

УДК 621.395.74.078

ФИЛЬТРАЦИЯ ИСКАЖЕНИЙ ВРЕМЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ СИНХРОСИГНАЛА ПОСРЕДСТВОМ УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ ФАПЧ

М. Л. Шварц, директор департамента систем сетевой синхронизации Syrus Systems; schwartz@syrus.ru

Д. В. Шевченко, заместитель начальника лаборатории ОАО «Мобильные ТелеСистемы»; clock@mts.ru

Ключевые слова: устройство частотно-временной синхронизации, фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ), опорный генератор, фазовый детектор, временной импульс, формирователь опорных зон, делитель частоты.

Надежность цифровых сетей связи во многом зависит от системы частотно-временного обеспечения. Это относится как к сетям общего пользования, так и к сетям мобильной связи: в обоих случаях действуют схожие принципы организации связи, в том числе схемы распределения нагрузок на сети и обеспечения их устойчивости. В статье рассматривается возможность фильтрации искажений временного положения синхросигнала с помощью устройства частотно-временной синхронизации (УЧВС).

Основным критерием оценки качества функционирования УЧВС является эффективность восстановления и коррекции тактовой частоты для систем тактовой сетевой синхронизации (ТСС) и сигналов точного времени, подверженных значительным фазовым искажениям в цепях формирования сигнала и в линиях связи [1].

В УЧВС производится поэтапное приближение частоты опорного генератора f_0 к значению тактовой частоты в системе ТСС — при условии выполнения временных соотношений в сигналах точного времени (временных импульсах (ВИ)), соответствующих сигналам 1PPS). При этом в определителе положения временных импульсов (ОПВИ) реализуются следующие условия работы:

- сигнал точного времени (ВИ), используемый для восстановления тактовой частоты и сигналов точного времени, поступает на вход УЧВС каждую секунду — так, что момент его приема может находиться в некоторой области, значительно меньшей, чем секундный интервал;
- секундный интервал с помощью формирователя опорных зон (ФОЗ) разбивается на N опорных зон, равных между собой и имеющих длительность, несколько превышающую область разброса моментов приема ВИ;
- первый же принятый ВИ совпадает с одной из опорных зон, а следующий может попасть в ту же опорную зону или в одну из соседних, причем со временем он обязательно совпадет с соседней зоной. Стык этих двух зон будет той точкой, которая

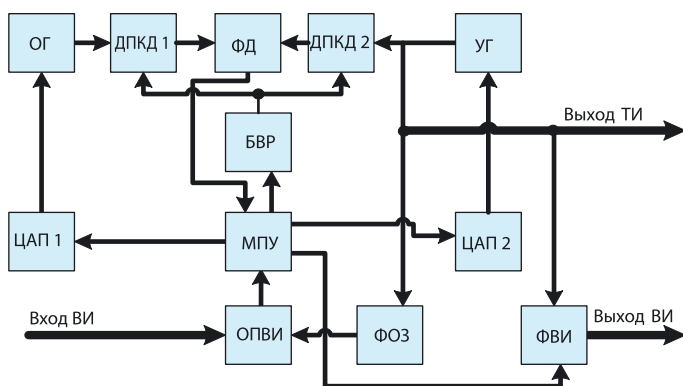


Рис. 1

определил фазу тактового интервала (ТИ), а также положение сигнала точного времени (ВИ).

Блок-схема УЧВС представлена на рис. 1 [2], где ОГ — опорный генератор; ДПКД — делитель с переменным коэффициентом деления; ФД — фазовый детектор; УГ — управляемый генератор; БВР — блок выбора режимов; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; МПУ — микропроцессорное устройство, выполняющее функции вычислителя коэффициентов деления и управления работой блоков УЧВС; ФВИ — формирователь временных импульсов, выполненный в виде делителя, начальной фазой которого управляет МПУ.

Устройство решает три основные задачи [3]:

- определение местонахождения временного импульса — с помощью формирователя опорных зон соответствующей длительности и ОПВИ;
- управление фазой управляемого генератора для поддержания положения ВИ в заданной области — с использованием системы управляемой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), состоящей из опорного и управляемого генераторов, ЦАП 1, ДПКД 1 и 2, управляемого фазового детектора (УФД), блока выбора режимов и микропроцессорного устройства [4];
- управление частотой опорного генератора с целью приближения ее к номинальному значению — с помощью блоков МПУ, ЦАП 1 и опорного генератора.

