

УДК 531.76

**МЕТОДЫ СТАБИЛИЗАЦИИ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ С ПОМОЩЬЮ
ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ
ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ МЕТОК ВРЕМЕНИ**

А.А. Раков, Н.П. Хатырев

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
nk@vniiftri.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается один из перспективных методов стабилизации волоконно-оптической линии для передачи меток времени. Описан основной принцип построения и функционирования такой системы. Показано, что использование псевдослучайно модулированного оптического сигнала позволяет компенсировать внешние воздействия и флуктуации в линии связи. В заключение приведены выводы и наиболее важные результаты, полученные в ходе работы.

Ключевые слова: псевдослучайная последовательность, передача времени и частоты, лазерная локация, прецизионное измерение расстояния, корреляционная функция.

**METHODS FOR STABILIZING A FIBER-OPTICAL LINE
USING PSEUDO-RANDOM PULSE MODULATION
FOR TIME STAMP TRANSMISSION**

A.A. Rakov, N.P. Khatyrev

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,
nk@vniiftri.ru

Annotation. In this paper one of the promising methods of stabilizing a fiber-optic line for the transmission of time stamps is considered. The basic principle of construction and operation of such a system is described. It is shown that the use of a pseudo-randomly modulated optical signal makes it possible to compensate for external influences and fluctuations in the communication line. In the end the conclusions and the most important results obtained in the course of the work are presented.

Key words: pseudo-random sequence, transmission of time and frequency, laser ranging, precision distance measurement, correlation function.

В настоящее время промышленность, транспорт, наука, телекоммуникации, наземная и космическая навигации ориентированы преимущественно на использование сигналов единого точного времени, передаваемых спутниковыми радионавигационными системами. Однако отсутствие альтернативных решений по доставке сигналов точного времени может привести к нежелательным ошибкам. Это может быть связано со всевозможными естественными и техногенными воздействиями (физические или электромагнитные,

включая повышенную активность Солнца) на спутниковые радионавигационные системы. К примеру, из-за неточных или неправильно принятых меток времени теряется хронологическая достоверность телеметрической информации, нарушается последовательность выполнения программ в пространственно разнесённых сетевых элементах, возможно пропадание архивных данных и нарушение безопасности доступа к ресурсам сети.

В последнее время в мировой практике большое внимание уделяется распределению сигналов точного времени от государственных эталонов частоты и времени по волоконно-оптическим линиям в качестве основной среды передачи [1]. Перспективным способом устранения всевозможных воздействий на волоконно-оптическую линию является использование псевдослучайно импульсно-модулированного сигнала [3]. Его автокорреляционные свойства позволяют резко повысить устойчивость передачи эталонных сигналов времени и частоты к внешним воздействиям и различным флуктуациям. Реализация такого метода передачи вызывает необходимость разработки мер компенсации различных воздействий на такую волоконно-оптическую систему передачи.

Применение псевдослучайной импульсной модуляции лазерного излучения

Основная сложность в синхронизации двух удалённых источников времени заключается в том, что в данной системе возникает асимметрия задержек сигналов в радиотехнических устройствах, а также время распространения сигналов в волоконно-оптической линии всегда варьируется в зависимости от внешних факторов и флуктуаций. В данной работе предлагается метод, который позволит компенсировать задержку распространения сигнала между устройствами с пикосекундной точностью. Основным принцип работы был взят из лазерной локации, суть которого заключается в точном измерении оптического пути волоконно-оптической линии [2, 5].

Два радиотехнических устройства разнесены в пространстве (рис. 1). Полагаем, что один из них является ведущим (Master), другой — ведомым (Slave). Они соединены между собой волоконно-оптической линией, по которой осуществляется двухсторонний обмен оптическими импульсами 1 PPS (pulse per second).

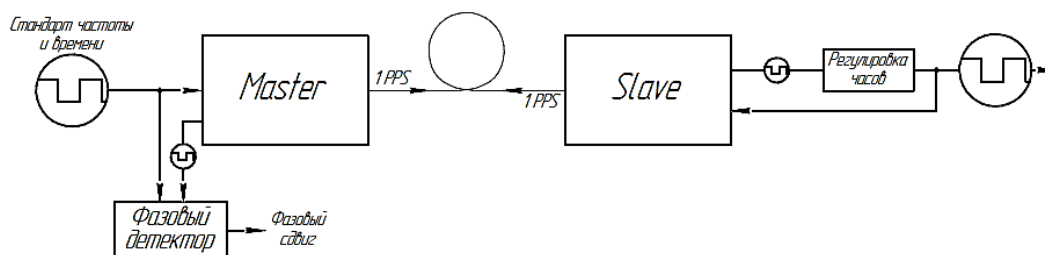


Рис. 1. Двухсторонний обмен оптическими импульсами между эталоном частоты и времени (Master) и потребителем (Slave) по волоконно-оптической линии

Для компенсации времени задержки распространения сигнала между двумя устройствами ведущее (Master) устройство осуществляет лазерное зондирование волоконно-оптической линии по всей её длине. Псевдослучайный генератор сигналов, расположенный в ведущем устройстве, формирует и отправляет электрический (зондирующий) псевдослучайный сигнал на лазерный источник излучения, после чего выходной сигнал передаётся в волоконно-оптическую линию, отражается от ведомого устройства и возвращается на приёмник излучения, в то время как опорный сигнал проходит внутри устройства через линию задержки, поступает вместе с сигналом приёмного канала на блок корреляционной обработки данных, после которого вычисляется текущее время задержки опорного сигнала, которое и есть время задержки распространения сигнала между двумя устройствами.

