
УДК 621.396.96

А.А. Костыря

Харьковский национальный университет радиотехники, Харьков

ОЦЕНКА МИНИМАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ ЭТАЛОНОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ ПО СИГНАЛУ МЕСТНОГО ТЕЛЕЦЕНТРА

В качестве источника общего сигнала применительно к использованию алгоритма общего охвата в системах синхронизации времени и частоты рассматривается местный телецентр. Приводятся соотношения для определения минимальной погрешности при синхронизации эталонов с помощью измерительного телевизионного сигнала.

Ключевые слова: синхронизация, время, частота, погрешность, измерительный телевизионный сигнал.

Введение

Исследования микро и макромира, цифровая передача данных, ракетно-космическая отрасль и еще много других научных и прикладных задач требуют синхронизации процессов во времени и измерения временных интервалов с высокой точностью. Качество решения этих задач зависит как от стабильности синхронизирующих сигналов, так и от точности синхронизации эталонов (стандартов) времени и частоты.

Время-частотная синхронизация с использованием алгоритма общего охвата (АОО) предполагает прием в синхронизирующем (ведущем) и синхронизируемых (ведомых) пунктах радиосигнала общего источника при известных с достаточной точностью расстояниях от источника сигнала до пунктов [1]. В качестве таких источников могут использоваться наземные и космические телекоммуникационные системы, системы теле и радиовещания, радионавигационные системы и пр., использующие многообразие частотных диапазонов и видов радиосигналов. Поэтому представляет практический интерес проведение предварительной оценки пригодности того или иного источника для использования в системе синхронизации времени и частоты (ССВЧ) на основании выбранного критерия.

Особенности работы систем синхронизации, использующих АОО

Особенности решения задач обнаружения и измерения параметров сигналов в ССВЧ при использовании АОО состоят в следующем:

- сигналы, излучаемые общим источником, имеют известную форму, частоту повторения и несущую частоту, частоту Доплера необходимо учитывать в динамических системах;

- диапазон "амплитуд" сигналов определяется снизу пороговым отношением сигнал/помеха q_n , а сверху – динамическим диапазоном приемных устройств и энергией излучаемых сигналов ССВЧ;

- измеряемые временные положения принимаемых в пунктах сигналов имеют известные диапазоны изменения (интервалы наблюдения – T_n), зависящие от режима работы ССВЧ и алгоритма синхронизации, и равномерные законы распределения;

- аддитивные помехи – $n(t)$ представляют собой стационарный нормальный белый шум с известной спектральной плотностью – N_0 .

Основным достоинством АОО является отсутствие излучения в синхронизируемых пунктах, что обеспечивает скрытность, электромагнитную совместимость, экологическую и информационную безопасность.

К достоинству АОО также можно отнести возможность использовать для измерения сдвига шкал взаимокорреляционную обработку (ВКО) сигналов, преимуществом которой является применение сигналов $S(t)$ с не полностью известными параметрами, а также использование шумоподобных сигналов.

При известных с достаточной точностью расстояниях от источника сигнала до ведущего и ведомых пунктов синхронизация шкал эталонов производится по результатам определения разности хода сигнала общего источника относительно шкал эталонов и сравнения полученных задержек с расчетным значением. Однако при этом имеет место остаточный сдвиг шкал времени ведомых пунктов относительно ведущего, который обусловлен погрешностями определения задержки сигнала в передающем тракте общего источника и приемных трактах пунктов и погрешностями измерения временного положения сигналов в пунктах.

Погрешности задержки сигнала в передающем тракте общего источника и приемных трактах пунктов относятся к аппаратным, контроль которых можно осуществлять "пилотированием аппаратных задержек" в процессе эксплуатации ССВЧ [2]. Погрешности измерения временного положения сигналов в пунктах необходимо оценивать на этапе разработки системы синхронизации.

Помимо основных измеряемых параметров в ССВЧ принято производить измерение уровней сигналов или отношений сигнал/помеха. Это позволяет повысить эффективность статистической обработки результатов измерений и корректировать аппаратные погрешности, вызванные зависимостями задержек в аппаратуре от уровней сигналов.

Оценка средней квадратической погрешности синхронизации эталонов времени и частоты

Выражение для определения минимальной средней квадратической погрешности (СКП) оценки временного положения сигналов в ССВЧ имеет вид [4, 5]:

$$\sigma_t = \frac{1}{q \times \Delta\omega_{\text{эф}}}, \quad (1)$$

где $q = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}}{N_0}}$ – отношение сигнал/помеха при согласованной обработке сигнала; \mathcal{E} – энергия сигнала; N_0 – спектральная плотность шума; $\Delta\omega_{\text{эф}}$ – эффективная ширина спектра сигнала.

