

УДК 621.396.98-197

П.И. Танцай, В.Г. Корниенко

## Экспериментальные исследования точности синхронизации шкал времени в пространственно разнесенных пунктах методом запросной радиолокации

Представлены результаты оценки точности синхронизации шкал времени в пространственно разнесенных наземных пунктах методом запросной радиолокации, полученные на основе экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** псевдослучайная последовательность (ПСП), распространение радиоволн, корреляционная функция (КФ), метка времени, система синхронизации.

Интерес к созданию шкал времени путем передачи сигналов точного времени по радио нашел отклик уже в ранних работах. В частности, в работе [1] рассматриваются задержки сигналов и их вариации при распространении в радиоканалах различных частотных диапазонов. Современные тенденции в создании шкал времени изложены в работе [2] и основываются на распространении шкал времени с помощью сигналов спутниковых глобальных систем навигационного позиционирования типа ГЛОНАСС и НАВСТАР. Множество работ указывает на возможность достижения синхронизации шкал времени в пространстве на разнесенных пунктах с погрешностью (СКО) 10–15 нс. В ряде случаев такая погрешность является недопустимой. Имеется необходимость уменьшить погрешность до нескольких наносекунд при создании локальных шкал времени в пунктах, удаленных друг от друга до нескольких десятков километров.

Целью представленного в настоящем сообщении исследования является оценка влияния условий распространения радиоволн на точность синхронизации шкал времени в пространственно разнесенных пунктах с помощью приземного канала радиосвязи.

Известно, что при распространении радиоволн через приземный канал радиосвязи возникают искажения сигналов, приводящие к погрешности оценки их параметров [3]. В частности, из-за рассеяния и дифракции радиоволн на подстилающей поверхности и местных предметах на трассе время задержки сигнала на трассе определяется с погрешностью [4]. В настоящей работе фактическая величина этой погрешности была оценена по результатам натурных измерений на трассах различной протяженности с помощью специальной аппаратуры.

В исследованиях использовался макет системы синхронизации (СС) шкал времени, разработанный в НИИ РТС ТУСУРа. Макет системы синхронизации работал в дециметровом диапазоне как радиолокатор с активным ответом и состоял из центрального (ЦП) и периферийного (ПП) пунктов, удаленных друг от друга на расстоянии  $R$ , как это представлено на рис. 1.

В качестве зондирующего сигнала использовался широкополосный сигнал (ШПС) с двоичной фазовой манипуляцией несущей частоты  $M$ -последовательностью (ПСП) длиной 1023 бита и тактовой частотой 10,08 МГц.

Каналы запроса и ответа излучали сигналы на частотах 1065 и 615 МГц соответственно. Использовались антенны вертикальной поляризации с шириной диаграммы направленности в горизонтальной плоскости  $60^\circ$  установленные на высоте 12 м в ПП и 20 м в ЦП [5–7].

В процессе синхронизации шкал времени ведущий пункт излучал запросный зондирующий сигнал, и начинался счет времени устройством, измеряющим задержку. После прохождения расстояния  $R$  запросный сигнал принимался в ведомом пункте и после выполнения необходимых процедур синхронизировал шкалу времени в этом пункте. В свою очередь, ведомый пункт излучал соответствующей шкале времени ответный зондирующий сигнал, который при его приеме в ведущем пункте синхронизировал дополнительную шкалу времени и останавливал счет времени устройством, измеряющим задержку. Суммарное время задержки при прохождении запросного и ответного сигналов определяется соотношением

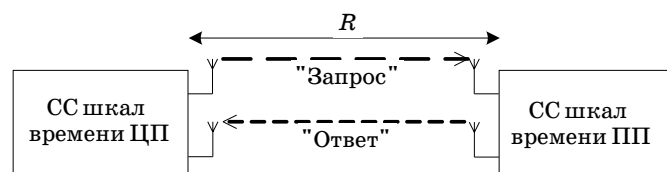


Рис. 1. Схема системы синхронизации

$$t_{\text{зад}} = \frac{2 \cdot R}{c} + t_A,$$

где  $c = 2,99792 \cdot 10^8$  м/с – скорость распространения радиоволн;  $t_A$  – время задержки сигнала в цепях аппаратуры ЦП и ПП.