Поскольку в течение одного периода характер последовательности является случайным, то её автокорреляционная функция, измеренная за конечный интервал времени, представляет собой узкий треугольник [4]. При полном совпадении последовательностей наблюдается резкий рост корреляционной функции (рис. 2).

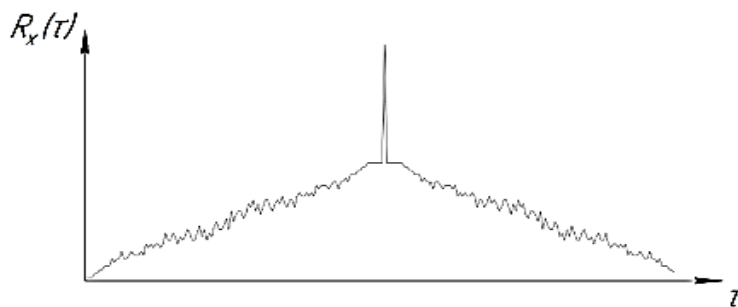


Рис. 2. Автокорреляционная функция псевдослучайной последовательности

Максимальное значение корреляционной функции можно вычислить по следующей формуле:

$$R_x(0) = \sigma^2, \quad (1)$$

$$R_x(\tau > \tau_0) = \frac{R_x(0)}{N}, \quad (2)$$

где τ_0 — длительность единичного интервала; σ^2 — дисперсия последовательности; N — длина последовательности.

При вычислении корреляционной функции вне треугольника образуется квазислучайный шум, для которого становится справедливым соотношение:

$$|R_x(\tau > \tau_0)| \sim \frac{R_x(0)}{\sqrt{N}}. \quad (3)$$

Существуют серийно выпускаемые генераторы псевдослучайных последовательностей с перестраиваемой длиной. Длина последовательностей может изменяться на 2^7-1 , $2^{11}-1$, $2^{15}-1$, $2^{23}-1$, $2^{31}-1$ бит в одном периоде. Из формул, представленных выше, следует, что чем больше длина последовательности, тем меньше ширина треугольника. Это говорит о том, что генератор с перестраиваемой длиной псевдослучайной последовательности может быть использован в тех случаях, когда требуется повышенная точность измерений временного смещения одной последовательности относительно другой.

Анализ влияния флуктуаций на погрешность измерения

Одним из основных источников шума в передающих системах является джиттер псевдослучайного импульсного сигнала. Джиттер — это фазовое дрожание псевдослучайного импульсно-модулированного сигнала, в результате которого появляются нежелательные фазовые или частотные отклонения передаваемого сигнала. Возникают такие отклонения вследствие нестабильности задающего генератора, изменений параметров линии передачи во времени и различной скорости распространения частотных составляющих одного и того же сигнала. Оценить фазовый шум импульсного сигнала позволяет глазковая диаграмма (рис. 3). Поскольку в качестве основы для эксперимента была использована ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема), дальнейшая её отладка была возможна в специальном программном обеспечении Vivado. Данная глазковая диаграмма была получена при выполнении тестовой проверки с целью оценки джиттера, длительности фронтов и других параметров.

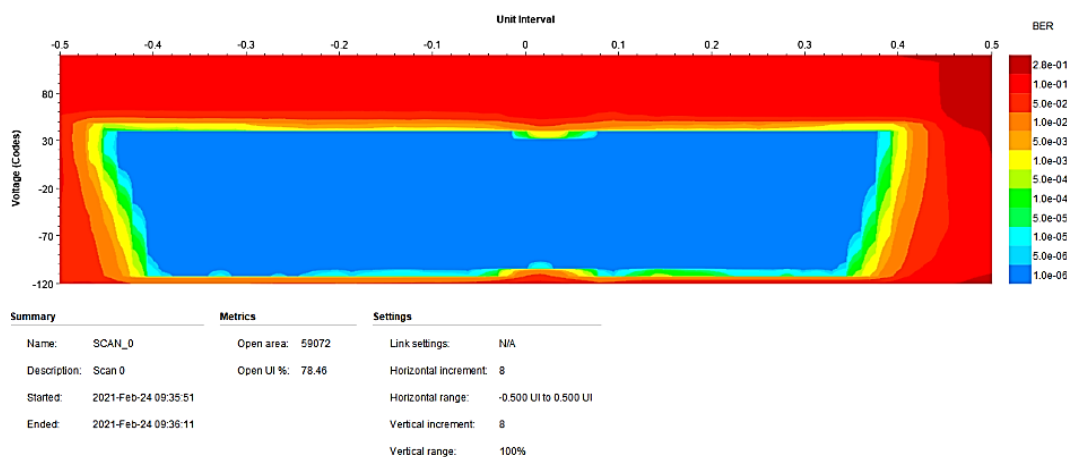


Рис. 3. Глазковая диаграмма псевдослучайной последовательности в программе Vivado

Помимо того, что на генерируемый сигнал влияет джиттер, для обработки сигнала необходимо учесть, что приёмник излучения (ПИ) имеет некоторое время накопления, что приведёт к математической модели сигнала и импульсного отклика ПИ в виде свёртки [3].

