

Передача времени на сверхдлинных волнах с помощью кодовой манипуляции фазы несущей

© Е. Т. Жуков¹, Б. Ф. Бабайкин², А. С. Батура², П. В. Белянкин², Д. В. Филиппов²

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Рассмотрены основные аспекты усовершенствования существующего метода передачи времени на сверхдлинных волнах (СДВ) радиостанциями связи ВМФ РФ [1]. Используемый метод передачи сигналов времени состоит в передаче ряда несущих и устранении многозначности на разностных частотах для высокоточных фазовых измерений и амплитудной модуляции одной из них импульсами низких частот и меток времени.

Основная цель работы — усовершенствование метода передачи сигналов времени — может быть достигнута через реализацию следующих поставленных задач: повышение оперативности метода путём сокращения длительности сеанса, повышение помехоустойчивости и обеспечение передачи сигнала в новом формате, который должен включать дополнительную информацию о разности Всемирного времени и UTC, текущем времени и позывном станции.

Сокращение длительности сеанса передачи сигналов времени достигнуто путём оптимизации передачи компонент и пауз между ними в составе сеанса и использования полностью обновлённого формата программы низкочастотных амплитудно-модулированных радиоимпульсов (НЧ программы) на основе фазовой манипуляции длительностью 3 мин (в прежнем формате — от 14 до 19 мин — в зависимости от передаваемого формата). Передача позывного станции и дополнительной информации также выполняется с помощью фазовой манипуляции в течение 1 мин.

Общая длительность сеанса привязки сокращена с 30...41 мин до 13 мин с одновременным повышением помехоустойчивости НЧ программы. Обеспечена передача дополнительной информации. Разработаны и испытаны образцы передающей и приёмной аппаратуры, реализующей усовершенствованный метод передачи времени на СДВ.

Ключевые слова: сверхдлинные волны, СДВ, радиостанции связи ВМФ, передача сигналов времени, метки времени, манипуляция фазы несущей.

Контакты для связи: Жуков Евгений Тимофеевич (zhyket@mail.ru); Белянкин Павел Владимирович (pubjobbox@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 08.12.2020, принята к публикации 11.12.2020, опубликована 30.12.2020.

Для цитирования: Жуков Е. Т., Бабайкин Б. Ф., Батура А. С., Белянкин П. В., Филиппов Д. В. Передача времени на сверхдлинных волнах с помощью кодовой манипуляции фазы несущей // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 55. С. 3–9.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.55.3-9>

Time Transfer at Very Low Frequency by Carrier Phase Code Manipulation

E. T. Zhukov¹, B. F. Babaykin², A. S. Batura², P. V. Beliankin², D. V. Philippov²

¹Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

²Russian Institute of Radionavigation and Time, St. Petersburg, Russia

Abstract

Basic aspects of improving the existing method of very low frequency (VLF) time transfer used by Russian NAVY radio stations [1] are considered. The existing time transfer method of carrier transfer series resolution for high accuracy phase measurement with phase ambiguity resolving and amplitude modulation of one of them by low frequency (LF) time marker impulses.

The main innovation aims of this new method is reducing the time transfer session duration, broadcasting additional data (current time and UTC-UT1 time difference), and providing interference robust VLF time transfer.

Reducing the time transfer session duration is achieved by optimizing the duration of session components and pauses among them and using full reformatted 3 min duration phase modulated LF pulse sequence. The duration of the present-day LF time marker pulse program is 14...19 min. The phase modulated radio call sign, current time and UTC-UT1 time difference broadcast in 1 min duration sequence.

Full duration of the time transfer is reduced from 30...41 min to 13 min. The new LF phase modulated pulse program is more robust to interference. The additional data transfer is provided. The novelty of the proposed solutions consists in transferring time markers, time and other necessary information by carrier phase manipulation. The units of transmitting and receiving apparatus realizing the method improved are developed, produced and successfully tested.

Keywords: very low frequency (VLF), Navy radio stations, time transfer, time markers, carrier phase manipulation.

Contacts: *Eugeny T. Zhukov (zhyket@mail.ru); Pavel V. Beliankin (pvbjobbox@mail.ru).*

Received 8 December, 2020, accepted 11 December, 2020, published 30 December, 2020.

