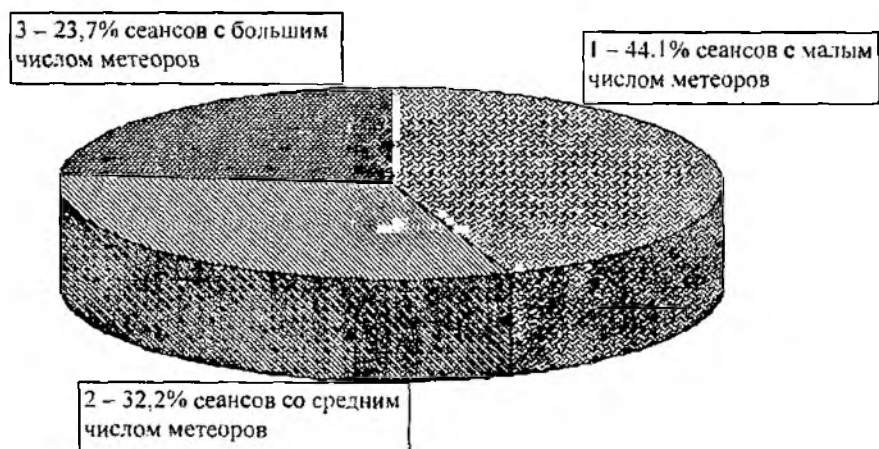


Рис. 3

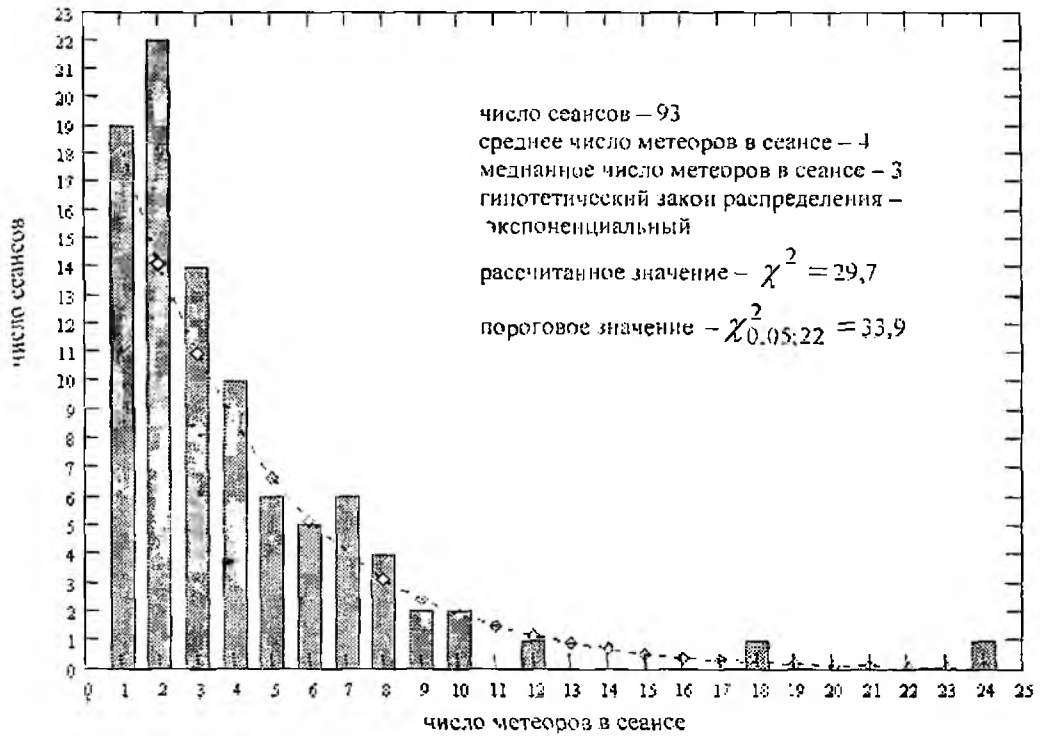


Рис. 4

Ширина интервала группирования принималась равной единице. Установлено, что среднее число метеоров в сеансе примерно равно четырем, а в 50 % случаев число метеоров в сеансе меньше либо равно 3. Была проверена гипотеза об экспоненциальном законе распределения числа метеоров по сеансам по критерию согласия Хи-квадрат (критерию Пирсона). Выявлено, что эта гипотеза при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы 22 не противоречит эмпирическим данным.

