

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ РАЗНЕСЕННЫХ НАЗЕМНЫХ ПУНКТОВ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

**Р. Б. Ковалев<sup>1</sup>, В. В. Корниенко<sup>2</sup>, В. Н. Ратушняк<sup>3</sup>** ✉

<sup>1</sup> АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»,  
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

<sup>2</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
г. Томск, Российская Федерация

<sup>3</sup> Сибирский федеральный университет,  
г. Красноярск, Российская Федерация

Значительное число патентов и публикаций в открытой печати показывает на сегодняшний день интенсивность проводимых исследований по созданию новых методов синхронизации и специализированной наземной аппаратуры частотно-временной синхронизации. В статье рассматривается реализация автономной системы синхронизации между наземными пунктами спутниковой связи, которая применяется в условиях неблагоприятного приема или отсутствия сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Представлены исследования по оценке погрешности временной синхронизации территориально разнесенных наземных пунктов спутниковой связи. Рассмотрены основы построения приемной аппаратуры радиотехнической системы и произведен расчет взаимной корреляции опорного сигнала приемной аппаратуры и принятого входного сигнала синхронизации. Приведены результаты натурных испытаний аппаратуры взаимной синхронизации, где определялась потенциальная точность синхронизации оборудования на наземных объектах с заранее неизвестными координатами, при этом аппаратура синхронизации обеспечивала измерение времени распространения сигнала с одного наземного объекта к другому с формированием универсальных шкал времени на пунктах. Способ взаимной синхронизации связанных пунктов осуществляется дуплексным методом на частоте 1065 МГц (запрос) и 625 МГц (ответ) фазокодоманипулируемыми сигналами с базой, равной 1023 и длительностью 0,1 мкс.

*Ключевые слова:* наземный пункт, шкала времени, система синхронизации, высокостабильная опорная частота, погрешность шкалы времени.

### Введение

Возможность выполнять высокоточные измерения координат объектов и осуществлять синхронизацию шкал времени с помощью ГЛОНАСС в любой точке земного шара не исключает возможности использования в наземных пунктах спутниковой связи автономных навигационных средств и средств синхронизации. Необходимость этого обусловлена тем, что в тех или иных районах земной поверхности точностные характеристики ГЛОНАСС в значительной степени ослабевают и снижаются до минимального уровня [1–6]. Причинами этого может быть неблагоприятный геометрический фактор, ограничения радиови-

димости космических аппаратов, неполнота сети и масса других обстоятельств. Особенно это касается северных и арктических территорий Российской Федерации. Однако потребители навигационного сигнала, в том числе и наземные пункты спутниковых систем связи, предъявляют все более высокие требования к доступности и надежности данных о местоположении и системной шкале времени. На сегодняшний день глубина проработки вопросов теории и возможных направлений решений задач синхронизации наземных пунктов систем спутниковой связи не соответствует запросам практики. Указанные задачи являются актуальными и полностью согласуются с принятой в России концепцией Единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения. Вопросам синхронизаций радиотехнических систем посвящены исследования и работы

✉ oborona-81@yandex.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2021

таких авторов как А. Д. Аргунова, С. Н. Малюкова, В. Г. Боровицкого и др. [7].

## 1. Оценка погрешности синхронизации приемной аппаратуры наземных пунктов спутниковой связи

Система временной синхронизации является важной частью мультипозиционных активных или пассивных наземных радиотехнических систем. Погрешность временной синхронизации наземных объектов должна быть меньше, чем  $\sigma_i/c$ , где  $\sigma_i$  – ошибка измерения координат,  $c$  – скорость света. Например, ошибка синхронизации в масштабе времени должна быть меньше 10 нс для достижения ошибки измерения координат менее чем 10 метров. Такая высокая точность может быть обеспечена двухсторонней передачей сигналов синхронизации в диапазоне ультравысоких частот между разнесенными пунктами сети наземных станций спутниковой связи [8].