Такое значение СКП является минимальным (предельным) при однократном измерении и его значение является определяющим на этапе разработки ССВЧ.

Для измерения временного положения по огибающим сигналов при неограниченной полосе

канала эффективная ширина спектра, входящая в состав выражения (1), находится из выражений:

$$\Delta\omega_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{8\pi^2}{\mathcal{E}} \int_0^{\infty} f^2 |S(f)|^2 df}, \quad (2)$$

где $S(f)$ – спектр комплексной огибающей сигнала.

При ограниченной полосе канала изменяются пределы интегрирования по частоте:

$$\Delta\omega_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{8\pi^2}{\mathcal{E}} \int_0^{\Delta f_n} f^2 |S(f)|^2 df}. \quad (3)$$

Как видно из соотношений (2) и (3), эффективная ширина спектра сигнала определяется не только полосой частот, в пределах которой сосредоточена основная энергия сигнала, но и формой амплитудного спектра сигнала. Чем большая доля энергии сигнала сосредоточена на границах полосы частот, тем больше $\Delta\omega_{\text{эф}}$.

В работе [3] выполнен анализ взаимной корреляционной функции (ВКФ) элементов телевизионного сигнала и показаны преимущества измерительного многочастотного сигнала С2 (параметры согласно ГОСТ 7845-79 ДСТУ 3877-99), размещенного в 21 строке телевизионного кадра.

Измерительный сигнал С2 (рис. 1) состоит из пяти составляющих длительностью 4 мкс (0,5 МГц; 1,0 МГц; 2,0 МГц; 4,0 МГц; 4,8 МГц) и составляющей 5,8 МГц длительностью 6 мкс, то есть представляет собой дискретный частотный сигнал (ДЧС).

Для определения $\Delta\omega_{\text{эф}}$ такого сигнала с достаточной для практики точностью можно воспользоваться соотношением для сигнала со спектром в виде равномерно смещенных полос [4]:

$$\Delta\omega_{\text{эф}} = \sqrt{\pi^2 k_f \Delta f^2}, \quad (4)$$

где

$$k_f = \frac{1}{3} \frac{N+1}{N-1} \left[1 - \frac{2\Delta f_i}{\Delta f} + \frac{2N}{N+1} \frac{\Delta f_i^2}{\Delta f^2} \right]; \quad (5)$$

Δf_i – ширина полосы одиночного частотного подинтервала; Δf – частотная полоса, в которой находятся подинтервалы Δf_i ; N – количество частотных подинтервалов.

Достоверность использования данного подхода проверялась посредством математического моделирования по критерию изменения формы и ширины главного лепестка автокорреляционной функции (АКФ) ДЧС. В результате моделирования установлено, что равномерная расстановка частотных подинтервалов в пределах полосы частот измерительного сигнала С2 мало влияет на форму главного лепестка АКФ. Изменение ширины главного лепестка АКФ не превышает 5%.

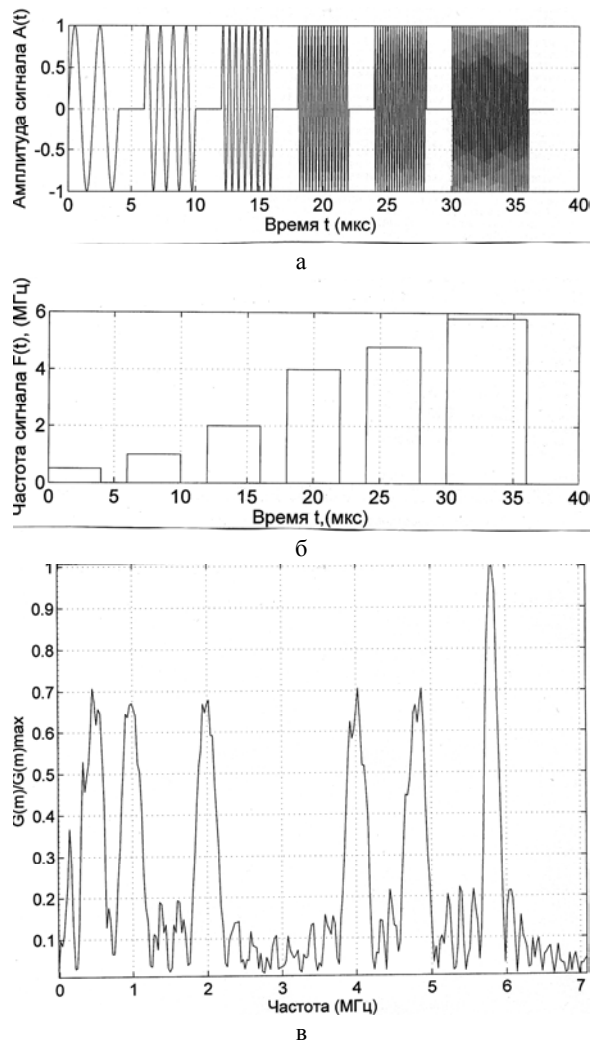


Рис. 1. Моделирование измерительного сигнала С2:
 а – изменение амплитуды сигнала во времени;
 б – изменение частоты сигнала во времени;
 в – огибающая амплитудно-частотного спектра сигнала