Описательное представление (без статистической обработки и классификации) о распределении числа сличений сдвиги а шкалы по датам сеансов, пересчитанным в порядковые номера дней года, дает рис. 5.

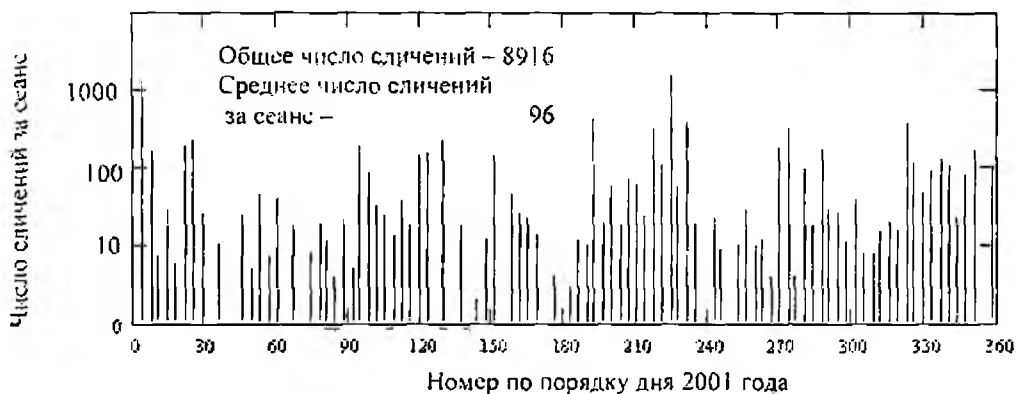


Рис. 5

На рис. 6 изображена круговая диаграмма, учитывающая классификацию сеансов по числу измерений (сличений). Все сеансы разбиты на четыре категории:

- первая категория содержит сеансы с одним измерением (таких сеансов всего два);
- вторая категория включает сеансы с числом измерений меньшим 10;
- третья – с числом измерений равным или большим 10, но меньшим 100;
- к четвертой категории относятся сеансы с числом измерений равным или большим 100.

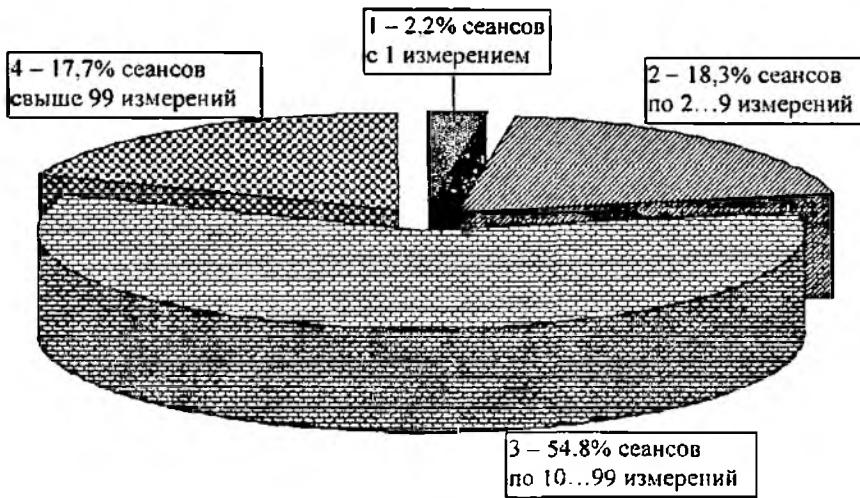


Рис. 6

Эмпирическая функция распределения числа измерений по сеансам дана на рис. 7. Этот график позволяет оценить вероятность появления сеансов с числом измерений, не превосходящим заданного.