Величина аппаратурной задержки  $t_A$  устанавливалась предварительно путем калибровки.

Величина поправки  $\Delta\tau$  к шкале времени в ведомом пункте по отношению к шкале времени ведущего пункта рассчитывалась по формуле

$$\Delta\tau = \frac{t_{\text{зад}} - t_A}{2}$$

и затем передавалась в ведомый пункт по каналу связи для определения точного времени.

Аппаратура центрального и периферийного пунктов функционально устроена одинаково, отличаясь только настройкой гетеродинов и соответствующих высокочастотных цепей на разные частоты (табл. 1), а также коммутацией некоторых цепей в зависимости от того, работает ли пункт как ведущий или как ведомый.

Таблица 1

Пункт	Частота генератора несущей, МГц	Частота гетеродина ПЧ1, МГц
Ведущий	615	1161,1632
Периферийный	1065	518,8368

Функциональная схема макета системы синхронизации шкал времени одного пункта изображена на рис. 2.

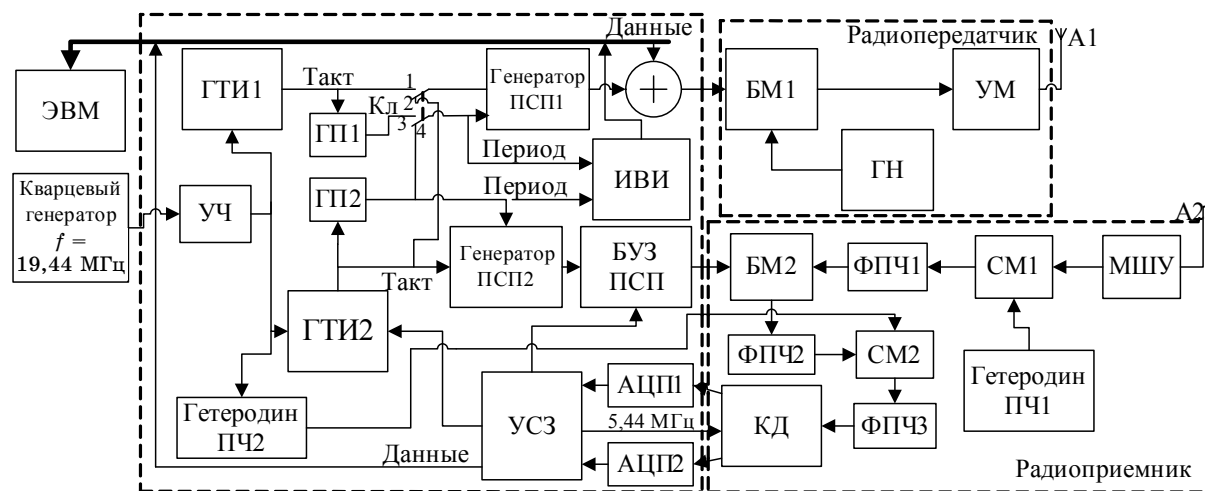


Рис. 2. Функциональная схема системы синхронизации шкал времени

Перечисленные на рис. 2 отдельные функциональные узлы макета аппаратуры СС, их назначение и некоторые технические характеристики описаны ниже:

- умножитель частоты (УЧ) служит для формирования опорных сигналов и синхронизации опорных частот и имеет выходную тактовую частоту  $f_T = 272,16$  МГц, которая получается путем умножения сигнала кварцевого генератора частотой  $f = 19,44$  МГц с относительной нестабильностью  $10^{-6}$ ;
- гетеродин ПЧ2 – генерирует сигнал частотой 90,72 МГц для перехода с первой ПЧ на вторую;
- генератор тактовых интервалов (ГТИ1) является делителем опорных частот и задает тактовую частоту ПСП1, равную 10,08 МГц;
- генератор периода ПСП (ГП1) является делителем частоты 10,08 МГц на 1023, задает период ПСП, равный 1023 такта частоты  $f_T$ ;
- ключ (Кл) устанавливает режимы работы аппаратуры по схеме ведущего или ведомого пунктов;

