

УДК 621.396.96

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ЧАСТОТНО- ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИГНАЛОВ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

А. А. Костыря

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник*

E-mail: secort@kture.kharkov.ua

С. А. Плехно

Аспирант*

E-mail: plehno@mail.ru

В. Н. Науменко

Аспирант*

E-mail: secort@kture.kharkov.ua

С. И. Ушаков

Аспирант*

E-mail: secort@kture.kharkov.ua

*Кафедра основ радиотехники

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

Наведені результати досліджень макету пасивної системи синхронізації часу та частоти з застосуванням алгоритму загального охоплення. У якості спільного джерела сигналу використовується передавач цифрового наземного телебачення. Розроблена структурна схема системи та алгоритм цифрової обробки результатів вимірювань зсуву шкал. Визначені переваги застосування сигналів з шумоподібною структурою для вирішення задач частотно-часової синхронізації

Ключові слова: синхронізація, еталон, алгоритм, цифрове телебачення, похибка, цифрова обробка, інтерполяція, нульова база

Приведены результаты исследований макета пассивной системы синхронизации времени и частоты с применением алгоритма общего охвата. В качестве общего источника сигнала используется передатчик цифрового наземного телевидения. Разработана структурная схема системы и алгоритм цифровой обработки результатов измерений сдвига шкал. Определены преимущества использования сигналов с шумоподобной структурой для решения задач частотно-временной синхронизации

Ключевые слова: синхронизация, эталон, алгоритм, цифровое телевидение, погрешность, цифровая обработка, интерполяция, нулевая база

1. Введение

Непрерывный рост требований к точности частотно-временной синхронизации территориально разнесенных эталонов времени и частоты обусловлен высоким темпом совершенствования эталонов, относительная нестабильность которых в настоящее время достигает $10E15 \dots 10E16$, что требует дальнейшего развития и совершенствования высокоточных частотно-временных методов сличения шкал. Синхронизация с использованием алгоритма общего охвата (АОО) предполагает прием в синхронизирующем (ведущем) и синхронизируемых (ведомых) пунктах радиосигнала общего источника (ОИ) при известных с достаточной точностью расстояниях от источника сигнала до пунктов. В качестве таких источников могут использоваться как наземные, так и космические излучатели, использующие многообразие частотных диапазонов и видов радиосигналов [1, 2].

Работа посвящена анализу результатов экспериментальных исследований лабораторного макета системы синхронизации времени и частоты (ССВЧ), реализующей АОО с использованием в качестве ОИ

передатчика дециметрового диапазона волн городского телецентра.

2. Обзор литературы

За основу взяты публикации, в которых проводится обзор как активных, так и пассивных алгоритмов синхронизации [1 – 3]. В данных работах отображены их достоинства и недостатки, обосновываются преимущества алгоритма общего охвата. Особенности проведения эксперимента и выбор источника общего сигнала отражены в [4, 5]. Обработка результатов измерений сдвига шкал времени и частоты выполняется на основе математического аппарата источников [6 – 8], для статистического анализа результатов измерений использованы подходы, показанные в [9, 10].

3. Постановка задачи

Рассматривается ССВЧ, реализующая АОО, когда сличение шкал производится по измерению разности

времени прихода сигнала ОИ в синхронизируемые пункты и ее сравнению с заранее определенным значением, то есть оценке подлежит временной параметр, равный временному сдвигу шкал эталонов. Задача оценки параметра является частным случаем фильтрации, когда фильтруемый параметр не успевает существенно измениться за время наблюдения [9]. Для наглядности приводится простейший случай, когда в ССВЧ входит только два пункта – ведущий (пункт А) и ведомый (пункт В).

В качестве оцениваемого параметра выбрано временное положение максимума взаимокорреляционной функции (ВКФ) фрагментов сигнала общего источника, записанных в пунктах синхронизации относительно «своих» временных шкал, $u_1(t) = s_1(t_1) + n_1(t_1)$ и $u_2(t) = s_2(t_2) + n_2(t_2)$, где $s(t)$ – сигнальная, а $n(t)$ – помеховая составляющие.