Шкала времени представляет собой двоичную последовательность, синхронизированную с опорным сигналом и формируемую на ведущем пункте. Опорный сигнал синхронизирует псевдослучайную  $m$ -последовательность с периодом 1023 знака и длительностью составляющего символа в 100 нс. Ультравысокочастотный (УВЧ) сигнал синхронизации представляет собой сдвинутый по фазе несущий УВЧ сигнал с частотой 1065 МГц, промодулированный с помощью псевдослучайного сигнала. Основная доля диапазона частот УВЧ сигнала составляет 20 МГц. Передатчик ведущего пункта излучает синхроимпульсы турникетной антенной, имеющей всенаправленную диаграмму направленности в горизонтальной плоскости. В периферийном (ведомом) пункте  $m$ -последовательность синхронизируется с помощью сигнала, полученного от ведущего пункта и модулирует УВЧ несущий сигнал с частотой 625 МГц. Несущий сигнал с фазовым сдвигом излучается также изотропной антенной. Принятый сигнал синхронизирует  $m$ -последовательность приемника ведущего пункта. Синхроимпульсы переданных и полученных последовательностей формируют входные сигналы для измерителя временных интервалов.

В ходе проведения натуральных испытаний аппаратуры взаимной синхронизации определялась потенциальная точность синхронизации оборудования на наземных объектах с заранее неизвестными координатами, при этом аппаратура синхронизации обеспечивала измерение времени распространения сигнала с одного наземного объекта к другому и формировала универсальные шкалы времени на пунктах. Измеренная временная задержка состоит из двух частей. Первая составля-

ющая включает в себя аппаратную компоненту, и вторая связана с условиями распространения синхронизирующего сигнала.

Главные факторы сбоя счета времени распространения радиоволны для радиоканала, находящегося около поверхности Земли, – это непостоянность скорости радиоволн и рассеяние радиоволн, вызванное разнородностью рельефа. Уравнение для вычисления скорости радиоволны в пространстве с коэффициентом преломления  $n$  имеет вид:  $c = c_0/n$ , где  $c_0$  – скорость радиоволны для области свободного распространения.

Коэффициент преломления зависит от атмосферного давления, температуры и влажности воздуха. Уравнение для коэффициента преломления имеет вид:

$$n = 1 + N \cdot 10^{-6},$$

где  $N = 200...400$  для зон вблизи поверхности Земли.

Уравнение для временной задержки распространения радиоволны имеет вид [9]:

$$\tau_d = \frac{1}{c_0} \cdot \int_L n(s) dS, \quad (1)$$

где интегрирование выполнено для радиоканала, соответствующего минимальному времени распространения. Необходимо детально знать  $n$  как функцию координат для вычисления выражения (1). В большинстве случаев это является проблемой, потому что коэффициент преломления зависит от погодных условий и рельефа подстилающей поверхности. Если среднее значение  $N$  оценивается по погодным условиям для некоторой пространственной точки и среднее значение отклонений меньше, чем  $\Delta N$ , тогда используется выражение (1) для определения флуктуации времени распространения для радиоканала длиной  $L$ :

$$\Delta \tau_d = \frac{\Delta N \cdot L}{c_0}. \quad (2)$$

Следовательно,  $\frac{\Delta \tau_d}{\tau_d} = \Delta N$ , где  $\tau_d$  – время

для области свободного распространения.

Экспериментальная оценка разницы отклонений коэффициента преломления для приповерхностных радиоканалов в разных пространственных точках представлена в [9]. Измеряя температуру, атмосферное давление и влажность воздуха в одно время, средняя квадратичная разница ко-

эффициентов преломления  $\sigma_{\Delta N} = \sqrt{\Delta N^2}$  для пространственных точек протяженностью 103 км будет равна от 2 до 8,5. Экспериментальные измерения были сделаны для городов Кемерово и Томск. Для случая, когда  $\Delta \sigma_N = 10$ ,  $L = 40$  км, по-

грешность флуктуации времени распространения составит  $\sigma_{\tau_d} = 1,5$  нс. Таким образом, используя среднее значение можно определить зависимость времени распространения сигнала от отклонения скорости радиоволны.

## 2. Расчет погрешности синхронизации приемной аппаратуры наземных пунктов и экспериментальные результаты погрешности синхронизации разнесенных пунктов

Корреляционный приемник имеет  $m$ -последовательность такую же, как и передатчик. Для формирования сигнала временной ошибки между входным и опорным сигналами опорная  $m$ -последовательность имеет сдвиг во времени  $T_1/2$  или минус  $T_1/2$  для каждого периода последовательности, где  $T_1$  – длительность символа, составляющего последовательность;  $\tau$  – дискрета временного сдвига, управляющая электронным коммутатором. Блок-схема корреляционного приемника в упрощенном виде изображена на рис. 1.