Управляемая система ФАПЧ и устройство в целом работают по алгоритмам вычислений, заложенным в МПУ, на которое с выхода фазового детектора поступают входной сигнал времени в виде секундного импульса, последовательность опорных зон и результаты сравнения фаз импульсов, сформированных ДПКД. МПУ же обеспечивает усреднение передаваемой информации, что позволяет устранять ошибки УЧВС при возникновении скачков фазы во входных ВИ, которые появляются за счет работы системы передачи и изменений параметров линий связи.

Основным исполнительным устройством, определяющим временные характеристики рассматриваемого УЧВС, является управляемая система ФАПЧ, поэтому акцент в данной статье сделан на ее устройстве и алгоритмах функционирования.

При построении схемы ФАПЧ для оборудования ТСС необходимо учитывать ряд обстоятельств:

- полоса подавления низкочастотных шумов должна быть на несколько порядков уже, чем в устройствах ФАПЧ, применяемых в системах передачи;
- время задержки тактового сигнала при его обработке в устройствах ФАПЧ строго не лимитировано и может изменяться в пределах нескольких тактовых интервалов;
- управляемый генератор должен запоминать значение частоты синхросигнала и помнить его долгое время после пропадания;
- время установления синхронизма может достигать нескольких часов;
- технически имеется возможность управлять независимо друг от друга фазой и частотой выходных сигналов, формируемых в системе ФАПЧ;

• технически имеется возможность использовать фазовые детекторы, работающие по нониусному принципу измерения разности фаз.

В УЧВС применена эффективная система ФАПЧ на базе управляемого фазового детектора с использованием дополнительного опорного генератора.

Предложенная система ФАПЧ основана на формировании с помощью ДПКД сигналов, периоды которых равны между собой или отличаются на небольшую заданную величину так, что общий период сравниваемых сигналов состоит из последовательности импульсов неравной длительности. Длительностью этих импульсов управляет МПУ, а порядок и последовательность делений ДПКД устанавливает блок выбора режимов. При этом МПУ обеспечивает астатическое управление генератором, т. е. любое рассогласование фаз, вводимое в УФД, отрабатывается в управляемом генераторе.

Специальный алгоритм выбора коэффициентов деления ДПКД и система управления генератором по данным двух последовательных измерений позволяют реализовать необходимую точность установки и поддержания положения выходных импульсов ФАПЧ относительно среднего положения импульсов входного сигнала.

Главной особенностью предлагаемой системы ФАПЧ является наличие отдельных алгоритмов и цепей для подстройки частоты и фазы выходных сигналов. Для удержания фазы в заданных пределах основная подстройка положения выходных импульсов производится на величину, несколько превышающую возможное изменение их положения в опорной зоне за счет различия частот ОГ и УГ. После того как будет набрана достаточная статистика данных по управлению положением опорных зон, МПУ корректирует частоту ОГ. Поэтому основной режим работы, а именно регулировка положения опорных зон относительно выходного сигнала, представляет собой упрощенную функциональную схему управляемой ФАПЧ (рис. 2).

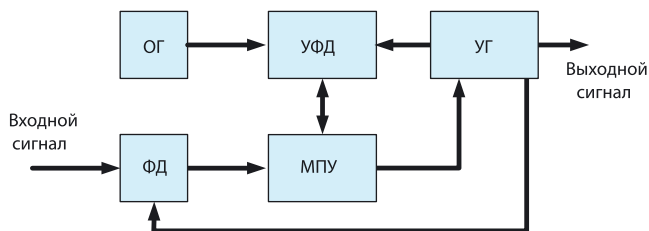


Рис. 2

Ведущим элементом этого устройства является управляемый фазовый детектор, который обеспечивает необходимый шаг управления фазой УГ, определяющей положение опорных зон относительно выходного сигнала.

Рассмотрим структуру УФД более подробно (рис. 3). Значения частот ОГ и УГ различны, не кратны, при этом наибольший общий делитель номинальных значений этих частот F намного меньше значения частот ОГ и УГ.