Оценивание производится в условиях наличия следующей априорной информации:

- $s_1(t_1)$ и $s_2(t_2)$ коррелированные, $n_1(t_1)$ и $n_2(t_2)$ некоррелированные составляющие случайных процессов;
- время распространения или разность времени распространения сигнала ОИ до синхронизируемых пунктов $\tau_p^{OA} - \tau_p^{OB}$ известно с необходимой точностью;
- известны несущая частота, полоса частот и закон модуляции сигнала ОИ;
- начальный сдвиг шкал пунктов приблизительно известен, то есть в записываемых фрагментах сигнала общего источника однозначно присутствуют взаимно коррелированные участки ($t_1 \approx t_2$). Если фрагменты не перекрываются, то задаче сличения шкал предшествует задача обнаружения сигнала, которая достаточно подробно рассмотрена в [6, 9].

4. Описание и математическая модель макета

Алгоритм оптимального (квазиоптимального) оценивания следующий.

В соответствии с прогнозируемым временем запаздывания в пунктах производится запись фрагментов сигнала ОИ относительно шкалы времени пункта приема сигнала.

В результате записи выборок сигнала ОИ в пунктах А и В формируются массивы данных, каждый из которых можно представить в виде суммы двух матриц размерностью $n \times m$, где $i=1, \dots, n$ – номер отсчета в сигнальной выборке, $j=1, \dots, m$ – номер сигнальной выборки, одиночный отсчет представляет собой сумму полезного сигнала и помехи и является случайным вектором:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{A_{i,j}}(t) \\ u_{B_{i,j}}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} s_{A_{i,j}}(t) \\ s_{B_{i,j}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{A_{i,j}}(t) \\ n_{B_{i,j}}(t) \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (1)$$

После обмена данными в каждом пункте осуществляется совместная обработка информации (1) – рассчитываются ВКФ фрагментов сигнала ОИ [6]:

$$V_j(\tau) = U_{A_i}(t) U_{B_i}^{*T}(t), \quad (2)$$

где символами *Т обозначены операции комплексного сопряжения и транспонирования матрицы.

В соответствии с (2) по каждой паре сигнальных выборок рассчитывается их ВКФ, при этом формируется j массивов значений и в каждом находится временное положение максимума функции. Результаты единичных расчетов усредняются и оценивается взаимное смещение временного положения максимумов ВКФ:

$$\left[V_j^{u_a u_b}(\tau) \right] \Rightarrow \left[\overline{t_j^A - t_j^B} \right]. \quad (3)$$

Значения временного положения максимумов ВКФ t_j^A, t_j^B являются случайными величинами, к которым применимы методы статистической обработки. Отличие оценок измеренного и расчетного значений положения максимумов ВКФ на временных шкалах дает результат сличения.

Результатом статистической обработки результатов измерений (СОРИ) являются значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения (СКО) временного сдвига шкал, а также отношение сигнал/шум в пунктах [3]:

$$\left[\widehat{\Delta T_j^{AB}} \right] = \left[\overline{t_j^A - t_j^B} \right] - \left[\tau_p^{OA} - \tau_p^{OB} \right] \Rightarrow \begin{cases} \left[\overline{\Delta T_j} \right] \\ \left[\sigma_{\Delta T_j} \left(\overline{q_j^A}, \overline{q_j^B} \right) \right] \end{cases}. \quad (4)$$

Устройство приема и обработки сигналов ОИ (рис. 1) состоит из таких основных частей – приемно-преобразующего модуля, модуля цифровой обработки и модуля связи. Задачей приемно-преобразующего модуля является прием радиосигнала, перенос его на пониженную частоту и преобразование при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в цифровую форму.

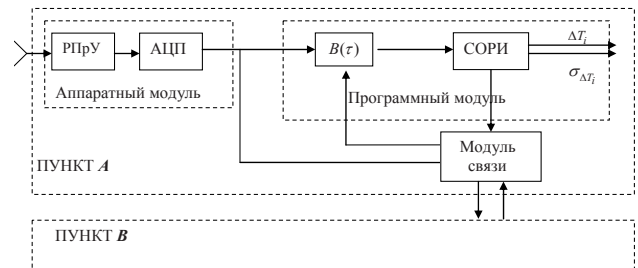


Рис. 1. Структурная схема устройства приема и обработки сигналов ОИ

В дальнейшей обработке используется последовательность временных отсчетов

$$u(i\Delta) = s(i\Delta) + n(i\Delta), \quad (5)$$

где $i=0, 1, \dots, m$; $0 \leq i\Delta \leq T$; T – длительность сигнальной выборки.