Для анализа одновременного влияния всех флуктуаций была сгенерирована модель прототипа на множестве реализаций (рис. 4). Как можно заметить, корреляционный метод устойчив к помехам, максимумы функций лежат в интервале $t_u \pm \Delta t$.

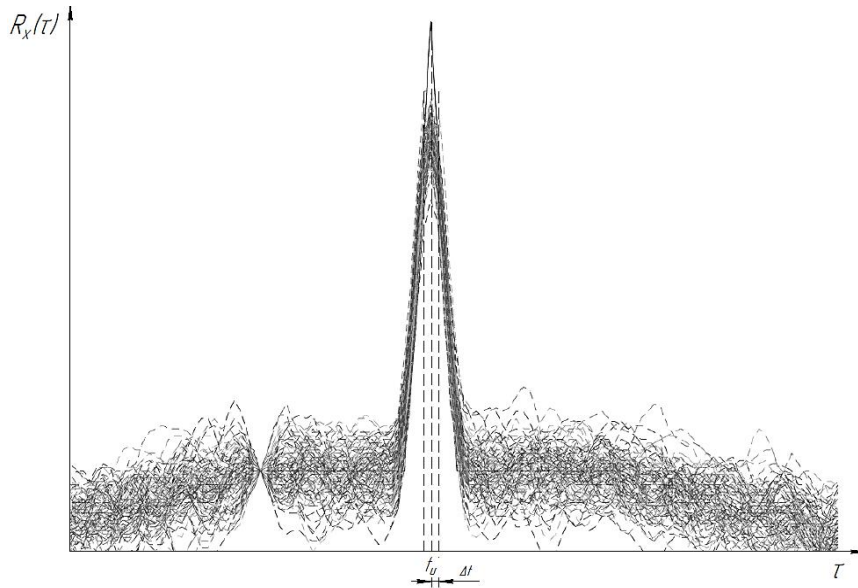


Рис. 4. Результат вычисления корреляционной функции множества реализаций

Таблица

Результаты определения погрешности измерения для $\tau_{\text{имп}} = 100$ пс

Период PRBS, T	Длительность фронта	Длительность джиттера	СКО δ_t , пс
2^7-1	$0,5 \cdot \tau_{\text{имп}}$	$0,2 \cdot \tau_{\text{имп}}$	3,2
2^7-1	$0,2 \cdot \tau_{\text{имп}}$	$0,1 \cdot \tau_{\text{имп}}$	1,8
$2^{11}-1$	$0,5 \cdot \tau_{\text{имп}}$	$0,2 \cdot \tau_{\text{имп}}$	1,1
$2^{11}-1$	$0,2 \cdot \tau_{\text{имп}}$	$0,1 \cdot \tau_{\text{имп}}$	0,4
$2^{15}-1$	$0,5 \cdot \tau_{\text{имп}}$	$0,2 \cdot \tau_{\text{имп}}$	0,05

Длительности фронтов и джиттера явно сказываются на погрешности измерений, но при изменении периода последовательности СКО δ_t существенно уменьшается. К примеру, при одинаковой длительности фронтов и джиттера, но при разных длительностях периода последовательности 2^7-1 и $2^{15}-1$ СКО δ_t уменьшается примерно в 64 раза.

Список литературы

1. Танцай П.И., Корниенко В.Г. Экспериментальные исследования точности синхронизации шкал времени в пространственно разнесённых пунктах методом запросной радиолокации // Доклады ТУСУР. — 2008. — № 2 (18). — Ч. 2. — С. 25–31.
2. Садовников М.А., Сумерин В.В., Шаргородский В.Д. Односторонняя лазерная дальнометрия и её применение в задачах повышения точности частотно-временного обеспечения ГЛОНАСС // International Technical Workshop WPLTN-2012. — СПб., 2012. — С. 18.
3. Зверев В.А., Стромков А.А. Выделение сигналов из помех численными методами. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2001. — 188 с.
4. Пат. RU № 2720268С1, МПК G01С3/08. Лазерный дальномер / Блинов И.Ю., Хатырев Н.П., Раков А.А. — Опубл. 28.04.2020.
5. Козинцев В.И., Белов М.Л. Основы импульсной лазерной локации: учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2006. — С. 510.

Статья поступила в редакцию: 27.09.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 01.10.2021 г.

Статья принята в работу: 04.10.2021 г.