

Синхронизация временных интервалов в канале связи с многопутевым распространением сигналов

Дегтярев А. Н., Мирянова В. Н.

*Институт радиоэлектроники и информационной безопасности,
Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
1mvp1@mail.ru*

Статья поступила 22 декабря 2016 г.

Аннотация: Показано, что необходимость синхронизации по частоте и времени приемника и передатчика системы передачи информации с ортогональными сигналами возникает вследствие представления сигналов тригонометрическими рядами Фурье. Предлагается передавать информацию сигналами, которые получены в результате смещения импульсной характеристики каналоформирующего оборудования на кратные интервалы времени. Рассмотрен алгоритм, позволяющий определить время запаздывания полезного сигнала относительно опорного колебания. Разработана структурная схема устройства синхронизации, реализующего указанный алгоритм. Предложен способ определения времени поступления на вход приемника полезного и отраженного сигналов, позволяющий снизить влияние многопутевого распространения сигнала на устройство синхронизации.

Ключевые слова: квазиортогональные функции, вес ортогональности, импульсная характеристика, синхронизация.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Дегтярев А. Н., Мирянова В. Н. Синхронизация временных интервалов в канале связи с многопутевым распространением сигналов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2018. Т. 1, № 2. С. 197—206.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Дегтярев, А. Н. Синхронизация временных интервалов в канале связи с многопутевым распространением сигналов / А. Н. Дегтярев, В. Н. Мирянова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2018. — Т. 1, № 2. — С. 197—206.

Synchronization of the time intervals in the communication channel with multipath spreading of signals

A. N. Degtyarev and V. N. Miryanova

*Institute of Radio Electronics and Information Security,
Sevastopol State University*

*33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
Imvn1@mail.ru*

Received on December 22, 2016

Abstract: *It is shown that the need for synchronization in frequency and time of the transmitter and receiver data transmission system with orthogonal signals is caused by signal representation by trigonometric Fourier series. It is suggested to transmit data by means of the signals, which are obtained as a result of displacement of the impulse response of the channel-forming equipment at multiple intervals. The algorithm, which allows determining the time delay of the required signal relative to the reference oscillation, is considered. The block diagram of the synchronization device, that implements the algorithm, has been worked out. The method of determining the arrival time of useful and reflected signals to the receiver input, which used to reduce the influence of multipath propagation of the signal on the synchronization device, has been worked out.*

Keywords: *quasi-orthogonal functions, orthogonal weight, impulse characteristic, synchronization.*

For citation (IEEE): A. N. Degtyarev and V. N. Miryanova, “Synchronization of the time intervals in the communication channel with a multipath spread of signals,” *Informations and Radio Technologies*, vol. 1, no. 2, pp. 197–206, 2016. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2018.01.2.15

1. Введение

Одной из задач, которую необходимо решать при приеме информации, передаваемой с помощью ортогональных сигналов, является установление синхронизации между модулятором передатчика и демодулятором приемника.

В настоящее время для решения этой задачи в системах передачи информации используются два уровня синхронизации: синхронизация по частоте и синхронизация по времени.

Синхронизацию несущего и опорного колебаний по частоте совмещают с синхронизацией по фазе, добиваясь когерентности этих колебаний.

Синхронизация по времени позволяет определять временные метки начала кадров сообщения, а также синхронизировать тактовые колебания передатчика и приемника.

Использование всех указанных уровней синхронизации приводит к усложнению систем передачи информации на аппаратном уровне и к необходимости создания достаточно громоздких протоколов обмена информацией на сигнальном уровне. Следовательно, повышается стоимость оборудования и снижается скорость передачи информации.

Причиной, лежащей в основе такого подхода к синхронизации, является представление сигналов с помощью тригонометрических рядов Фурье. Так, несущее и опорное колебания представляются тригонометрическими функциями со своими частотами и начальными фазами. Кроме того, все виды модуляции, позволяющие передавать информацию и выделять временные метки кадров сообщения и тактовые колебания, связаны с изменением параметров подобных колебаний.

В работе [1] предлагается передавать информацию сигналами, которые получены в результате смещения импульсной характеристики каналоформирующего оборудования на кратные интервалы времени. Из подобных сигналов можно составить базис, ортогональный с вычисляемым весом.

В работе [1] разработаны структурные схемы модулятора и демодулятора двумерных сигналов, сформированных с помощью полученного ортогонального базиса.