Программный модуль осуществляет вычисление дискретных значений ВКФ сигналов ОИ, принятых в пунктах А и В, $u_A(i\Delta) = x$, $u_B(l\Delta) = y$, при этом массивы сигнальных выборок i и l имеют смежную область $\{K-n\}$ [6, 10]:

$$V_{xy}(n\Delta) = \frac{K}{K-n} \sum_{k=0}^{K-n} x_k y_{k-n} \quad (6)$$

Максимальные значения дискретных отсчетов ВКФ могут не совпадать с положениями истинных максимумов функции и поэтому необходимо восстановить ВКФ, используя априорную информацию о параметрах сигнала ОИ.

При этом достаточно произвести восстановление в окрестности максимума, что существенно снижает объем производимых вычислений. В зависимости от формы ВКФ используется определенный вид интерполяции. ВКФ выборки OFDM-сигнала, используемого в наземном цифровом телевидении, интерполируется функцией вида $\sin x / x$ [7].

После этапа интерполяции следует измерение временного положения (ИВП) максимума ВКФ, для чего используются известные методы нахождения экстремумов функции. Если функция непрерывна и дифференцируема на исследуемом интервале, то поиск ее экстремума сводится к решению уравнения

$$V'_{xy}(\tau) = 0 \quad (7)$$

На заключительном этапе осуществляется статистическая обработка результатов измерений и их визуализация.

Поскольку временное положение максимума ВКФ принятых в пунктах сигналов привязано к временным шкалам пунктов, то различия в ОВП дает смещение временных шкал.

Результатом работы устройства является оценка временного сдвига шкал эталонов в пунктах в виде математического ожидания и дисперсии величины сдвига шкал, также оценивается отношение сигнал/шум. Для наглядности результат статистической обработки отображается в виде графиков и гистограмм.

По каналу связи с произвольной задержкой происходит обмен данными между синхронизируемыми пунктами о принятых сигналах и результатах сличения шкал времени и частоты. Связной и программный модули могут быть реализованы в виде специализированного устройства либо на базе ПЭВМ. При использовании ПЭВМ реализация ССВЧ существенно упрощается, однако имеет место определенная аппаратная избыточность, т. к. большинство функциональных возможностей ПЭВМ остаются неиспользованными.

5. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования макета ССВЧ в режиме «нулевой базы» [4] проводились в лаборатории НУЦ ОРТ ХНУРЭ. В данном режиме, когда оба канала ССВЧ находятся рядом, исключается канальная погрешность синхронизации, связанная с неидентичностью каналов распространения сигналов. Кроме того подаются контролю аппаратные задержки и легко варьируется значение разности времени прихода сигнала ОИ. Поэтому режим «нулевой базы» очень удобен для оценки потенциальных возможностей исследуемой ССВЧ. Структурная схема макета приведена на рис. 2.

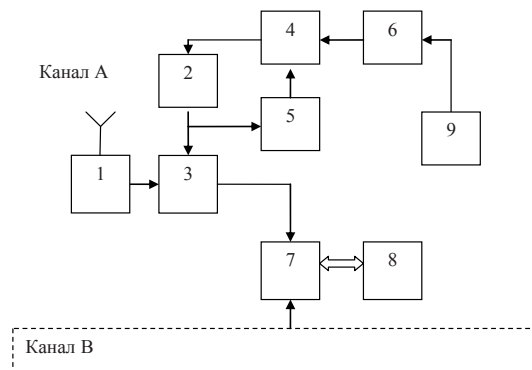


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки

В состав одного канала экспериментальной установки входят: антенна, преселектор 1, преобразователь частоты 3, управляемый генератор 2, фазовый детектор 4, делитель с переменным коэффициентом деления 5, 6, двухканальный цифровой осциллограф 7, персональная ЭВМ 8, синусоидальный генератор 9. Управляемый генератор с кольцом фазовой автоподстройки частоты и делителями частоты являются синтезатором сетки частот, выполняющим функцию перестраиваемого гетеродина. В качестве АЦП применяется двухканальный цифровой осциллограф. Программный модуль реализован с помощью персональной ЭВМ. Кроме того ПЭВМ управляет работой цифрового осциллографа и формирует массивы сигнальных выборок.