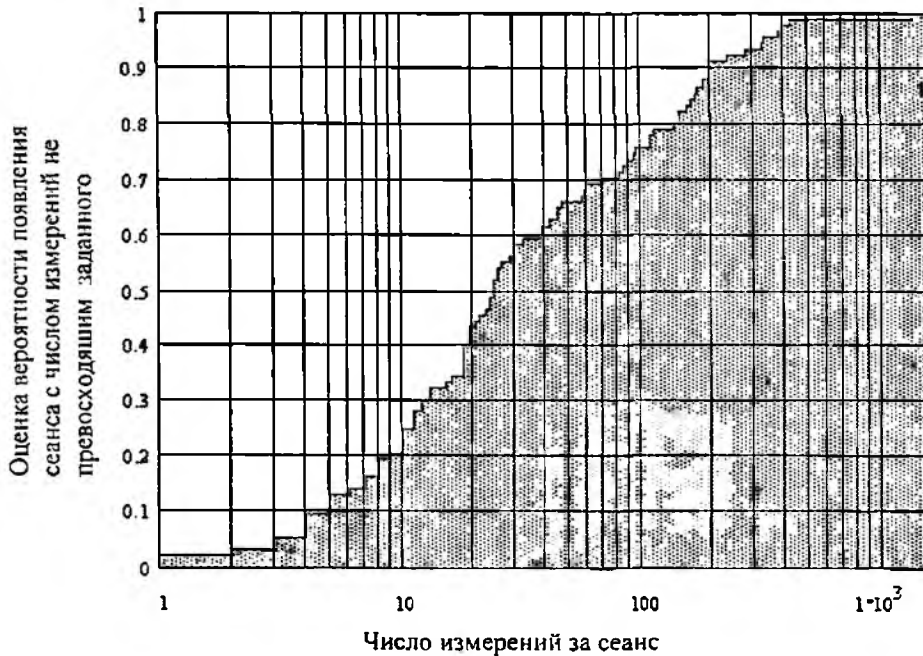


Рис. 7

Представляет интерес и распределение числа измерений, которые удастся получить за время существования метеорной ионизации, обеспечивающей связь. Была проведена статистическая обработка сличений, полученных от полезных метеорных следов, включающая расчет и построение гистограммы, определение основных числовых характеристик и проверку гипотезы о законе распределения.

Основные результаты представлены в табл. 1 и на рис. 8 – 10. Для того чтобы оперировать фактическим целым числом измерений на метеоре, были выбраны ширина интервала гистограммы равная единице и число интервалов группирования равное 254 – максимальному числу измерений на метеоре. Особенностью распределения является наличие длинных, почти равномерно распределенных хвостов у гистограммы распределения. Это привело к необходимости изображения гистограммы в виде двух частей: отдельно для малых значений числа сличений (рис. 8) и для больших (см. рис. 9).