- измеритель временных интервалов (ИВИ) позволяет измерять время задержки между ПСП1 и принятой ПСП2 в ведущем пункте;
- генератор ПСП1 генерирует выбранную для работы радиопередатчика ПСП;
- сумматор по модулю 2  $\oplus$  выполняет роль смесителя, суммирует ПСП1 и передаваемые данные, формируя сигнал модуляции;
- балансный модулятор (БМ1), генератор несущей (ГН), усилитель мощности (УМ) формируют сигнал для излучения;
- малошумящий усилитель (МШУ), гетеродин ПЧ1 и смеситель (СМ1) преобразуют принимаемый радиосигнал на первую промежуточную частоту. Первая промежуточная частота равна  $f_{\text{пр1}} = 96,1632$  МГц;
- фильтр первой промежуточной частоты (ФПЧ1), устанавливаемый на выходе СМ1, фильтрует сигнал, лежащий в его полосе;
- балансный модулятор (БМ2) служит для снятия широкополосности принимаемого сигнала путем умножения на ПСП2;
- фильтр первой промежуточной частоты (ФПЧ2), устанавливаемый на выходе БМ2, фильтрует уже узкополосный сигнал, лежащий в его полосе. В смесителе СМ2 сигнал переносится на вторую промежуточную частоту. Вторая промежуточная частота  $f_{\text{пр2}} = 5,4432$  МГц;
- квадратурный демодулятор (КД) и амплитудно-цифровые преобразователи (АЦП1 и АЦП2) разделяют и оцифровывают сигнал соответственно;
- генератор тактовых интервалов (ГТИ2) является управляемым делителем, обеспечивает сдвиг ПСП по фазе и задает тактовую частоту ПСП2, частота которой может изменяться в пределах от 9,72 до 10,468 МГц;
- устройство слежения за задержкой (УСЗ) управляет ГТИ2 и блоком управления задержкой ПСП;
- генератор периода ПСП ГП2 является делителем входной частоты на 1023 и задает период ПСП, равный 1023 такта частоты  $f_t$ ;
- генератор ПСП2 генерирует выбранную для работы ПСП, необходимую для снятия широкополосности принимаемого сигнала;
- блок управления задержкой ПСП обеспечивает задержку ПСП2 в пределах 0...800 нс путем слежения за центром тяжести корреляционной функции (КФ).

Аппаратура СС шкал времени позволяла в каждом из пунктов производить измерение взаимной корреляционной функции (КФ) принимаемого и опорного сигналов. В частности, в ЦП измерялась КФ между ПСП принимаемого ответного сигнала и опорной ПСП2. В ПП соответственно, измерялась КФ между принимаемым запросным сигналом и опорной ПСП2.

При измерении времени задержки момент прихода определялся по временному положению характерных точек корреляционной функции, а именно, максимума, уровня 0,5 от максимума, а также центра тяжести.

Измерения проводились в окрестностях г. Томска в октябре–ноябре 2007 г. на трассах протяженностью 7984,8, 16696,1 и 29023,6 м. Протяженность трасс определялась спутниковым навигационным приемником Z-12 фирмы «Ashtech» с погрешностью 0,3 м.

Во время измерений трасса была покрыта снежным покровом толщиной 20 см. По данным Томской метеостанции, отстоящей от трассы на 8 км, за время проведения испытаний приземное значение индекса преломления  $N_s$  [s] изменялось на  $\pm 2$  N-ед на наиболее протяженной трассе.

Реализации флуктуаций суммарного времени задержки на наземных трассах при оценивании момента прихода по центру тяжести приведены на рис. 3–5.

По горизонтальной оси отложен момент измерения времени задержки (время местное, чч:мм). По вертикальной оси отложена измеренная задержка сигнала на трассе  $t_{\text{зад}}$ , нс. Жирной сплошной линией изображен полиномиальный тренд, полученный путем аппроксимации флуктуаций времени задержки (встроенная функция в программе Microsoft Excel). Линия тренда – графическое представление направления изменения ряда данных. Используется для аппроксимации данных по методу наименьших квадратов в соответствии с уравнением

$$y = c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot x^2 + c_3 \cdot x^3 + c_4 \cdot x^4 + c_5 \cdot x^5 + c_6 \cdot x^6,$$

где коэффициенты  $y = c_0, c_1 \dots c_6$  – константы, значения которых определяются в ходе построения.