Целью настоящего доклада является обоснование устройства синхронизации, предназначенного для работы в составе системы связи, описанной в работе [1]. Кроме того, с целью снижения влияния на устройство синхронизации многопутевого распространения сигнала, необходимо обосновать метод, позволяющий определить времена поступления на вход приемника полезного и отраженного сигналов.

2. Устройство синхронизации системы передачи информации

Будем считать, что каналоформирующее оборудование системы передачи информации с частотным разделением абонентов является линейным каузальным устройством. Импульсная характеристика такого устройства описывается как

$$g(t) = 1(t) \sum_n A_n e^{\sigma_n t} \sin(\omega_n t + \psi_n),$$

где $1(t)$ — функция Хевисайда.

Сигнал, подлежащий передаче, имеет вид

$$s(t) = \sum_m g(t - m\alpha) x_m,$$

где x_m — информационный коэффициент.

На вход приемника полезный сигнал $s(t)$ поступает с некоторой неизвестной задержкой t_3 , причем

$$\begin{aligned} s(t-t_3) &= \sum_m x_m g(t-m\alpha-t_3) = \sum_m x_m 1(t-m\alpha-t_3) \sum_n A_n e^{\sigma_n(t-m\alpha-t_3)} \times \\ &\times \sin[\omega_n(t-m\alpha) + \psi_n - t_3 \omega_n] = \sum_m x_m 1(t-m\alpha-t_3) \sum_n A_n e^{\sigma_n(t-m\alpha)} e^{-\sigma_n t_3} \times \\ &\times \{ \sin[\omega_n(t-m\alpha) + \psi_n] \cos \omega_n t_3 - \cos[\omega_n(t-m\alpha) + \psi_n] \sin \omega_n t_3 \} = \\ &= \sum_m x_m 1(t-m\alpha-t_3) \sum_n A_n e^{\sigma_n(t-m\alpha)} e^{-\sigma_n t_3} \cos \omega_n t_3 \sin[\omega_n(t-m\alpha) + \psi_n] - \\ &\quad - \sum_m x_m \sum_n A_n e^{\sigma_n(t-m\alpha)} e^{-\sigma_n t_3} \sin \omega_n t_3 \cos[\omega_n(t-m\alpha) + \psi_n]. \end{aligned} \quad (1)$$

Введем обозначения

$$f_{ns}(m, t) = 1(t-m\alpha-t_3) e^{\sigma_n(t-m\alpha)} \sin[\omega_n(t-m\alpha) + \psi_n],$$

$$f_{nc}(m, t) = 1(t-m\alpha-t_3) e^{\sigma_n(t-m\alpha)} \cos[\omega_n(t-m\alpha) + \psi_n],$$

и перепишем (1) в виде

$$\begin{aligned} s(t-t_3) &= \sum_m x_m \sum_n A_n f_{ns}(m, t) e^{-\sigma_n t_3} \cos \omega_n t_3 - \\ &\quad - \sum_m x_m \sum_n A_n f_{nc}(m, t) e^{-\sigma_n t_3} \sin \omega_n t_3. \end{aligned}$$

Согласно методике, изложенной в работе [1], определим вес ортогональности $h(t)$ системы функций, составленной из всех функций $f_{ns}(m, t)$, $f_{nc}(m, t)$ такой, что выполняются условия

$$\left\{ \begin{aligned} \int_{m\alpha}^{(m+1)\alpha} f_{ns}(m, t) f_{ks}(l, t) h(t) dt &= \begin{cases} 1, & n = k \text{ и } m = l, \\ 0, & n \neq k \text{ и } m = l, \\ 0, & n = k \text{ и } m \neq l, \\ 0, & n \neq k \text{ и } m \neq l, \end{cases} \\ \int_{m\alpha}^{(m+1)\alpha} f_{nc}(m, t) f_{kc}(l, t) h(t) dt &= \begin{cases} 1, & n = k \text{ и } m = l, \\ 0, & n \neq k \text{ и } m = l, \\ 0, & n = k \text{ и } m \neq l, \\ 0, & n \neq k \text{ и } m \neq l, \end{cases} \\ \int_{m\alpha}^{(m+1)\alpha} f_{nc}(m, t) f_{ks}(l, t) h(t) dt &= 0, \quad \forall n, m, l \end{aligned} \right. \quad (2)$$