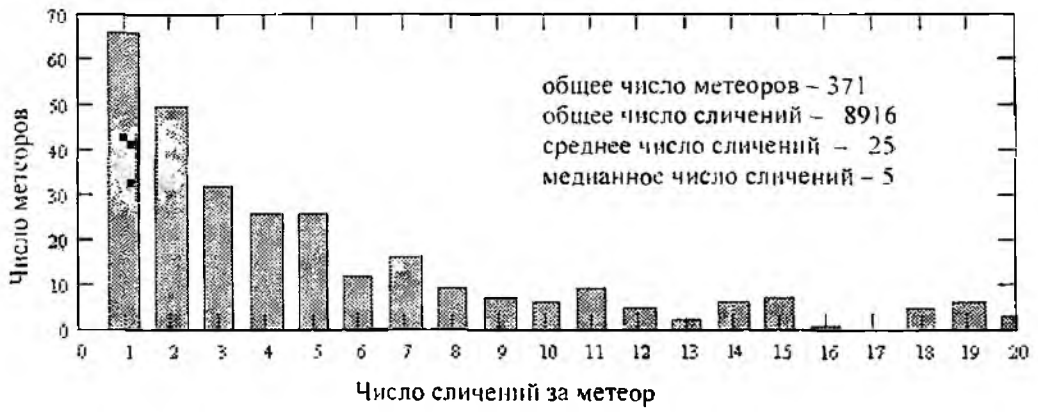


Рис. 8

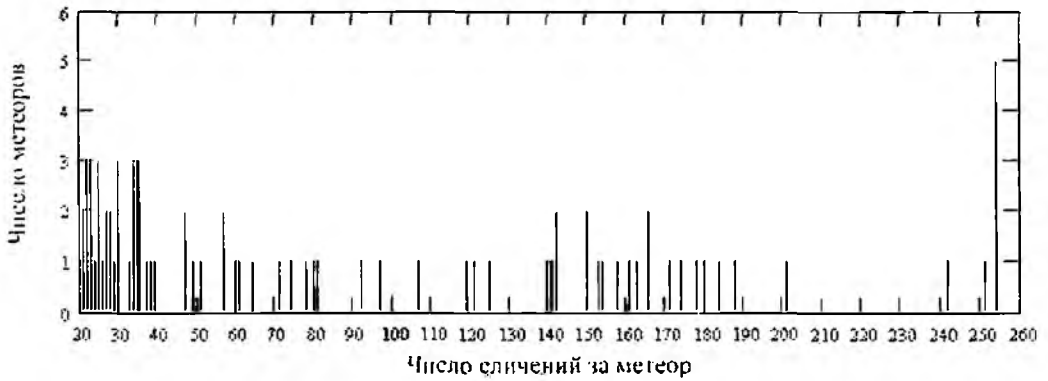


Рис. 9

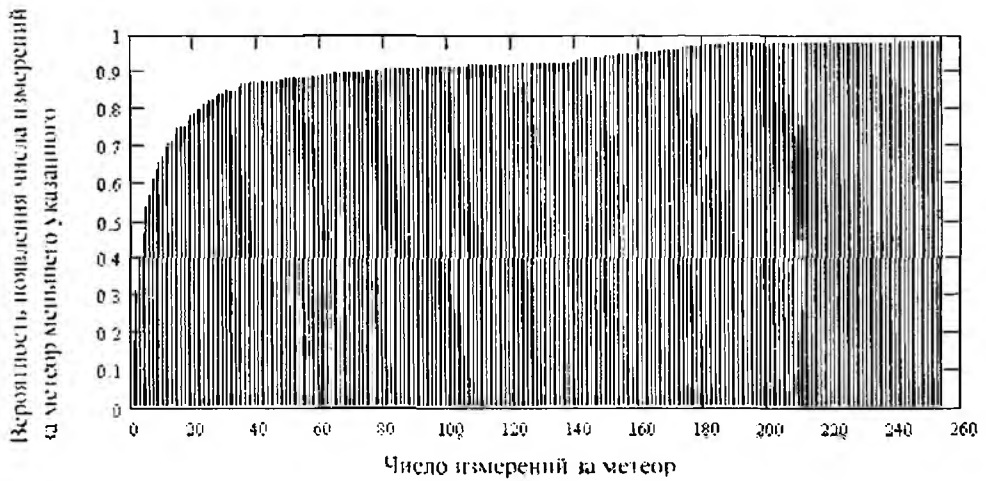


Рис. 10

Гистограмма распределения (см. рис. 11) по внешнему виду сходна с экспоненциальным распределением, но статистическая проверка этой гипотезы не позволяет считать такой вывод обоснованным. Эмпирическая функция распределения времени ожидания связи (см. рис. 12) позволяет выполнить оценку вероятности того, что время ожидания не превысит заданное. Среднее время ожидания составляет 16 мин, а его медианное значение – 9 мин. Это означает, что в 50 % случаев время ожидания связи окажется меньше 9 мин.