For citation: Zhukov E. T., Babaykin B. F., Batura A. S., Beliankin P. V., Philippov D. V. Time transfer at very low frequency by carrier phase code manipulation // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 55. P. 3–9.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.55.3-9>

Введение

Отечественная система передачи сигналов времени на СДВ (длина волны — 10–100 км, частота колебаний — 3–30 кГц) построена на базе радиостанций связи ВМФ [1]. В силу большой дальности распространения СДВ (около 10 тыс. км) и возможности их приёма под водой данная система является второй по значимости после ГЛОНАСС для лиц, работающих с частотно-временной информацией. Используемый до настоящего времени метод передачи времени [2] был разработан более 50 лет назад и не отвечает современным требованиям по оперативности, помехоустойчивости и объёму передаваемой информации. В этой связи совершенствование существующего метода передачи сигналов времени на СДВ является актуальной научной задачей.

В настоящее время Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) реализует программу STOIC (Spatial, Temporal and Orientation Information in Contested environments, Пространственные, временные данные и данные об ориентации в зонах конфликтов), в рамках которой предполагается создать систему PNT (Positioning, Navigation and Timing, Позиционирование, навигация и время). СДВ-компонент системы обеспечивает передачу высокостабильных опорных сигналов на дальние расстояния, в том числе с возможностью приёма под водой, и выполнен он на основе NAVY FSBS (Fixed Submarine Broadcast System, Стационарные передающие станции связи с подводными лодками) [3, 4].

Состояние вопроса передачи времени на СДВ

Проблема распространения радиоволн вокруг Земли впервые была решена в работах академика В. А. Фока. Им были выполнены фундаментальные исследования по распространению радиоволн для плоской и сферической моделей Земли [5]. Важнейшие и необходимые для практического применения исследования были выполнены профессором П. Е. Краснушкиным (Математический институт им. Стеклова АН СССР). Им была созда-

на теоретическая основа для качественной синхронизации в СДВ-диапазоне на расстояниях порядка 10 тыс. км с погрешностью 10 мкс. Исследования, связанные с использованием СДВ для передачи времени, и разработка метода передачи времени на СДВ были выполнены в Ленинградском научно-исследовательском радиотехническом институте (ЛНИРТИ), ныне — Российском институте радионавигации и времени (АО «РИРВ»), в 1960–1965 гг. и отражены в работах Л. Д. Васина, Л. М. Шура, М. Б. Болотникова и Е. Н. Червинского [6].

Разработанный в ЛНИРТИ метод состоит в излучении СДВ-радиостанциями ряда когерентных несущих для высокоточных фазовых измерений и амплитудной модуляции одной из них импульсами низких частот и меток времени [7]. В программе сеанса излучения заданы следующие параметры: длительность сеанса — от 30 до 41 мин, периодичность 1–2 раза в сутки, позывной станции включает низкочастотную и высокочастотную (ВЧ) составляющие. Позывной предназначен для идентификации передающей станции и представляет собой радиосигнал с частотой $F_1 = 25000$ Гц, манипулированный по амплитуде сочетанием букв и цифр [4], передаваемых кодом Морзе. Программа передачи обеспечивает однозначность привязки до минуты шкалы UTC (SU). При декодировании позывного и фиксации времени начала и окончания компонент сеанса однозначность расширяется до суточного интервала между сеансами [4].

В НЧ части излучается несущая, амплитудно-модулированная (АМ) импульсами с частотами 40; 10; 1; 1/10; 1/60 Гц, используемыми для привязки шкалы времени (ШВ) потребителей с погрешностью не более 1 мс. В ВЧ части излучаются когерентные несущие частоты $F_1 = 25.0$ кГц; $F_2 = 25.1$ кГц; $F_3 = 25.5$ кГц; $F_4 = 23.0$ кГц; $F_5 = 20.5$ кГц, которые используются для устранения многозначности фазовых измерений. Устранение многозначности до 10 мс осуществляется последовательно на разностных частотах 100, 500, 2500, 5000, 25000 Гц, с коэффициентом редукции от 2 до 5. В этом случае максимальная погрешность НЧ привязки не должна превышать 5 мс. По фа-

зовым измерениям достигается микросекундная точность привязки ШВ, однако она ограничивается нестабильностью задержки на распространение СДВ и без её калибровки составляет около 20...35 мкс.