С учетом условий (2) получаем

$$\int_{m\alpha}^{(m+1)\alpha} s(t-t_3) f_{ns}(m,t) h(t) dt = x_m A_n e^{-\sigma_n t_3} \cos \omega_n t_3 = \lambda_c,$$

$$\int_{m\alpha}^{(m+1)\alpha} s(t-t_3) f_{nc}(m,t) h(t) dt = x_m A_n e^{-\sigma_n t_3} \sin \omega_n t_3 = \lambda_s. \quad (3)$$

Найдем отношение λ_s к λ_c :

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_c} = tg \omega_n t_3. \quad (4)$$

При малых значениях $\omega_n t_3$ можно записать

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_c} = \omega_n t_3. \quad (5)$$

Условия (2) и алгоритм, описываемый выражениями (3), (4), (5), позволяют определить время рассогласования приемника и передатчика t_3 .

Структурная схема устройства синхронизации, реализующего описанный алгоритм, показана на рис. 1.

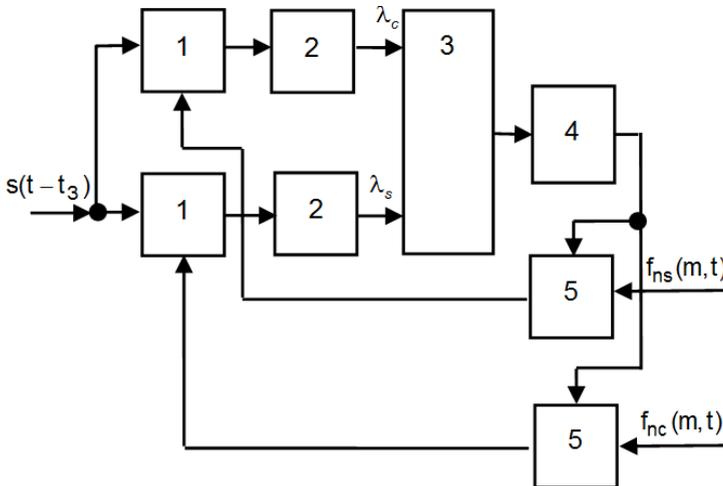


Рис. 1. Структурная схема устройства синхронизации
 (1 — множитель, 2 — интегратор со сбросом, 3 — решающее устройство, 4 — решающее устройство, 5 — управляемая линия задержки).

Fig. 1. The structural diagram of the synchronization device
 (1 – multiplier, 2 – integrator with reset, 3 – solver, 4 – solver, 5 – controlled delay line)

3. Определение временных меток в канале связи с многопутевым распространением сигналов

Пусть импульсная характеристика канала связи имеет вид

$$g(t) = \sum_n A_n e^{\sigma_n t} \sin(\omega_n t + \psi_n),$$

где $p_n = \sigma_n + j\omega_n$ — корни характеристического уравнения канала связи.

Передаваемый полезный сигнал запишем в виде ряда

$$s(t) = \sum_m g(t - m\alpha) x_m,$$

где x_m — коэффициенты, связанные с передаваемой информацией (если рассматривается импульсно-кодовая модуляция), α — период следования информационных символов $g_m(t) = g(t - m\alpha)$.

Полезный сигнал, принимаемый приемником, поступает на вход коррелятора с запаздыванием на время t_{32} относительно начала опорных базисных функций коррелятора:

$$\begin{aligned} s(t - t_{32}) &= \sum_m x_m \sum_n A_n e^{\sigma_n(t - t_{32} - m\alpha)} \sin[\omega_n(t - t_{32} - m\alpha) + \psi_n] = \\ &= \sum_m x_m \sum_n A_n e^{\sigma_n(t - m\alpha)} \sin[\omega_n(t - m\alpha) + \psi_n] e^{-\sigma_n t_{32}} \cos \omega_n t_{32} - \\ &- \sum_m x_m \sum_n A_n e^{\sigma_n(t - m\alpha)} \cos[\omega_n(t - m\alpha) + \psi_n] e^{-\sigma_n t_{32}} \sin \omega_n t_{32}. \end{aligned}$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned} f_{sn}(m, t) &= e^{\sigma_n(t - m\alpha)} \sin[\omega_n(t - m\alpha) + \psi_n], \\ f_{cn}(m, t) &= e^{\sigma_n(t - m\alpha)} \cos[\omega_n(t - m\alpha) + \psi_n] \end{aligned}$$