Длительность радиозэхо определяется как произведение числа сличений за время существования полезного метеорного следа на период зондирования, равный 20 мс (частота зондирования – 50 Гц). Максимальная длительность радиозэхо составляет около 5 с, средняя – 500 мс, а медианная – 100 мс. Вероятностные характеристики длительности радиозэхо анало-

гичны соответствующим характеристикам числа сличений на метеоре. Эмпирическая функция распределения числа измерений за метеор позволяет получить оценку вероятности появления метеора с числом сличений не превосходящим заданное (см. рис. 10). По аналогичному алгоритму было выполнено статистическое исследование времени ожидания связи. Результаты этого исследования представлены в табл. 1 и 2, а также на рис. 11 и 12.

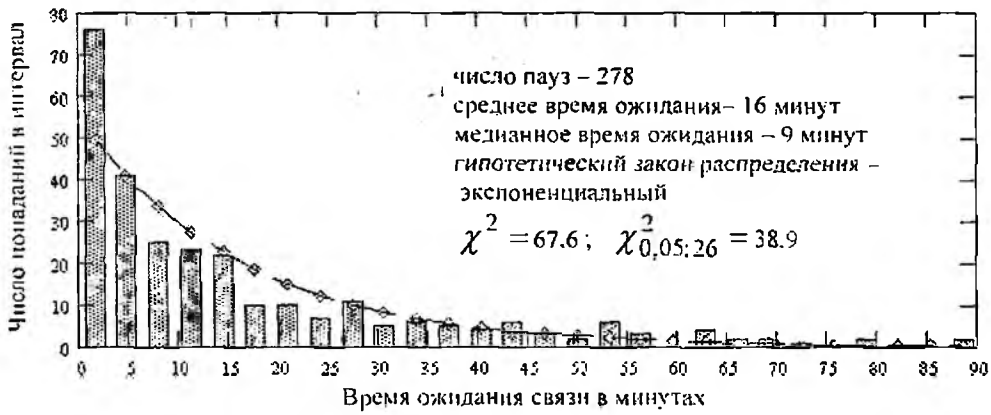


Рис. 11

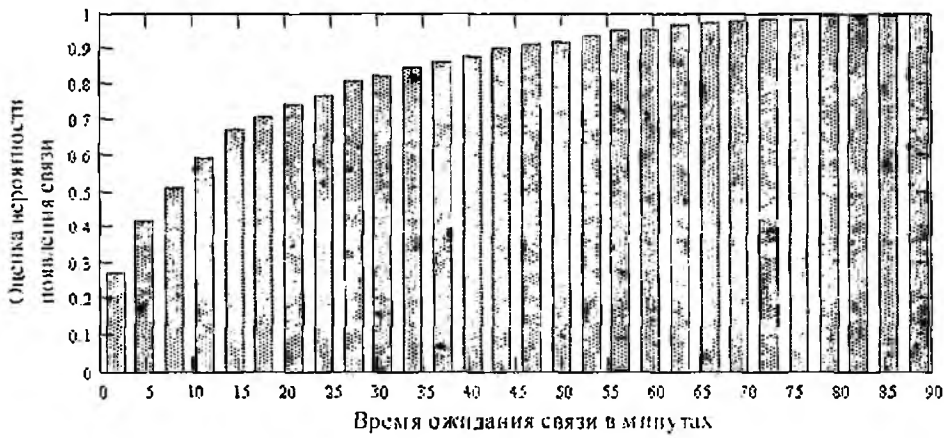


Рис. 12

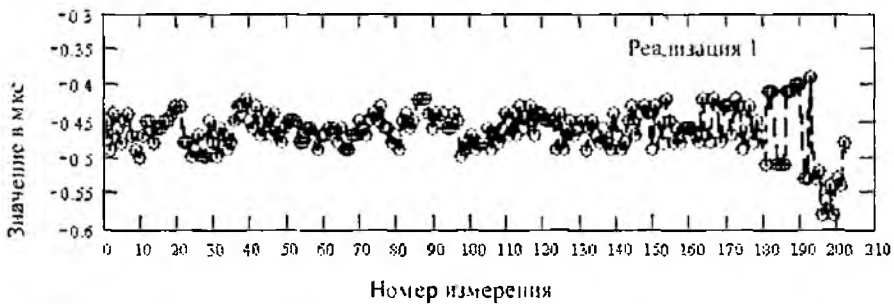


Рис. 13

Заключение

Приведем примеры реализаций результатов измерений сдвига шкал от долговременно существующих метеорных следов. Рис. 13 дает представление о характере изменений результатов измерений во времени для метеорных следов, существующих длительное время.

Типичными для таких реализаций являются увеличение рассеяния к концу радиоэхо от метеорного следа и в некоторых случаях изменение среднего значения во времени. Вероятные причины такого поведения кроются в особенностях физики метеорных явлений: дифракция на образующемся метеорном следе, ветровом перемещении отражающей области, диффузном расширении метеорного следа, резонансе в метеорном следе, многолучевом распространении радиоволн и других аналогичных причинах.