Пусть

$$x(t) = a \cdot u_0(t) + u_s(t) + n(t) = \operatorname{Re} x(t) \cdot e^{j\omega_0 t},$$

где  $a \cdot u_0(t)$  – полезный сигнал;  $u_s(t)$  – сигнал, рассеянный рельефом;  $n(t)$  – собственный шум приемника.

Комплексный вид полезного сигнала:

$$\begin{aligned} a \cdot u_0(t) &= a \cdot \operatorname{Re} A(t) \cdot e^{j\varphi(t)} \cdot e^{j\omega_0 t} = \\ &= a \cdot \operatorname{Re} U(t) \cdot e^{j\omega_0 t}, \end{aligned} \quad (3)$$

где уравнение для полезной интегральной амплитуды сигнала:

$$U(t) = \sum_{i=1}^N U_{0i} (t - (i-1) \cdot T_1)^*,$$

$$U_{0i} = \pm 1.$$

Суммарная корреляция входного сигнала и опорной  $m$ -последовательности выполняется множителем функции, узкополосным фильтром

и амплитудным детектором. Выражение для расчета величины напряжения выходного сигнала на выходе схемы вычитания имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} u_{discr}(\tau) &= \int_0^T x(t-\tau) \cdot U_0(t - \frac{T_1}{2}) dt - \\ &- \int_0^T x(t+T-\tau) \cdot U_0(t + \frac{T_1}{2}) dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Так как  $m$ -последовательность периодическая, можно выполнить преобразование (4):

$$\begin{aligned} u_{discr}(\tau) &= \int_0^T x(t-\tau) \cdot U_0(t + \frac{T_1}{2}) dt - \\ &- \int_0^T x(t+T-\tau) \cdot U_0(t + \frac{T_1}{2}) dt. \end{aligned} \quad (5)$$

При условии отсутствия рассеяния сигнала синхронизации подстилающей поверхностью и пренебрежительно малого уровня собственных шумов приемной аппаратуры:

$$\begin{aligned} u_{discr}(\tau) &= a_0 \cdot \int_0^T U_0(t-\tau) \cdot U_0(t - \frac{T_1}{2}) dt - \\ &- a_0 \cdot \int_0^T U_0(t-\tau) \cdot U_0(t + \frac{T_1}{2}) dt + \\ &+ a_1 \cdot \int_0^T U_0(t-\tau_1-\tau) \cdot U_0(t - \frac{T_1}{2}) dt - \\ &- a_1 \cdot \int_0^T U_0(t-\tau_1-\tau) \cdot U_0(t + \frac{T_1}{2}) dt = \\ &= a_0 \cdot \left[ K(\tau - \frac{T_1}{2}) - K(\tau + \frac{T_1}{2}) \right] + \\ &+ a_1 \cdot \left[ K(\tau + \tau_1 - \frac{T_1}{2}) - K(\tau + \tau_1 + \frac{T_1}{2}) \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где  $K(\tau)$  – автокорреляционная функция  $m$ -последовательности.

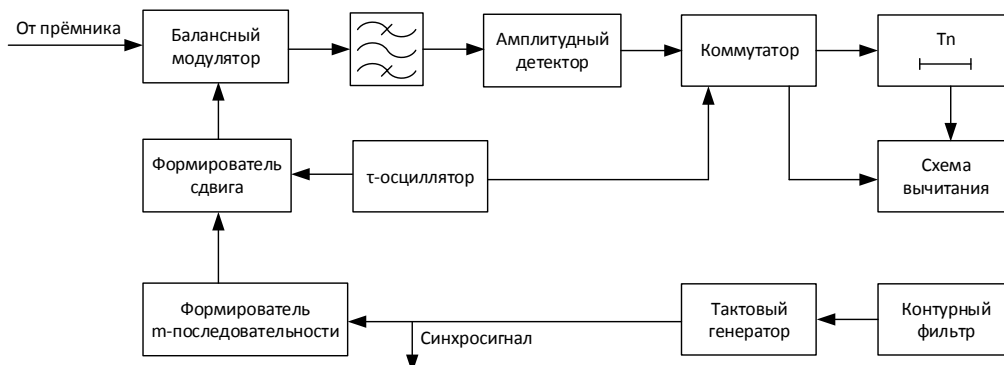


Рис. 1. Блок-схема корреляционного приемника

На рис. 2 представлена корреляционная функция и характеристика временного дискриминатора. Характеристика линейная если  $|\tau| < \frac{T_1}{2}$ , тогда:

$$u_{discr}(\tau) = \frac{2a_0\tau}{T_1}. \tag{7}$$

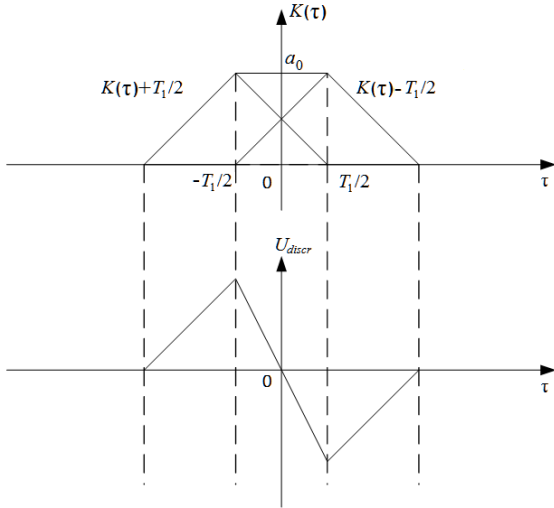


Рис. 2. Характеристика временного дискриминатора

Максимальное значение напряжения на выходе временного дискриминатора соответствует корреляции во времени входа и опорной  $m$ -последовательности в условиях без помех. Если отсутствуют собственные шумы приемника, но присутствует рассеяние сигнала из-за рельефа, тогда используется уравнение (5):

$$u_{discr}(\tau) = a_0 \cdot \int_0^T U_0(t-\tau) \cdot U_0(t-\frac{T_1}{2}) dt - a_0 \cdot \int_0^T U_0(t+T-\tau) \cdot U_0(t+\frac{T_1}{2}) dt + \int_0^T U_0(t-\tau) \cdot U_0(t-\frac{T_1}{2}) dt - \int_0^T U_0(t+T-\tau) \cdot U_0(t+\frac{T_1}{2}) dt. \tag{8}$$

Сбой счета времени зависит от статистических данных рассеянного сигнала и динамических характеристик следящей системы.

В общем виде, рассеянный сигнал представляет собой сумму отраженных лучей [3; 4; 11]:

$$u_s(t) = \sum_{i=1}^N a_i u_0(t-\tau_i), \tag{9}$$

где  $a_i$  – коэффициент амплитуды,  $\tau_i$  – разница во времени распространения полезного и отраженного сигналов.

Форма сигнала  $u_s(t)$  зависит от пути распространения сигнала, высоты антенн, диаграммы направленности антенн ведущего и периферийных (ведомых) пунктов. Согласно условиям сумма отраженных сигналов (9) может варьироваться от нуля до значения верхней границы. Как правило, сигнал  $u_s(t)$  является стационарным случайным процессом.

Для операционного анализа следящей системы наиболее интересными являются отраженные сигналы с задержками относительно прямого меньшими, чем ширина дискриминационной характеристики схемы слежения за задержкой. Допустим только отраженный сигнал с коэффициентом амплитуды  $a_1$ , временем задержки  $\tau_1 < T_1$  и фазовым сдвигом несущей частоты  $\varphi_1 = 0$ .

Следовательно, принимая во внимание выражение (7):

$$u_{discr}(\tau) = \frac{2a_0}{T_1} \tau + \frac{2a_1}{T_1} (\tau + \tau_1), \tag{10}$$

$$|\tau| < \frac{T_1}{2}, \quad |\tau - \tau_1| < \frac{T_1}{2}.$$

Пусть  $\frac{a_1}{a_0} = K_1$ , тогда, исходя из выраже-

ния (10), ошибка схемы слежения в установившемся режиме, вызванная отраженным сигналом, описывается следующим выражением:

$$\tau = -\frac{\tau_1 \cdot K_1}{1 + K_1}, \quad |\tau| < \frac{T_1}{2}. \tag{11}$$

Знак « $\leftrightarrow$ » в правой части уравнения означает задержку опорной последовательности относительно входного полезного сигнала.