Алгоритм работы программного модуля представлен на рис. 3.

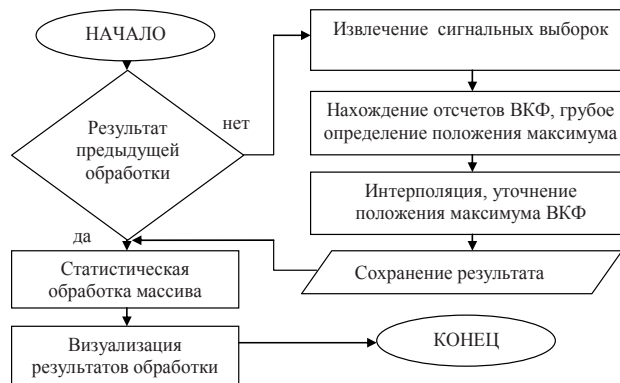


Рис. 3. Алгоритм работы программного модуля

В соответствии с представленным алгоритмом выполняется циклическое извлечение сигнальных выборок, вычисление дискретных отсчетов ВКФ по каждой паре выборок, грубое определение временного положения максимума ВКФ и его уточнение. В результате вычислений формируется массив данных временного положения максимумов ВКФ, который подвергается статистической обработке, полученные данные отображаются графически.

6. Статистический анализ результатов эксперимента

Результаты экспериментальных исследований макета ССВЧ представлены на рис. 4 – 11. На рис. 4

показан спектр, а на рис. 5 – взаимокорреляционная функция пары выборок сигнала цифрового наземного телевидения (OFDM-сигнала), ширина спектра $\Delta f_c = 8 \text{ МГц}$. На рис. 6 представлен массив значений ОВП максимумов ВКФ, т.е. результат измерений сдвига шкал времени эталонов. На рис. 7 показана гистограмма «взвешенных» значений ОВП. На рис. 8 – 11 показаны графики изменения интервальных оценок [8].

При выполнении экспериментальных исследований получены следующие результаты:

- количество пар сигнальных выборок – 250;
- количество отсчетов в сигнальной выборке – 10000;
- длительность сигнальной выборки – 50 мкс;
- среднее значение разности времени прихода сигналов 9,8 нс;
- СКО определения временного положения максимума ВКФ – 2,5 нс;
- отношение сигнал/помеха на входе АЦП после фильтрации – 30-35 дБ.

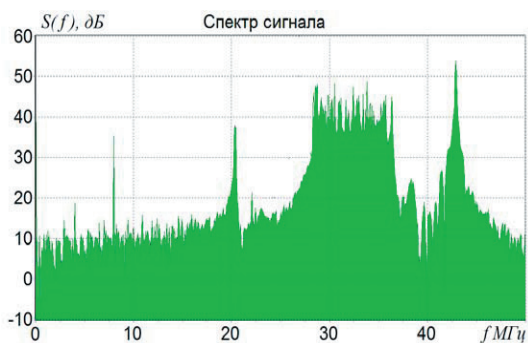


Рис. 4. Спектр OFDM сигнала промежуточной частоты

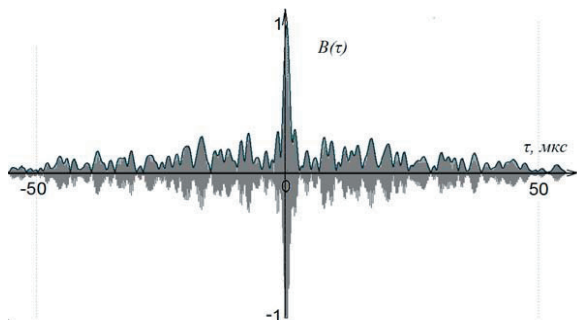


Рис. 5. ВКФ 2-х сигнальных выборок

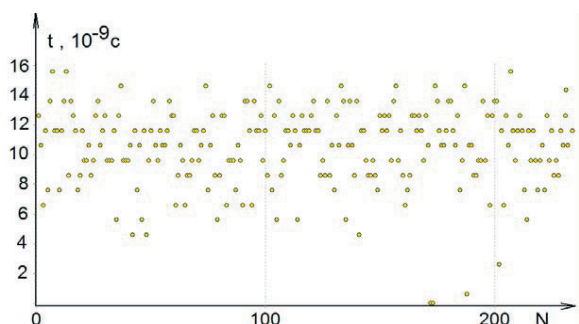


Рис. 6. Массив значений задержек (ось X – номер выборки, ось Y – разность времени прихода сигналов)