Основной недостаток существующего фазово-импульсного метода передачи времени на СДВ — малая оперативность: длительность сеанса составляет — 41 мин — 1–2 раза в сутки. При этом не предусмотрена передача оцифровки ШВ и передача Всемирного времени [4, 7]. Система передачи сигналов времени на СДВ не отвечает современным требованиям по помехоустойчивости.

В 1980–1985 гг. исследована возможность совершенствования фазово-импульсного метода путём дополнительной манипуляции частоты несущей кодом Баркера для передачи минутной метки времени. Длительность сеанса была сокращена до 30...34 мин. Была разработана аппаратура передающих пунктов, установленная на двух СДВ радиостанциях и функционировавшая в экспериментальном режиме. Однако указанная возможность не была реализована из-за отказа в производстве соответствующей серийной приёмной аппаратуры.

Совершенствование существующего метода передачи времени

В 2008–2012 гг. были проведены работы по совершенствованию фазово-импульсного метода передачи сигналов времени на основе использования кодовой манипуляции фазы несущей радиоимпульсов с сокращением длительности сеанса излучения в новом формате до 15 мин и передачей оцифровки ШВ [7]. Последовательность передачи составляющих сигнала нового формата показана на рис. 1. Научная новизна предложенных решений состоит в том, что впервые для передачи вре-

мени на СДВ предложена и реализована технология

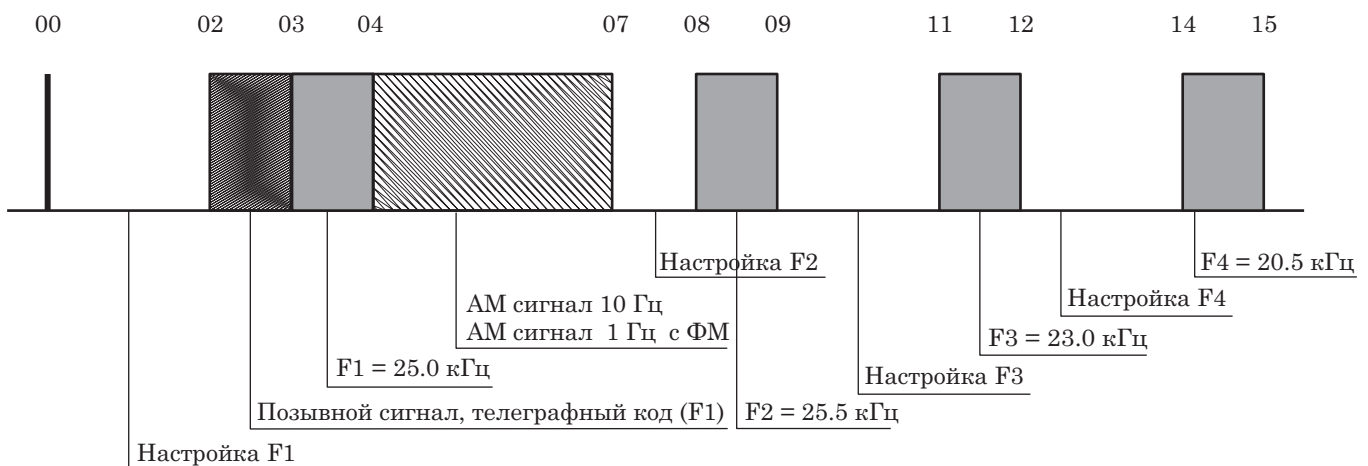


Рис. 1. Пятнадцатиминутный формат передачи времени

гия передачи меток времени и временной информации путём манипуляции фазы несущей в передатчике псевдослучайным и информационным кодами и соответствующей обработки фазоманипулированных сигналов в приёмнике. Впервые на СДВ была реализована передача поправки Всемирного времени, необходимой для астрометрии. Определение поправок Всемирного времени и ПВЗ методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами в нашей стране осуществляется с помощью комплекса «Квазар-КВО» (ИПА РАН).