Для достижения потенциальной точности оценки временного положения ДЧС необходимо осуществлять согласованную фильтрацию или корреляционную обработку. В [6] показано, что при $\varphi_i \gg \varphi_n$ минимальную погрешность определения временного положения ДЧС можно реализовать при оптимальной обработке и измерениях временного положения каждого из элементов по огибающим и фазам с последующим весовым усреднением результатов этих измерений. При реализации додетекторной корреляционной обработки оценка взаимного положения шкал времени и частоты эталонов осуществляется по положению максимума ВКФ огибающей ДЧС.

Расчеты, выполненные по соотношениям (1), (4), (5), показали, что ожидаемое значение минимальной погрешности синхронизации времени при отношении сигнал/шум не менее 20 дБ (в зоне уверенного телевизионного приема [7]) составляет приблизительно 10 нс. Данное значение показывает

теоретически возможный предел точности синхронизации эталонов времени и частоты для однократного измерения при использовании в качестве общего сигнала фрагмента телевизионной строки, а именно – измерительного сигнала С2. При практической реализации ССВЧ следует ожидать существенно большей погрешности однократного измерения. Снижение результирующей СКП возможно за счет проведения многократных измерений с последующей их статистической обработкой.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что параметры измерительного сигнала С2 имеют некоторые отличия в разных телеканалах, а так как телеканал «Интер» в г. Харькове имеет наиболее мощный радиопередатчик (20 кВт) и структура измерительного сигнала в этом канале наиболее полно соответствует ГОСТу, то в эксперименте использовался именно сигнал «Интера» (рис. 2).

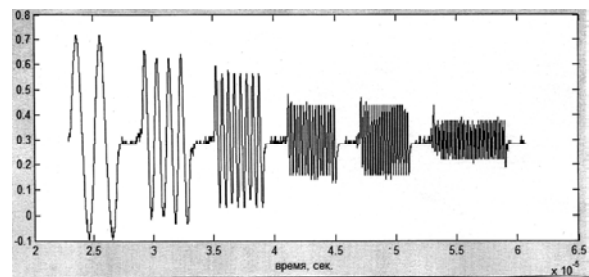


Рис. 2. Осциллограмма измерительного сигнала С2, телеканал «Интер»

При практической реализации метода получено значение СКП менее 2 нс в результате статистической обработки серии из 500 измерений [1]. СКП определялась двумя методами – традиционной статистической обработкой единичных измерений и статистической обработкой средних значений 20 групп измерений по 25 единичных отсчетов в каждой группе. Эксперимент проведен в режиме "нулевой базы", что позволяет минимизировать влияние аппаратных задержек. Полученные экспериментально осциллограммы сигналов и их спектры (рис. 3) свидетельствуют о том, что приемные каналы синхронизируемых пунктов не идентичны и не согласованы с полосой телевизионного измерительного сигнала, с ростом номера частотной составляющей наблюдается уменьшение ее амплитуды, наиболее высокочастотная составляющая ДЧС практически подавлена, и, следовательно, реальное значение эффективной полосы сигнала существенно меньше расчетного.

Для более полной реализации потенциальных возможностей данного метода синхронизации эталонов (стандартов) времени и частоты необходимо создание специализированного радиоприемного устройства, полоса пропускания которого согласована с полосой измерительного сигнала С2.

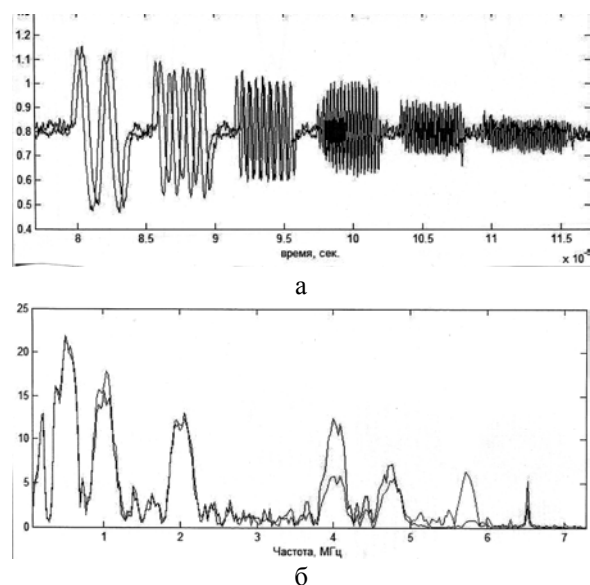


Рис. 3. Осциллограммы (а) и огибающие спектров (б) при двухканальном приеме измерительного сигнала