Размах медленных флуктуаций оценен по указанному тренду и обозначен  $\Delta\tau$ .

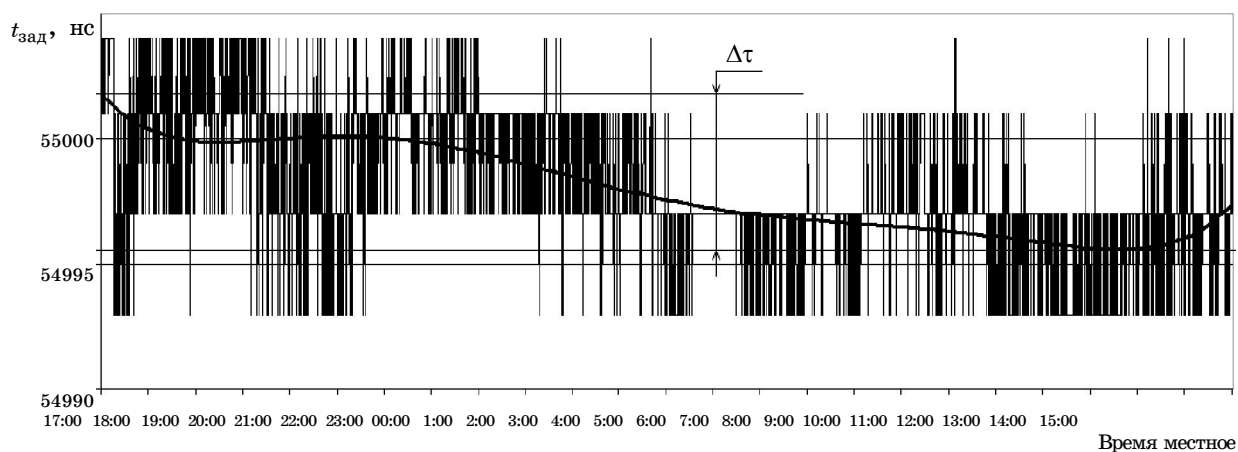


Рис. 3. Временные флуктуации суммарного времени задержки  $t_{\text{зад}}$  на трассе длиной 7984,8 м, 31.10–01.11.07

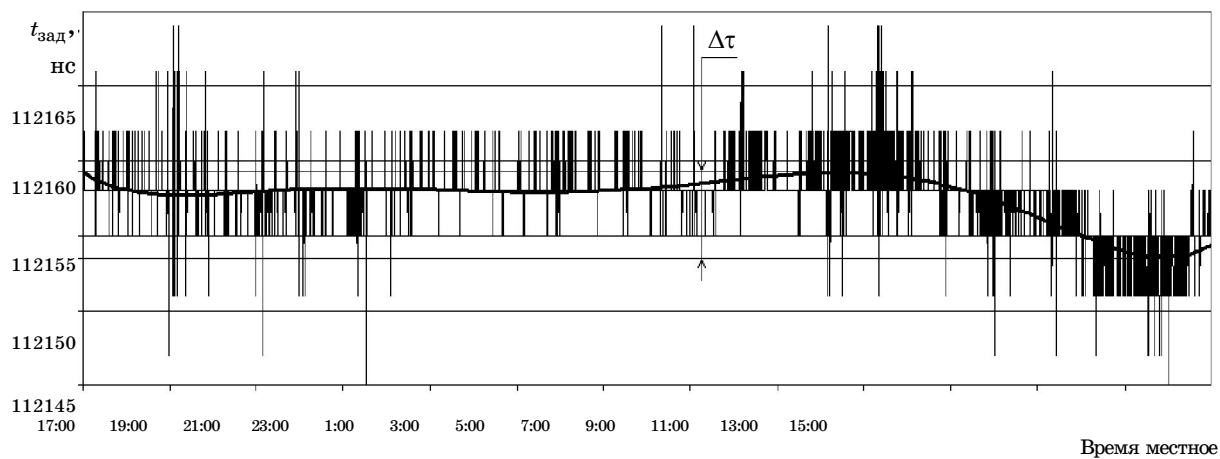


Рис. 4. Временные флуктуации суммарного времени задержки  $t_{\text{зад}}$  на трассе длиной 16696,1 м, 13.11–14.11.07