Передача времени на СДВ в новом формате

Передача позывного в новом формате излучения осуществляется в начале сеанса на частоте $F1 = 25$ кГц. Кодирование информации осуществляется методом фазовой манипуляции. В составе позывного сигнала передается информация о номере передающей станции (от 1 до 6), времени начала сеанса (в часах) и поправка Всемирного времени DUT1. Номер станции (шесть станций) кодируется тремя битами, номер часа — пятью.

Всемирное время UT1 передаётся с помощью поправки DUT1 к Всемирному координированному времени UTC. DUT1 передается в виде десятичного числа со знаком в диапазоне ± 1 с с дискретом 0.02 с, т. е. значение передаваемого кода является целым числом в диапазоне от -50 до $+50$. При отсутствии на передающей станции информации о DUT1 передается код « -63_{10} » (признак отсутствия информации DUT1).

Для передачи DUT1 достаточно 7 битов (50 возможных значений со знаком кодируют значение DUT1-UTC в пределах ± 1 с с шагом 20 мс). Итого 15 информационных битов. При этом к номеру часа прибавляется единица для исключения комбинации «все нули». Для снижения вероятности ошибок в формате сообщения используется корректирующий код Хемминга.

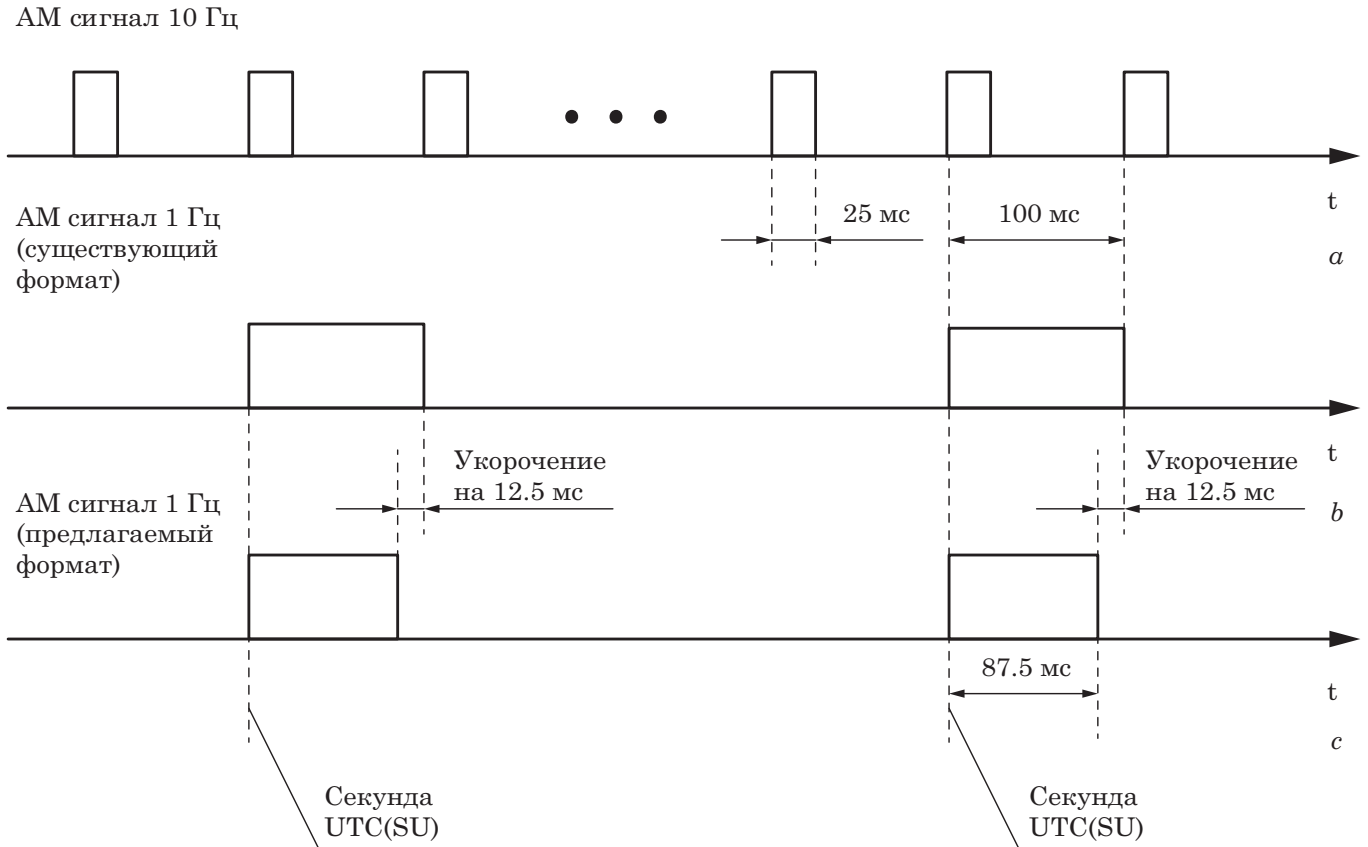


Рис. 2. Существующий и новый форматы AM сигнала 1 Гц

Уменьшение времени излучения низкочастотной части сеанса передачи

Длительность сеанса передачи СДВ сигналов времени сокращена путём уменьшения времени излучения низкочастотной части сеанса. AM сигнал с частотой 40 Гц был введён в состав СДВ сигналов времени в качестве вспомогательного, облегчающего в дальнейшем обнаружение низкочастотных сигналов времени при ограниченных возможностях аппаратных средств. AM сигнал 40 Гц используется в приемниках СДВ сигналов времени для грубой (в том числе визуальной) привязки ШВ с погрешностью примерно 1–3 мс. Этот сигнал не используется для автоматического разрешения многозначности и может быть исключен из состава сеанса без потерь в точности грубой привязки по огибающей. При этом для грубой привязки используется фронт AM сигнала 10 Гц.