Следует заметить, что при использовании в качестве синхронизирующего только сигнала С2, возникает неоднозначность измерений, кратная периоду кадровой развертки, равному 40 мс. Устранение этой неоднозначности возможно за счет предварительной грубой синхронизации по сигналу звукового сопровождения, что подтверждено результатами предыдущих исследований [3]. То есть в состав ССВЧ должен входить канал грубой синхронизации по сигналу звукового сопровождения и канал точной синхронизации по измерительному сигналу С2.

Выводы

Использование сигнала местного телецентра при реализации алгоритма общего охвата позволяет с достаточной для многих практических и научных применений точностью синхронизировать пространственно разнесенные эталоны, находящиеся в зоне уверенного телевизионного приема, что подтверждено результатами теоретических и экспериментальных исследований. Проведенные исследования показали, что использование в АОО измери-

тельного телевизионного сигнала обеспечивает наносекундную потенциальную погрешность синхронизации времени.

Анализ результатов эксперимента показал необходимость разработки устройства приема и выделения многочастотного измерительного сигнала, позволяющего реализовать предельные возможности рассмотренного алгоритма синхронизации.

В связи с начавшимся переходом наземного телевизионного вещания на цифровой формат становится актуальной проработка вариантов реализации ССВЧ с использованием шумоподобных сигналов.

Список литературы

1. Оценка потенциальной точности синхронизации стандартов времени и частоты при использовании измерительного телевизионного сигнала / А.А. Костыря, Ю.А. Коваль, Е.А. Иванова, Е.П. Ермолаев, М.В. Миях, С.И. Носов, Е.Ю. Бондарь // Системи управління навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ, 2009. – Вип. 2 (10). – С. 40-45.
2. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под общ. ред. Б.Л. Кащеева, Е.Г. Прошкина, М.Ф. Лагутина. – Х.: ХНУ-РЭ; Бизнес Информ, 2002. – 426 с.
3. Анализ возможностей метода общего охвата для высокоточной синхронизации стандартов времени и частоты в пределах прямой видимости / Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, В.В. Обельченко, Е.Ю. Бондарь, Е.А. Иванова, Е.П. Ермолаев, М.В. Миях // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – № 1 (20). – С. 21-30.
4. Кук Ч. Радиолокационные сигналы: пер. с англ. / Ч. Кук, М. Бернфельд; пер. под ред. В.С. Кельзона. – М.: Сов. радио, 1971. – 568 с.
5. Ширман Я.Д. Разрешение и сжатие сигналов / Я.Д. Ширман. – М.: Сов. радио, 1974. – 360 с.
6. Бавыкина В.В. К вопросу о потенциальной точности фиксации временного положения сигнала при сличении шкал хранителей времени / В.В. Бавыкина, Ю.А. Коваль // Радиотехника. – 1981. – Вып. 57. – С. 63-69.
7. Седов С.А. Индивидуальные видеосредства: телеантенны, телевизоры, видеоманитофоны, видеопроигрыватели, видеодиски: справочное пособие / С.А. Седов. – К.: Наукова думка, 1990. – 752 с.

Поступила в редколлегию 19.03.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.И. Волощук. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

ОЦІНКА МІНІМАЛЬНОЇ ПОХИБКИ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЕТАЛОНІВ ЧАСУ І ЧАСТОТИ ПО СИГНАЛУ МІСЦЕВОГО ТЕЛЕЦЕНТРУ

О.О. Костыря

У якості джерела спільного сигналу стосовно до використання алгоритму загального охоплення в системах синхронізації часу і частоти розглядається місцевий телецентр. Наводяться співвідношення для визначення мінімальної похибки у разі синхронізації еталонів за допомогою вимірювального телевізійного сигналу.

Ключові слова: синхронізація, час, частота, погрешність, вимірювальний телевізійний сигнал.

CALCULATION OF THE MINIMUM ERROR OF SYNCHRONIZATION OF STANDARDS OF TIME AND FREQUENCY OF A SIGNAL OF TELEVISION STATION

O. O. Kostyrya

As a source of the common-view reference signal for purpose of time and frequency synchronization the local television centre is used. Proportions for the minimum error of standards synchronization with using measuring television signal are stated.

Keywords: synchronization, time, frequency, error, measuring television signal.