и запишем

$$\begin{aligned} s(t - t_{32}) &= \sum_m x_m \sum_n A_n f_{sn}(m, t) e^{-\sigma_n t_{32}} \cos \omega_n t_{32} - \\ &- \sum_m x_m \sum_n A_n f_{cn}(m, t) e^{-\sigma_n t_{32}} \sin \omega_n t_{32}. \end{aligned}$$

Отраженный сигнал имеет вид

$$\begin{aligned} \eta(t - t_{31}) &= \sum_m \xi_m g(t - m\alpha - t_{31}) = \\ &= \sum_m \xi_m \sum_n A_n e^{\sigma_n(t - m\alpha)} \sin[\omega_n(t - m\alpha) + \psi_n] e^{-\sigma_n t_{31}} \cos \omega_n t_{31} - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_m \xi_m \sum_n A_n e^{\sigma_n(t-m\alpha)} \cos[\omega_n(t-m\alpha) + \psi_n] e^{-\sigma_n t_{31}} \sin \omega_n t_{31} = \\
 & = \sum_m \xi_m \sum_n A_n f_{sn}(m, t) e^{-\sigma_n t_{31}} \cos \omega_n t_{31} - \\
 & \quad - \sum_m \xi_m \sum_n A_n f_{cn}(m, t) e^{-\sigma_n t_{31}} \sin \omega_n t_{31}
 \end{aligned}$$

где ξ_m — символ, передаваемый ранее.

Вычислим вес ортогональности $h(t)$ системы функций, составленной из всех $f_{sn}(m, t)$ и $f_{cn}(m, t)$ в соответствии с методом, изложенным в работе [1].

Приемник определяет значения функционалов

$$\begin{aligned}
 \delta_{n\cos} &= \int_{m\alpha}^{(m+1)\alpha} \{s(t-t_{32}) + \eta(t-t_{31})\} f_{sn}(m, t) h(t) dt = \\
 &= x_m A_n e^{-\sigma_n t_{32}} \cos \omega_n t_{32} + \xi_m A_n e^{-\sigma_n t_{31}} \cos \omega_n t_{31}, \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_{n\sin} &= \int_{m\alpha}^{(m+1)\alpha} \{s(t-t_{32}) + \eta(t-t_{31})\} f_{cn}(m, t) h(t) dt = \\
 &= -x_m A_n e^{-\sigma_n t_{32}} \sin \omega_n t_{32} - \xi_m A_n e^{-\sigma_n t_{31}} \sin \omega_n t_{31}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Неизвестными величинами в (6), (7) являются x_m , ξ_m , t_{31} , t_{32} . Для их вычисления сформируем еще два уравнения:

$$\begin{aligned}
 \delta_{(n+1)\cos} &= \int_{m\alpha}^{(m+1)\alpha} \{s(t-t_{32}) + \eta(t-t_{31})\} f_{s(n+1)}(m, t) h(t) dt = \\
 &= x_m A_{n+1} e^{-\sigma_{n+1} t_{32}} \cos \omega_{n+1} t_{32} + \xi_m A_{n+1} e^{-\sigma_{n+1} t_{31}} \cos \omega_{n+1} t_{31}, \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_{(n+1)\sin} &= \int_{m\alpha}^{(m+1)\alpha} \{s(t-t_{32}) + \eta(t-t_{31})\} f_{c(n+1)}(m, t) h(t) dt = \\
 &= x_m A_{n+1} e^{-\sigma_{n+1} t_{32}} \sin \omega_{n+1} t_{32} + \xi_m A_{n+1} e^{-\sigma_{n+1} t_{31}} \sin \omega_{n+1} t_{31}. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Перепишем (6), используя формулу Эйлера,

$$x_m A_n e^{-\sigma_n t_{32}} \frac{1}{2} (e^{j\omega_n t_{32}} + e^{-j\omega_n t_{32}}) + \xi_m A_n e^{-\sigma_n t_{31}} \frac{1}{2} (e^{j\omega_n t_{31}} + e^{-j\omega_n t_{31}}) = \delta_{n\cos}$$