Поскольку в существующем формате длительность излучения AM сигнала на частоте 1 Гц составляет 100 мс, каждую секунду этим сигналом экранируется один импульс AM сигнала на частоте 10 Гц, что приводит к потере 10 % энергии при поиске фронта сигнала на частоте 10 Гц. Во избежание этих потерь импульсы AM сигнала (1 Гц) укорачиваются на 12.5 мс перед фронтом AM сигнала (10 Гц), т. е. AM сигнал (1 Гц) передается импульсами длительностью 87.5 мс соответствии со схемой, отраженной на рис. 2*b*. AM сигналы бо-

лее низких частот манипуляции (1/10 Гц и 1/60 Гц) являются наименее помехозащищенными. Кроме того, длительное излучение этих компонент дополнительно экранирует импульсы 10 Гц, что приводит при приеме к дополнительной потере примерно 27 % их энергии.

С целью сокращения времени и повышения надежности привязки шкалы времени на минутном интервале из низкочастотной программы исключено излучение сигналов на 1/10 Гц и 1/60 Гц.

Для передачи ШВ (1/60 Гц) используется фазовая манипуляция ($0^\circ/180^\circ$) AM сигнала (1 Гц) 60-элементной псевдослучайной укороченной M-последовательностью, максимум автокорреляционной функции которой предшествует фронту AM 1 Гц сигнала, соответствующему 1 мин шкалы UTC(SU). В этом случае 60 манипулированных по фазе (ФМ) импульсов сигнала на частоте 1 Гц содержат исчерпывающую информацию для однозначного определения момента минуты на шкале UTC(SU).

С целью обеспечения возможности фазовой манипуляции AM 1 Гц сигнала в формат этих сигналов (рис. 3) введены дополнительные паузы длительностью 12.5 мс после 25-миллисекундного 10 Гц радиоимпульса. Таким образом, длительность ФМ импульса 1 Гц-сигнала составит 50 мс в соответствии с временной диаграммой НЧ программы сеанса, приведенной на рис. 3.