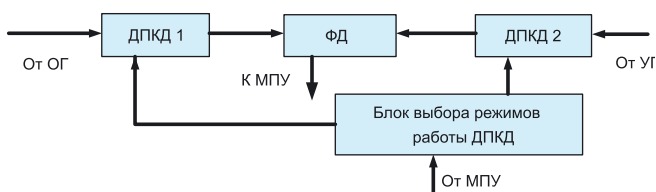


Рис. 3

Величина изменения фазы управляемого генератора после каждой коррекции должна быть больше, чем возможный уход фазы из-за отличия частоты опорного генератора от номинала. Соответственно, устройство может работать в трех режимах:

- до первой (грубой) подстройки частоты ОГ; наибольший шаг фазовой подстройки;
- до второй (точной) подстройки частоты ОГ; средний шаг фазовой подстройки;
- после точной установки частоты ОГ; наименьший шаг фазовой подстройки.

На начальном этапе управляемый сдвиг фаз должен быть чуть более 10 нс — этого достаточно, чтобы не потерять синхронизм при точности установки номинала в опорном генераторе 1×10^{-8} . Затем управляемый сдвиг фаз устанавливается равным 1 нс — при установке и поддержании частоты ОГ не хуже $0,5 \times 10^{-10}$; при установке частоты ОГ с точностью не хуже 1×10^{-11} шаг коррекции фазы выходного сигнала может быть равным 0,1 нс. Это значение и обеспечивает метрологическую точность получаемых результатов.

После многократных корректировок фазы управляемого генератора рассчитывается необходимое значение коррекции частоты опорного генератора. Период управления частотой ОГ определяется временем усреднения $T_{\text{уср}}$ значений коррекции фазы УГ. В свою очередь, $T_{\text{уср}}$ зависит от режима работы ФАПЧ и может изменяться в пределах от десятков секунд до нескольких минут.

Коэффициенты деления в ДПКД в режиме управления выбираются с помощью алгоритма Евклида. Пусть частота ОГ — f_0 , частота УГ — f_y , а их наибольшая общая частота — F . Тогда $f_0/F = D1$, а $f_y/F = D2$ (например, если $f_0 = 5$ МГц, а $f_y = 16,384$ МГц, то $F = 8$ кГц и $D1 = 625$, а $D2 = 2048$). В отсутствие управляющего сигнала коэффициент деления ДПКД 1 равен $D1$, а ДПКД 2 — $D2$.

Используемый алгоритм [5] позволяет создавать сдвиги, кратные 0,1 нс.

Управление фазой выходного сигнала производится путем изменения разности фаз сравниваемых в УФД сигналов, полученных от УГ и ОГ, на величину, кратную $\Delta\varphi$. Обычно она очень мала — может составлять доли наносекунды. Значение изменения разности фаз сравниваемых сигналов рассчитывается в МПУ с точностью и по алгоритму, которые соответствуют текущему режиму работы ФАПЧ. При этом значение необходимого управляющего изменения фазы УГ зависит от положения входного ВИ относительно рабочей точки — оно определяется за время измерения $T_{\text{изм}} = 1$ с, что значительно превышает период управления в УФД (T_y), обычно составляющий 250 мкс.

Изменяя значение разности фаз сравниваемых сигналов, можно или обеспечить резкую (быструю) подстройку фазы УГ при не очень эффективном подавлении фазовых шумов во входном сигнале, или, допуская сравнительно большую временную задержку, получить высококачественные характеристики выходных синхросигналов за счет фильтрации синхросигнала от фазовых искажений.

Таким образом, предлагаемая система ФАПЧ, в которой используется сравнительно простой опорный генератор, позволяет эффективно восстанавливать частоту и фазу исходного сигнала при значительных фазовых шумах входного временного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные проблемы ТСС и единого точного времени в сетях электросвязи: Матер. конф. — М.: ЦНИИС, 2008.
2. Патент МПК H04 В 7/00, H04 L 27/00 (Роспатент, 2007). Устройство частотно-временной синхронизации/Д. В. Шевченко, М. Н. Колтунов.
3. Колтунов М. Н., Леготин Н. Н., Шварц М. Л. Сетевая синхронизация в системах связи. — М.: Syrus Systems, 2007.
4. А.с. 1443173 РФ, Кл НОЗЛ. Устройство импульсно-фазовой автоподстройки/М. Н. Колтунов. — Опубл. 1988, Бюл. № 45.
5. Клэппер Дж., Фрэнкл Дж. Системы фазовой и частотной автоподстройки частоты/Пер. с англ. под ред. А. Ф. Фомина. — М.: Энергия, 1977.

Получено после доработки 04.09.09