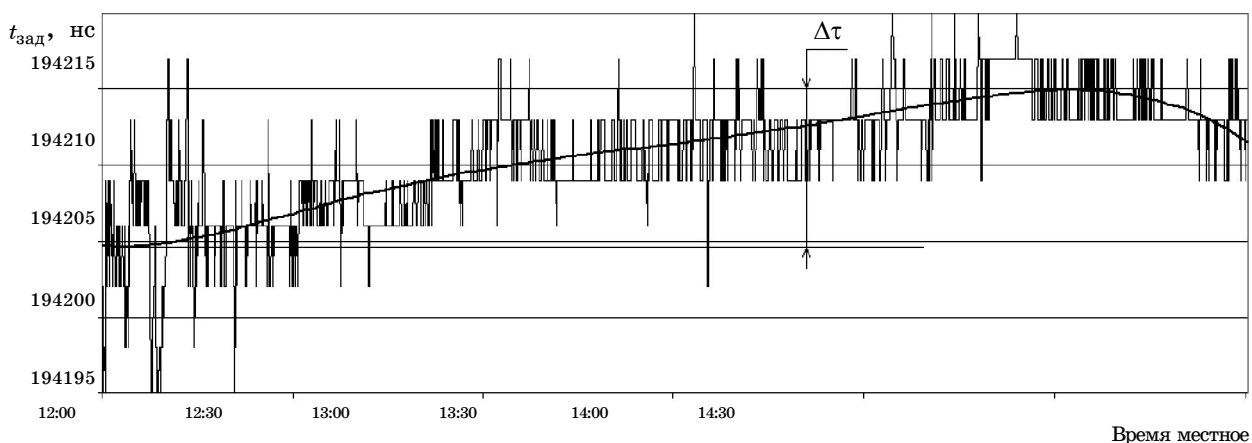


Рис. 5. Временные флуктуации суммарного времени задержки  $t_{\text{зад}}$  на трассе длиной 29023,6 м, 02.11.07

Оценка погрешности синхронизации шкал времени в разнесенных пунктах рассчитывалась по формуле

$$\sigma_{t_R} = \frac{\sigma_{t_{\text{зад}}}}{\sqrt{2}},$$

где  $\sigma_{t_{\text{зад}}}$  — экспериментально измеренное СКО флуктуаций  $t_{\text{зад}}$ .

Результаты оценки погрешности синхронизации шкал времени приведены в табл. 2.

Таблица 2

Длина трассы, м	СКО $\sigma_{t_{\text{зад}}}$ измерений, нс	Оценка $\sigma_{t_R}$ погрешности, нс	Размах медленных флуктуаций $\Delta\tau$ , нс
7984,8	3,1	2,19	6,2
16696,1	2,3	1,63	5,7
29023,6	4,1	2,9	10,3

Таким образом, влияние приземного канала распространения проявляется в том, что задержка сигнала на трассе имеет как быстрые флуктуации (СКО) величиной 2–4 нс, так и медленные флуктуации с размахом до 10 нс в зависимости от протяженности трассы. Величина медленных флуктуаций значительно больше, чем это могло быть вызвано изменениями скорости распространения радиоволн за счет изменения параметров атмосферы, наблюдавшихся в период измерения. Одной из причин медленных флуктуаций может быть искажение формы КФ вследствие изменения условий интерференции отдельных лучей.

Распределение вероятностей задержки сигналов на трассах распространения характеризуются рис. 6, на котором приведены гистограммы мгновенных значений моментов прихода  $t$ , полученных раз в секунду при отсчетах по максимуму КФ, уровню 0,5 от максимума и центру тяжести. Нуль шкалы задержек на этом рисунке соответствует среднему значению момента прихода для соответствующего метода взятия отсчета.