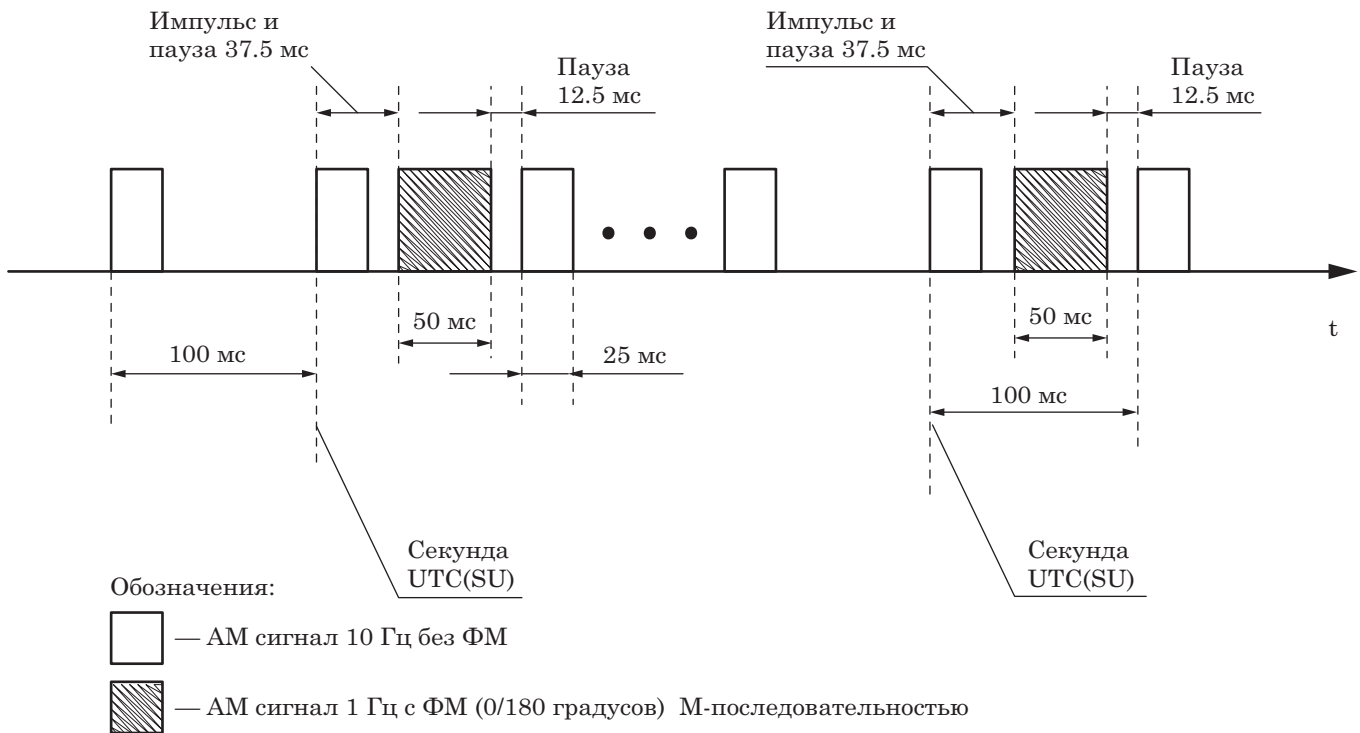


Рис. 3. Формат низкочастотной программы при использовании ФМ сигнала 1 Гц

При использовании фазовой манипуляции АМ сигнала на частоте 1 Гц автоматический цифровой приемник после обнаружения фронта АМ сигнала на частоте 10 Гц (время обнаружения не более 1 мин) может одновременно проводить накопление для уточнения положения фронта АМ сигнала на частоте 10 Гц, обнаружение импульсного 1 Гц сигнала и декодирование его фазовой манипуляции (в сумме не более 2–4 мин). Таким образом, общее время излучения низкочастотной программы с форматом, приведенным на рис. 1, составляет не более 5 мин.

В этом случае потеря энергии АМ сигнала на частоте 1 Гц за счет уменьшения длительности импульса до 50 мс составит 33 %. С целью двукратного повышения энергии АМ сигнала на частоте 1 Гц передается манипулированный по фазе АМ 1 Гц-сигнал длительностью 50 мс в двух соседних 100-миллисекундных интервалах. В этом случае время передачи низкочастотной части сеанса может быть сокращено до 3 мин, поскольку длина М-последовательности увеличивается до 120 элементов, что позволяет сократить время для её надежного приёма.