Если количество отраженных сигналов  $N$ , тогда выражение (11) преобразуется:

$$\tau = -\frac{\sum_{i=1}^N \tau_i \cdot K_i}{1 + \sum_{i=1}^N K_i}, \quad \text{при } |\tau| < \frac{T_1}{2}. \tag{12}$$

Таким образом, точность синхронизации зависит от разности фаз прямого и отраженного сигналов. Каждый входной сигнал формирует гармонические колебания на входе детектора, амплитуды гармонических колебаний пропорциональны функции взаимной корреляции комплексной огибающей входного сигнала и опорной  $m$ -последовательности (рис. 1). Пусть на входе приемника будет три сигнала: прямой сигнал и два отраженных сигнала. Функция взаимной корреляции общего входного сигнала и основной последовательности вычисляется как:

$$K_{\Sigma}(\tau) = \sqrt{(K_0(\tau) + K_1(\tau) \cos \varphi_1 + K_2(\tau) \cos \varphi_2)^2 + (K_1(\tau) \sin \varphi_1 + K_2(\tau) \sin \varphi_2)^2},$$

где  $K_1(\tau)$  – функция взаимной корреляции опорного и прямого сигналов;  $K_2(\tau)$  – функция взаимной корреляции опорного сигнала и второго отражения сигнала;  $\tau_1$  – разница распространения радиоволны первого отражения сигнала и прямого сигнала;  $\tau_2$  – разница распространения радиоволны второго отражения сигнала и прямого сигнала;  $\varphi_1$  – фаза первого отражения сигнала;  $\varphi_2$  – фаза второго отражения сигнала.

Для формирования  $m$ -последовательности длиной в 1023 знака необходимо смоделировать 10-битный регистр сдвига с обратными связями. Каждый знак  $m$ -последовательности состоит из 20 дискретных значений. Число дискретных значений определяет точность моделирования  $100/20 = 5$  нс. Входной сигнал состоит из прямого сигнала и только первого отражения. В режиме поиска следящей системы синхронизации определяется максимум корреляционной функции и фиксируется время максимума корреляционной функции. В режиме автосопровождения сравниваются

значения  $K_{\Sigma}(\tau - 50)$  и  $K_{\Sigma}(\tau + 50)$ . В зависимости от результата сравнения выполняется увеличение на 1 или уменьшение на 1 значения  $\tau$  до тех пор, пока  $K_{\Sigma}(\tau - 50)$  не станет равно  $K_{\Sigma}(\tau)$ . Результаты моделирования для отраженных сигналов с различными параметрами показаны на рис. 3 и 4.

106

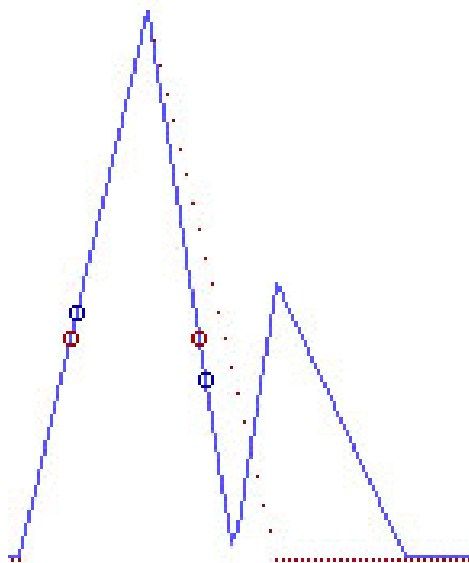


Рис. 3. Функция взаимной корреляции входного и опорного сигналов  $k_1 = a_1/a_0$ ,  $a_2 = 0$ ,  $\tau_2 = 100$  нс,  $\varphi_1 = \pi$ ,  $\Delta t = 10$  нс