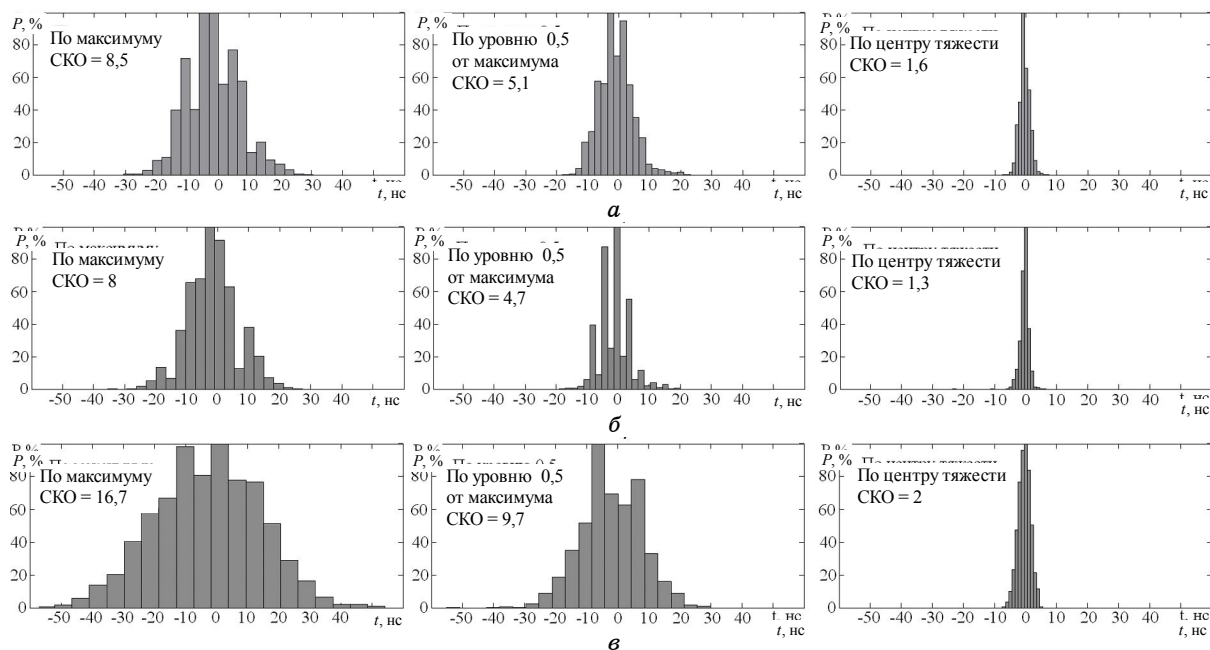


Рис. 6. Гистограмма мгновенных значений моментов прихода:  
а – трасса 7984,83 м; б – трасса 16696,1 м; в – трасса 29023,58 м

Оценки СКО моментов прихода для рис. 6 сведены в табл. 3. Здесь же для сравнения представлены значения СКО, рассчитанные по формулам [8] для оптимального измерителя времени задержки

$$\sigma_{\text{опт}}^2 = \frac{1}{(2 \cdot \pi)^2 \cdot q^2 \cdot F_{\text{эфф}}^2} + \frac{T_{\text{д}}^2}{12}, \quad q \gg 1,$$

где  $F_{эфф}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 \cdot |S(f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df}$ ;  $q$  – отношение сигнал/шум по напряжению;  $T_d$  – период дискретизации КФ, равен 3,67 нс;  $S(f)$  – спектральная плотность ШПС.

Таблица 3

Трасса, м	Отношение с/ш, дБ	По максимуму КФ, нс	По уровню 0,5 от максимума КФ, нс	По центру тяжести, нс	Оптимальный измеритель $\sigma_{опт}$ , нс
7984,8	42,1	8,5	5,1	1,6	1,12
16696,1	58,7	8	4,7	1,3	1,06
29023,6	34	16,7	9,7	2	1,42

Из табл. 3 следует, что измерение момента прихода по центру тяжести КФ дает результаты, наиболее близкие к оптимальным оценкам.

Влияние времени наблюдения на ошибку синхронизации устанавливалось путем усреднения мгновенных значений моментов прихода в течение пятиминутных интервалов. Характеристики флуктуаций моментов прихода, полученные в пятиминутных интервалах усреднения, приведены в табл. 4 для трасс протяженностью 7984,8 и 16696,1 м при наблюдении в течение суток и для трассы протяженностью 29023,6 м при наблюдении в течение двух часов.