На рис. 4а представлена итоговая временная диаграмма низкочастотной программы с двукратным повторением излучения радиоимпульсов на частоте 1 Гц манипулированных 120-элементной укороченной М-последовательностью. График автокорреляционной функции этой М-последовательности изображен на рис. 4б. Экстремум автокорреляционной функции совпадает со вторым

радиоимпульсом 1 Гц, предшествующим радиоимпульсу 10 Гц, совпадающему с минутой UTC(SU).

Уменьшение количества высокочастотных компонент сеанса передачи

Количество высокочастотных компонент в сеансе излучения СДВ сигналов времени обусловлено погрешностью грубого измерения временного положения фронта АМ сигнала и значениями коэффициентов перехода при разрешении многозначности фазовых измерений.

В настоящее время устранение многозначности фазовых измерений проводится на разностных частотах: 100 Гц, 500 Гц, 2500 Гц, 5000 Гц с переходом на первую высокочастотную компоненту $F_1 = 25$ кГц. При этом коэффициенты перехода составляют, соответственно 5, 5, 2 и 5. Выбор значений частот высокочастотных компонент был обусловлен тем, что при большой продолжительности сеанса для надежного устранения многозначности коэффициент перехода не должен превышать 5.

При использовании низшей разностной частоты 100 Гц устранение многозначности фазовых измерений производится до интервала 10 мс. Очевидно, что для получения полного рассогласования (до 1 с) ШВ потребителя относительно шкалы UTC(SU) погрешность грубого измерения по НЧ программе не должна превышать 5 мс. Однако при использовании для привязки современных цифровых средств погрешность грубого определения не превышает 1 мс.