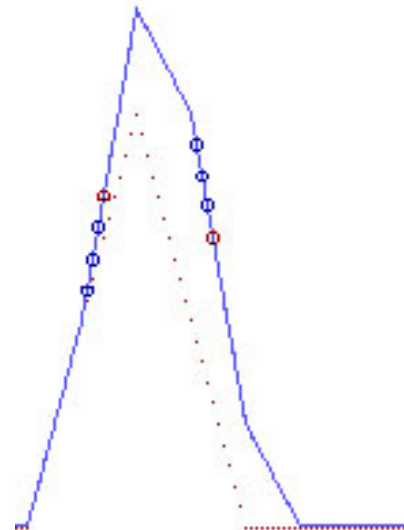


Рис. 4. Функция взаимной корреляции входного и опорного сигналов  $k_1 = a_1/a_0$ ,  $a_2 = 0$ ,  $\tau_2 = 50$  нс,  $\varphi_1 = 0$ ,  $\Delta t = 17$  нс

Пунктирной линией отображена функция взаимной корреляции опорного сигнала и входного сигнала в условиях отсутствия рассеяния синхронизирующего сигнала. Точки на графике обозначают работу следящей системы в режиме автосопровождения. Погрешность синхронизации приемной аппаратуры наземных пунктов спутниковой связи по результатам моделирования составила менее 5 нс. По результатам экспериментальных испытаний двух наземных пунктов максимальная погрешность синхронизации составила до 60 нс. Результаты измеренных значений задержки синхронизирующего сигнала и погрешность системы синхронизации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных испытаний

Номер радиоканала	Измеренная задержка, нс	Средне-квадратичное значение, нс	Реальная задержка, нс	Данные системы синхронизации, м	GPS данные, м	Измеренная ошибка, м
1	54710,02	0,80	54411,48	8167,13	8154,38	4,14
2	72649,50	2,85	72330,76	10853,96	10839,55	5,81
3	55128,19	1,53	54662,89	8204,82	8191,09	5,13
4	55217,42	1,68	54752,12	8218,20	8187,03	11,57
5	55222,40	0,49	54724,04	8213,99	8187,03	18,36

Окончание таблицы 1

6	55222,10	0,54	54723,67	8213,94	8187,03	18,30
7	55226,30	2,03	54727,9	8214,58	8187,03	18,94
8	55232,09	3,70	54733,69	8215,44	8187,03	19,81
9	55239,52	1,98	54741,12	8216,55	8187,03	20,92
10	55239,53	1,10	54741,13	8216,55	8187,03	20,92
11	55236,57	0,96	54738,17	8216,11	8187,03	20,48
12	55236,52	0,89	54738,12	8216,10	8187,03	20,47

В шестом столбце представлен массив данных, полученных ГНСС-приемником Ashtech с паспортной точностью менее 1 м. В седьмом столбце представлены разности расстояний, которые были вычислены с помощью времени распространения радиоволн и данных GPS. Временные зависимости задержек, осредненных на минутном интервале распространения радиоволн для двух разных радиоканалов, показаны на рис. 5 и 6.

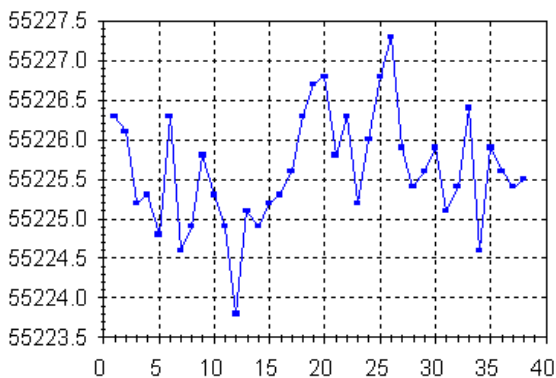


Рис. 5. Временная задержка распространения радиоволны для радиоканала 7

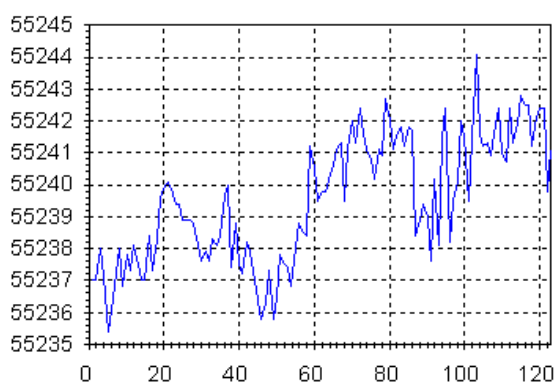


Рис. 6. Временная задержка распространения радиоволны для радиоканала 8

### Заключение

Таким образом, по результатам экспериментальных испытаний взаимной синхронизации разнесенных пунктов можно сделать следующие выводы:

1. Временная ошибка для двух наземных пунктов систем спутниковой связи состоит из:
  - динамических отклонений (до 3,7 нс);
  - медленных отклонений (до 8 нс);
  - систематической погрешности синхронизации (до 60 нс).

2. Временная погрешность составляет порядка 60 нс поверенного оборудования без дополнительной коррекции в условиях измеренных и допустимых сбоях оборудования.

3. Для минимизации временной ошибки необходимо делать дополнительную коррекцию. Значение дополнительной поправки может быть определено, например, с помощью сравнения времени распространения радиоволны от одного наземного пункта систем спутниковой связи к другому и данных GPS. В данном случае временная ошибка составила менее 8,8 нс, включая медленноменяющуюся и динамическую составляющие.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ходе реализации комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства земных станций перспективных систем спутниковой связи для обеспечения связности труднодоступных, северных и Арктических территорий Российской Федерации», осуществляемого при участии Сибирского федерального университета (соглашение № 075-11-2019-078 от 13.12.2019).

### Список литературы

[1] Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. В. Н. Харисова [и др.]. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.  
 [2] Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Ratuschnyuk V. N. Development of a device for monitoring and tuning radio-technical parameters of a satellite communications Earth station // Journal of Physics. 2020. vol. 1661. issue 1.

- [3] Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М. : Радио и связь, 1981. 416 с.
- [4] Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. М. : Радио и связь, 1993. 320 с.
- [5] Гарин Е. Н., Копылов В. А., Ратушняк В. Н., Лютиков И. В. Современное развитие ГНСС ГЛОНАСС и GPS // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 11. № 3. С. 313–317.
- [6] Тяпкин В. Н., Фатеев Ю. Л., Дмитриев Д. Д., Гарин Е. Н., Ратушняк В. Н. Создание помехозащищенных навигационных приемников, способных измерять пространственную ориентацию объектов // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 5. С. 61–65.
- [7] Аргунов А. Д., Малюков С. Н., Ляшко В. Н., Бабайкин Б. Ф. Система передачи информации, использующая навигационный сигнал ИФРНС // Сб. трудов НТК «Планирование глобальной радионавигации». НТЦ «Интернавигация». 1997.
- [8] Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС : монография. Красноярск : Сиб. федер. университет, 2012. 260 с.
- [9] Winkler G. M. Path Delay, Its Variations, and Some Implications for the Field Use of Precise Frequency Division // Proceeding of IEEE. 1972. vol. 60. no. 5.
- [10] Киселев О. Н. Статистика неоднородностей коэффициента преломления в приземном слое атмосферы // 9 Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов. Ч. 1. Харьков. 1969.
- [11] Turin G. L. Introduction to Spread – Spectrum Antimultipath Techniques and Their Application to Urban Digital Radio // Proceedings of IEEE. 1980. vol. 68. no. 3. p. 30.

## ESTIMATION OF THE SYNCHRONIZATION ERROR FOR SPACED-APART GROUND POINTS OF SATELLITE COMMUNICATION

**R. B. Kovalev<sup>1</sup>, V. V. Kornienko<sup>2</sup>, V. N. Ratushnik<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,  
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

<sup>2</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
Tomsk, Russian Federation