ИЛИ

$$x_m (e^{(-\sigma_n + j\omega_n)t_{32}} + e^{(-\sigma_n - j\omega_n)t_{32}}) + \xi_m (e^{(-\sigma_n + j\omega_n)t_{31}} + e^{(-\sigma_n - j\omega_n)t_{31}}) = \frac{2\delta_{n\cos}}{A_n}. \quad (10)$$

Примем обозначения

$$p_2 = -\sigma_n + j\omega_n, \quad p_2 = -\sigma_n - j\omega_n, \quad \delta_{nc1} = \frac{2\delta_{n\cos}}{A_n} \quad (11)$$

и запишем (10) в виде

$$x_m \left(e^{p_1 t_{32}} + e^{p_2 t_{32}} \right) + \xi_m \left(e^{p_1 t_{31}} + e^{p_2 t_{31}} \right) = \delta_{nc1}. \quad (12)$$

Аналогично с учетом обозначений (11) уравнение (7) примет вид

$$x_m \left(e^{p_1 t_{32}} - e^{p_2 t_{32}} \right) + \xi_m \left(e^{p_1 t_{31}} - e^{p_2 t_{31}} \right) = \delta_{ns1}, \quad (13)$$

где $\delta_{ns1} = -2j \frac{2\delta_{n\sin}}{A_n}$.

Перепишем уравнение (8) с учетом формулы Эйлера:

$$x_m A_{n+1} e^{-\sigma_{n+1} t_{32}} \frac{1}{2} \left(e^{j\omega_{n+1} t_{32}} + e^{-j\omega_{n+1} t_{32}} \right) + \\ + \xi_m A_{n+1} e^{-\sigma_{n+1} t_{31}} \frac{1}{2} \left(e^{j\omega_{n+1} t_{31}} + e^{-j\omega_{n+1} t_{31}} \right) = \delta_{(n+1)\cos}$$

или

$$x_m \left(e^{(-\sigma_{n+1} + j\omega_{n+1}) t_{32}} + e^{(-\sigma_{n+1} - j\omega_{n+1}) t_{32}} \right) + \\ + \xi_m \left(e^{(-\sigma_{n+1} + j\omega_{n+1}) t_{31}} + e^{(-\sigma_{n+1} - j\omega_{n+1}) t_{31}} \right) = \frac{2\delta_{(n+1)\cos}}{A_{n+1}}. \quad (14)$$

Примем обозначения

$$p_3 = -\sigma_{n+1} + j\omega_{n+1}, \quad p_4 = -\sigma_{n+1} - j\omega_{n+1}, \quad \delta_{nc2} = \frac{2\delta_{(n+1)\cos}}{A_{n+1}} \quad (15)$$

и запишем (14) в виде

$$x_m \left(e^{p_3 t_{32}} + e^{p_4 t_{32}} \right) + \xi_m \left(e^{p_3 t_{31}} + e^{p_4 t_{31}} \right) = \delta_{nc2}. \quad (16)$$

С учетом обозначений (15) уравнение (9) примет вид

$$x_m \left(e^{p_3 t_{32}} - e^{p_4 t_{32}} \right) + \xi_m \left(e^{p_3 t_{31}} - e^{p_4 t_{31}} \right) = \delta_{ns2}, \quad (17)$$

где $\delta_{ns2} = -2j \frac{2\delta_{(n+1)\sin}}{A_{n+1}}$.

Уравнения (12), (13), (16), (17) составляют полную систему для определения неизвестных величин x_m , ξ_m , t_{31} , t_{32} .

Найдем суммы и разности пар уравнений (12), (13) и (16), (17) и получим систему вида

$$\begin{cases} x_m e^{P_1 t_{32}} + \xi_m e^{P_1 t_{31}} = R_1, \\ x_m e^{P_2 t_{32}} + \xi_m e^{P_2 t_{31}} = R_2, \\ x_m e^{P_3 t_{32}} + \xi_m e^{P_3 t_{31}} = R_3, \\ x_m e^{P_4 t_{32}} + \xi_m e^{P_4 t_{31}} = R_4, \end{cases} \quad (18)$$