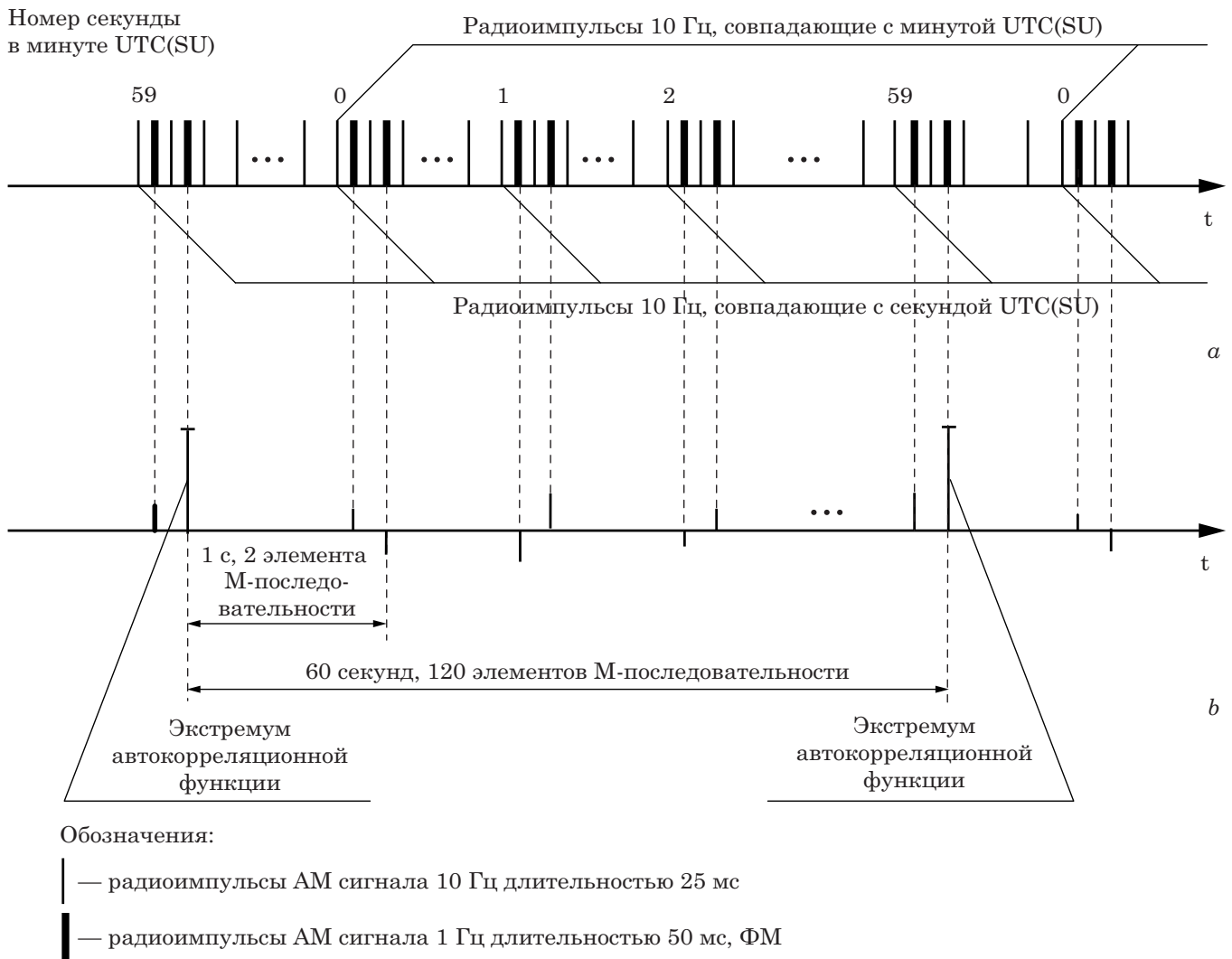


Рис. 4. Формат низкочастотной программы на частотах 10 Гц и 1 Гц: а) диаграмма излучения низкочастотной программы; б) автокорреляционная функция М-последовательности

Заключение

Применение для передачи времени на СДВ импульсных сигналов с комбинированной амплитудной и фазовой манипуляцией и уменьшение количества, длительности излучения сигналов несущих частот и пауз между ними позволяет сократить длительность сеанса излучения с 47 мин до 15 мин. Для передачи минутной метки времени при этом используется манипуляция фазы несущей радиоимпульсов кодом сокращённой М-последовательности. С помощью манипуляции фазы несущей радиоимпульсов кодами времени обеспечивается также передача позывного передающей станции, оцифровки времени и поправки Всемирного времени.

Созданные опытные образцы аппаратно-программных средств, реализующих модернизированный пятнадцатиминутный фазово-импульсный метод передачи времени на СДВ, подтвердили свои технические параметры и характеристики

для их целевого применения, в части оперативности, информативности, помехоустойчивости и снижения энергозатрат.

При проведении испытаний была подтверждена возможность передачи и приема сигналов времени нового формата без ухудшения точностных характеристик привязки ШВ объекта.

Литература

1. Сонников А. Г., Григорьев В. Н., Владимиров Д. Н. Создание и развитие радиопередающих средств СДВ- и СНЧ-диапазонов в ОАО «РИМР» // Электросвязь. 2011. № 4. С. 31–32
2. Бюллетень В16/2018. Эталонные сигналы частоты и времени. Характеристики и программы передач через радиостанции, наземные и космические средства навигации, сети телевизионного вещания и глобальную сеть интернет. Главный метрологический центр ГСВЧ. М.: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. 32 с.
3. DARPA developing Very Low Frequency (VLF) systems to provide GPS like position and timing technologies in contested, underwater and underground environments

[Электронный ресурс]. URL: <https://idstch.com/technology/electronics/darpa-developing-gps-like-position-timing-technologies-contested-underwater-underground-environments> (дата обращения 04.11.2020).

4. ENSCO Selected Team Member for DARPA STOIC Program Phase II and III [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ensco.com/news-media/press-releases/ensco-selected-team-member-darpa-stoic-program-phase-ii-and-iii> (дата обращения 05.11.2020).

5. Фок В. А. Дифракция радиоволн вокруг земной поверхности. М.: АН СССР, 1946.

6. Васин Л. Д., Кирицев Э. Г. Аппаратура для сличения частот по сигналам СДВ радиостанций // Измерительная техника. 1972. № 11. С. 39.

7. Бабайкин Б. Ф., Белянкин П. В., Жуков Е. Т. и др. Состояние и пути модернизации отечественных средств передачи времени на сверхдлинных волнах // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 44. С. 3–9.