<sup>3</sup> Siberian Federal University,  
Krasnoyarsk, Russian Federation

*A significant number of patents and publications in the open press show the intensity of the ongoing research to create new methods of synchronization and specialized ground-based equipment for frequency-time synchronization. The article considers the implementation of an autonomous synchronization system between ground-based satellite communication points, which is used in conditions of unfavorable reception or absence of signals from global navigation satellite systems. The paper presents studies on the assessment of the error of time synchronization of geographically separated ground points of satellite communications. The basics of constructing the receiving equipment of a radio engineering system are considered and the mutual correlation of the reference signal of the receiving equipment and the received input synchronization signal is calculated. The results of field tests of mutual synchronization equipment are presented, where the potential synchronization accuracy of equipment at ground objects with previously unknown coordinates was determined, while the synchronization equipment provided measurement of the signal propagation time from one ground object to another with the formation of universal time scales on points. The method of mutual synchronization of linked points is carried out by the duplex method at a frequency of 1065 MHz (request) and 625 MHz (response) by phase-code-manipulated signals with a base equal to 1023 and a duration of 0,1 μs.*

*Keywords: ground station, time scale, synchronization system, highly stable reference frequency, time scale error.*

## References

- [1] Kharisov V. N., Perov A. I., Boldin V. A. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funkcionirovaniya* [GLONASS. Construction principles and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 800 p. (In Russian)
- [2] Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Ratuschnyay V. N. Development of a device for monitoring and tuning radio-technical parameters of a satellite communications Earth station // *Journal of Physics*, 2020, vol. 1661, issue 1.
- [3] Shirman Ya. D., Manzhos V. N. *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomekh* [Theory and technique of processing radar information against the background of interference]. Moscow, Radio and communication, 1981, 416 p. (In Russian)
- [4] Farina A., Studer F. *Cifrovaya obrabotka radiolokacionnoj informacii* [Digital processing of radar information]. Moscow, Radio and communication, 1993, 320 p. (In Russian)
- [5] Garin E. N., Kopylov V. A., Ratuschnyay V. N., Lyutikov I. V. *Sovremennoe razvitie GNSS GLONASS i GPS* [Modern development of GNSS GLONASS and GPS] // *Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and technology*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 313–317. (In Russian)
- [6] Tyapkin V. N., Fateev Yu. L., Dmitriev D. D., Garin E. N., Ratuschnyay V. N. *Sozdanie pomexkhozashchishchennykh navigacionnykh priemnikov, sposobnykh izmeryat' prostranstvennyuyu orientaciyu ob"ektov* [Creation of noise-immune navigation receivers capable of measuring the spatial orientation of objects] // *Achievements of Modern Radioelectronics*, 2014, no. 5, pp. 61–65. (In Russian)
- [7] Argunov A. D., Malyukov S. N., Lyashko V. N., Babaikin B. F. *Sistema peredachi informacii, ispol'zuyushchaya navigacionnyy signal IFRNS* [Information transmission system using the IFRNS navigation signal] // *Proceedings «Global Radio Navigation Planning»*, Moscow, 1997. (In Russian)
- [8] Tyapkin V. N., Garin E. N. *Metody opredeleniya navigacionnykh parametrov podvizhnykh sredstv s ispol'zovaniem sputnikovoj radionavigacionnoj sistemy GLONASS* [Methods for determining the navigation parameters of mobile facilities using the GLONASS satellite radio navigation system]. Krasnoyarsk, SibFU, 2012, 260 p. (In Russian)
- [9] Winkler G. M. Path Delay, Its Variations, and Some Implications for the Field Use of Precise Frequency Division // *Proceeding of IEEE*, 1972, vol. 60, no. 5.
- [10] Kiselev O. N. *Statistika neodnorodnostej koefficienta prelomleniya v prizemnom sloe atmosfery* [Statistics of inhomogeneities of the refractive index in the surface layer of the atmosphere] // 9 All-Union conference on the propagation of radio waves. Abstracts of reports, Part 1, Kharkov, 1969. (In Russian)
- [11] Turin G. L. Introduction to Spread – Spectrum Antimultipath Techniques and Their Application to Urban Digital Radio // *Proceedings of IEEE*, 1980, vol. 68, no. 3, p. 30.

## Сведения об авторах

*Ковалев Роман Борисович* – начальник группы размещения измерительных наземных станций ГЛОНАСС АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Область научных интересов: синхронизация наземных станций по сигналам ГНСС.

*Корниенко Владимир Владимирович* – инженер измерительной лаборатории Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

*Ратушняк Василий Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры АСУ Военного учебного центра при Сибирском федеральном университете. Область научных интересов: радионавигация по сигналам ГНСС и наземных РНС, наземная радиолокация.