Вид типичных реализаций результатов измерений, полученных на большом статистическом материале, позволяет сделать вывод, что имеет место существенная нестационарность процессов, связанных с метеорными явлениями, которая обусловлена эффектами формирования и разрушения метеорного следа, а также изменением притока метеорного вещества в течение суток и года. Эти статистические свойства выборочных данных радиометеорного метода сравнения шкал времени эталонов обосновывают необходимость поиска помехоустойчивых процедур для их обработки.

Список литературы: 1. *Кащеев Б. Л., Коваль Ю. А., Бавыкина В. В.* и др. Расширение областей применения и перспективы совершенствования радиометеорного метода синхронизации шкал эталонов времени // Прикладная радиоэлектроника. 2004. Т. 3. № 1. С.2-15. 2. *Кащеев Б.Л., Коваль Ю.А., Горбач В.И., Бондарь Б.Г.* Метеоры сегодня. Киев: Техника, 1996. 196 с. 3. *Кащеев Б. Л., Коваль Ю. А., Дуоник Б. С.* и др. Радиометеорный канал передачи информации и практические приложения // Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под ред. Кащеева Б. Л., Лагутина М. Ф., Прошкина Е. Г. Харьков: Бизнес Информ, 2002. 418 с. 4. *Антитов И. Е., Коваль Ю. А., Бавыкина В. В.* Развитие теории и совершенствование метеорных систем связи и синхронизации. Харьков: Коллегиум, 2006. 308 с. 5. *Костылев В. К.* Математическое моделирование метеорных явлений и метеорного распространения радиоволн. Автореферат дисс. Казань: 1971. 24 с. 6. *Курганов Р. А.* Прогнозирование наклонного рассеяния радиоволн метеорными ионизациями. Казань: Изд. Казан. ун-та, 1973. 184 с. 7. *Карпов А. В., Сидоров В. В.* Расчет основных параметров метеорного распространения радиоволн // Метеорное распространение радио волн. Казань: Изд-во КГУ, 1980. Вып. 16. С. 52 – 60 8. *Пушисев Ю. А.* Видимое и истинное распределение плотности радиантов спорадических метеоров // Метеорное распространение радиоволн. Казань: Изд-во КГУ, 1966. Вып.3. С. 5 – 23.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редакцию 20.06.2008