Таблица 4

Трасса, м	По максимуму КФ, нс	По уровню 0,5 от максимума КФ, нс	По центру тяжести, нс
7984,8	4,5	2,2	1,2
16696,1	4,3	1,9	0,4
29023,6	6	5	1,8

Как видно из табл. 4, после пятиминутного усреднения отсчетов времени запаздывания по методу центра тяжести флуктуации (СКО) средних задержек составляют величину не более 1,8 нс, что сравнимо с величиной быстрых флуктуаций (СКО) 2 нс.

Представленные материалы позволяют сделать следующие выводы:

1. Наилучшая точность синхронизации на исследуемых трассах обеспечивается измерением времени запаздывания по положению центра тяжести корреляционной функции и составляет величину 1,5–2 нс для быстрых флуктуаций и  $\pm 6$  нс для медленных флуктуаций.

2. Медленные флуктуации могут быть уменьшены измерением задержки при известных координатах измерительных пунктов. Остаточная погрешность (СКО) оценки медленных флуктуаций при измерении задержки в течение, например, 5 мин составляет величину порядка 1,8 нс.

Таким образом, погрешность поправки  $\Delta t$  к шкале времени при измерении 5 мин составит величину 2,7 нс.

3. Синхронизация шкалы времени в удаленном до 29 км приемном пункте может быть установлена с погрешностью 2,7 нс. Она складывается из быстрых флуктуаций с СКО 2 нс и медленных флуктуаций за время измерения 5 мин (1,8 нс).

#### Литература

1. Уинклер. Задержка на распространение сигналов, ее применение и значения при использовании высокоточных стандартов частоты // *Время и частота: пер. с англ. / Под ред. Дж. Джесперсена.* – М.: Мир, 1973. – С. 70–78.

2. Одуан К. Измерение времени. Основы GPS / К. Одуан, Б. Гипо. – М.: Техносфера, 2002. – 400 с.

3. Рассказовский В.Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами / В.Б. Рассказовский, Г.П. Кулемин. – Киев: Наукова думка, 1987. – 232 с.
4. Лебедев В.Ю. Связь элементов рельефа местности с задержкой импульсных сигналов сантиметрового диапазона на приземных трассах распространения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2006. – № 6. – С. 40–43.
5. Денисов В.П. Система синхронизации наземного радиофизического комплекса // В.П. Денисов, М.В. Крутиков, В.Ю. Лебедев и др. // Материалы IX междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж: Изд-во ООО НПФ «САКВОЕЕ», 2003. – С. 1515–1526.
6. Корниенко В.Г. Синхронизация пространственно-разнесенных пунктов радиотехнической системы с использованием многоточечного измерения взаимной корреляционной функции запросных и ответных сигналов / В.Г. Корниенко, В.Ю. Лебедев, М.В. Крутиков // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2006. – №6. – С. 44–47.
7. Танцай П.И. Анализ влияния искажений корреляционной функции шумоподобного сигнала на точность оценивания его временного запаздывания / П.И. Танцай, В.-К.А. Би-рюкова, В.Г. Корниенко // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем. – Ульяновск, 2007. – С. 152–153.
8. Гришин Ю.П. Радиотехнические системы / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Ка-зарин и др. // М.: Высшая школа, 1990. – С. 131–141.

---

**Танцай Петр Игоревич**

Мл. науч. сотр. НИИ радиотехнических систем ТУСУРа  
Тел.: 8(382-2) 41-38-89  
Эл. почта: rwplab@ms.tusur.ru

**Корниенко Владимир Геннадьевич**

Науч. сотр. НИИ радиотехнических систем ТУСУРа  
Тел.: 8(382-2) 41-38-89  
Эл. почта: rwplab@ms.tusur.ru

P.I. Tantsai, V.G. Kornienko

**Experimental investigations of synchronization accuracy of the time scales at spatially separated stations by the radar transponder method**

The experimentally obtained results of accuracy estimating the time scales synchronization in spatially separated ground stations by the radar transponder method are presented.

**Key words:** pseudo-random sequence, propagation of radio waves, correlation function, time marker, system of synchronization, nanosecond.