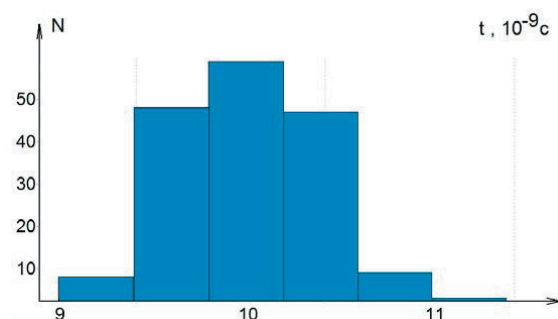


Рис. 7. Гистограмма «взвешенных» значений

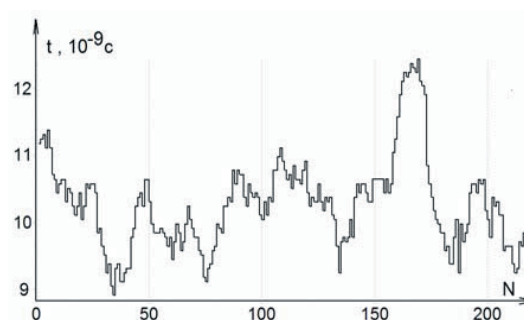


Рис. 8. Среднее значение на «скользящем» интервале (ось X – номер интервальной выборки, ось Y – изменение среднего значения разности времени прихода сигналов на интервале)

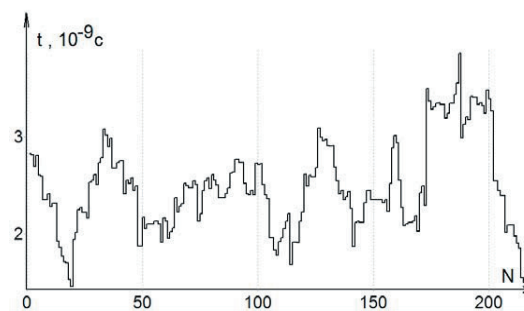


Рис. 9. СКО на «скользящем» интервале (ось X – номер интервальной выборки, ось Y – изменение СКО разности времени прихода сигналов на интервале)

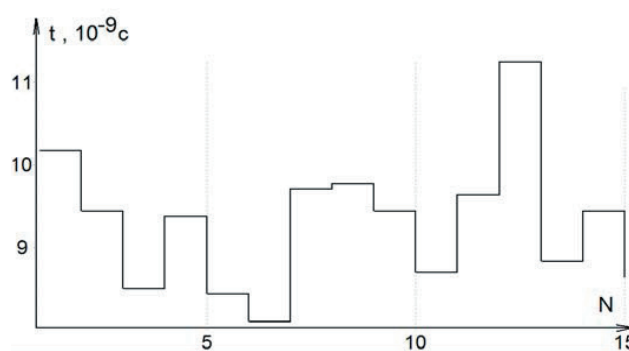


Рис. 10. Интервальное среднее значение (ось X – порядок интервала измерений, ось Y – изменение среднего значения разности времени прихода сигналов на интервале)

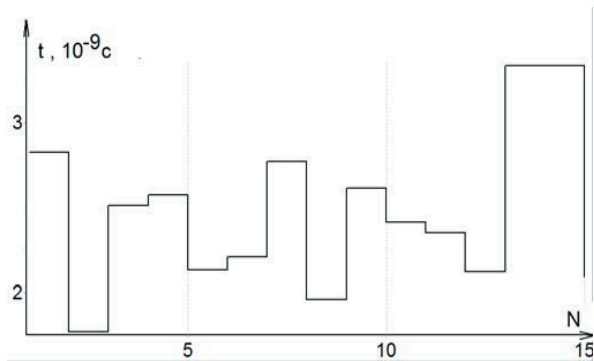


Рис. 11. Интервальное СКО (ось X — порядок интервала измерений, ось Y — изменение СКО разности времени прихода сигналов на интервале)