где

$$R_1 = \frac{\delta_{nc1} + \delta_{ns1}}{2} = \frac{\delta_{nc\cos} - j\delta_{ns\sin}}{A_n};$$

$$R_2 = \frac{\delta_{nc1} - \delta_{ns1}}{2} = \frac{\delta_{nc\cos} + j\delta_{ns\sin}}{A_n}; R_3 = \frac{\delta_{nc2} + \delta_{ns2}}{2} = \frac{\delta_{(n+1)\cos} - j\delta_{(n+1)\sin}}{A_{n+1}};$$

$$R_4 = \frac{\delta_{nc2} - \delta_{ns2}}{2} = \frac{\delta_{(n+1)\cos} + j\delta_{(n+1)\sin}}{A_{n+1}}.$$

Из двух верхних уравнений системы (18) получим

$$\xi_m = \frac{R_2 e^{P_1 t_{32}} - R_1 e^{P_2 t_{32}}}{e^{P_2 t_{31}} e^{P_1 t_{32}} - e^{P_1 t_{31}} e^{P_2 t_{32}}}, \quad (19)$$

$$x_m = \frac{R_1 e^{P_2 t_{31}} - R_2 e^{P_1 t_{31}}}{e^{P_2 t_{31}} e^{P_1 t_{32}} - e^{P_1 t_{31}} e^{P_2 t_{32}}}. \quad (20)$$

Из двух нижних уравнений системы (18) получим

$$\xi_m = \frac{R_4 e^{P_3 t_{32}} - R_3 e^{P_4 t_{32}}}{e^{P_4 t_{31}} e^{P_3 t_{32}} - e^{P_3 t_{31}} e^{P_4 t_{32}}}, \quad (21)$$

$$x_m = \frac{R_3 e^{P_4 t_{31}} - R_4 e^{P_3 t_{31}}}{e^{P_4 t_{31}} e^{P_3 t_{32}} - e^{P_3 t_{31}} e^{P_4 t_{32}}}. \quad (22)$$

Приравняем правые части уравнений (19), (21) и (20), (22) и получим уравнения для определения t_{31} , t_{32} :

$$\begin{cases} \frac{R_2 e^{P_1 t_{32}} - R_1 e^{P_2 t_{32}}}{e^{P_2 t_{31}} e^{P_1 t_{32}} - e^{P_1 t_{31}} e^{P_2 t_{32}}} = \frac{R_4 e^{P_3 t_{32}} - R_3 e^{P_4 t_{32}}}{e^{P_4 t_{31}} e^{P_3 t_{32}} - e^{P_3 t_{31}} e^{P_4 t_{32}}}, \\ \frac{R_1 e^{P_2 t_{31}} - R_2 e^{P_1 t_{31}}}{e^{P_2 t_{31}} e^{P_1 t_{32}} - e^{P_1 t_{31}} e^{P_2 t_{32}}} = \frac{R_3 e^{P_4 t_{31}} - R_4 e^{P_3 t_{31}}}{e^{P_4 t_{31}} e^{P_3 t_{32}} - e^{P_3 t_{31}} e^{P_4 t_{32}}}. \end{cases}$$

4. Заключение

Необходимость синхронизировать по частоте и времени передатчик и приемник системы связи с ортогональными сигналами обуславливается описанием сигналов тригонометрическими рядами Фурье.

Целесообразно передавать информацию сигналами, которые получены в результате смещения импульсной характеристики каналоформирующего оборудования на кратные интервалы времени.

В предлагаемых системах передачи информации достаточно предусмотреть устройство синхронизации по времени.

Предлагаемое устройство синхронизации является достаточно простым и строится по схеме двухканального коррелятора, содержащего управляемые линии задержки и два арифметических функциональных узла.

Предлагаемый способ синхронизации позволяет упростить протокол обмена информацией между передающей и приемной частью системы, исключив необходимость в тактовой синхронизации, поскольку базисные функции могут быть смещены относительно друг друга на интервал, равный периоду следования информационных символов.

Путем решения системы нелинейных уравнений можно определить время поступления на вход приемника полезного и отраженного сигналов, что позволяет снизить влияние многопутевого распространения сигналов на работу устройства синхронизации.

Список литературы

1. Дегтярев А. Н. Ортогонализация функций и повышение помехоустойчивости высокоскоростных систем передачи информации. М. : Инфра-М, 2015. 152 с.

References

- [1] A. N. Degtyaryov, *Ortogonalizatsiya funktsii i povyshenie pomekhoustoichivosti vysokoskorostnykh sistem peredachi informatsii* [Orthogonalization functions and increase the noise immunity of high speed transmission systems]. Moscow: Infra-M, 2015. (In Russ.).