Из анализа приведенных графиков следует:

- полученная в результате Фурье-преобразования спектрограмма соответствует параметрам оцифрованного сигнала и свидетельствует о корректности аналого-цифрового преобразования;
- графическое изображение ВКФ сигнальных выборок несколько отличается от АКФ OFDM-сигнала, приведенной в [5] – функция взаимной корреляции имеет более широкие лепестки, следовательно, сигналы частично декоррелированы;
- вид гистограммы «взвешенных» значений результатов измерений разности времени прихода сигналов соответствует нормальному закону распределения,

поэтому для обработки этих результатов могут применяться статистические методы;

– визуализация результатов статистической обработки дает адекватное представление о величине и характере изменения полученных оценок разности времени прихода сигналов.

7. Выводы

Проведенные исследования показали, что использование в качестве ОИ передатчика сигналов цифрового наземного телевидения обеспечивает высокую потенциальную точность синхронизации шкал времени, которая составляет единицы наносекунд. В качестве достоинств OFDM-сигнала ЦНТВ следует отметить прямоугольность спектра, которая хорошо согласуется с амплитудно-частотной характеристикой радиоприемного устройства; шумоподобность структуры, которая обеспечивает хорошие характеристики по однозначности измерений; из известных наземных источников сигналов сигнал ЦНТВ обладает наибольшей эффективной шириной спектра и при равных отношениях сигнал/шум позволяет достичь наилучших результатов фильтрации информативного параметра [5].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности технической реализации высокоточной региональной ССВЧ в зоне уверенного приема сигналов цифрового телевидения.

Литература

1. Коваль, Ю. А. Анализ возможностей метода общего охвата для высокоточной синхронизации стандартов времени и частоты в пределах прямой видимости [Текст] / Ю. А. Коваль, А. А. Костыря, В. В. Обельченко и др. // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – №1(20). – С. 21 – 30.
2. Коваль, Ю. А. Оценка потенциальной точности синхронизации стандартов времени и частоты при использовании измерительного телевизионного сигнала [Текст] / Ю. А. Коваль, А. А. Костыря, Е. А. Иванова и др. // Системи управління, навігації та зв'язку, 2009. – №2(10). – С. 40-45.
3. Коваль, Ю. А. Моделирование систем частотно-временной синхронизации, использующих сигналы общих источников [Текст] / Ю. А. Коваль, А. А. Костыря, Е. А. Иванова, Б. А. Ал-Твежри // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2011, № 2 (том 54). – С. 12-21.
4. Коваль, Ю. А. Экспериментальные исследования точности сличения шкал времени в режиме нулевой базы при использовании сигналов эфирного и кабельного телевидения [Текст] / С. Г. Кундюков, А. А. Костыря, Ю. А. Коваль и др. // VII международная научно-техническая конференция «Метрология и измерительная техника» («МИИТ-2010»), С. 136-139.
5. Коваль, Ю. А. Выбор общего источника сигнала для региональной системы синхронизации времени и частоты [Текст] / Ю. А. Коваль, А. А. Костыря, О. А. Соляник, С. Ф. Семенов, С. А. Плехно, Х. Х. Асаад. // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – № 2 (27). С. 63 - 69.
6. Ширман, Я. Д. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория [Текст] / М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
7. Костыря, А. А. Применение интерполирующих алгоритмов для получения оценок сдвига шкал эталонов времени и частоты при синхронизации по общему источнику сигналов [Текст] / А. А. Костыря, В. Н. Наumenко, С. А. Плехно, О. А. Сомов, Х. Х. Асаад. // Радиотехника. № 173 – X.: ХНУРЕ, 2013. – С. 88-95.
8. Румшиский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст] / Л. З. Румшиский. – М.: Наука, 1971 – 192 с.
9. Тихонов, В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем [Текст] / В. И. Тихонов., В. Н. Харисов // Учебн. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
10. Вентцель, Е. С. Теория вероятности [Текст] / Е. С. Вентцель - М.: Наука, 1969. – 576 с.