

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.9.10>

УДК: 535.4(076.5); 621.382

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ФОТОННАЯ СИСТЕМА ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В СПУТНИКОВОМ РАДИОКАНАЛЕ

А.Г. Прыгунов¹, А.П. Зуйков², В.С. Лободинов²

¹Донской государственный технический университет,
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

²Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи,
344038, г. Ростов-на-Дону, ул. Нансена, д. 130

Статья поступила в редакцию 24 мая 2023 года

Аннотация. Необходимым условием качественного решения телекоммуникационных, инфокоммуникационных и навигационных задач в спутниковых системах связи является наличие в спутниковых радиоканалах высокоточной системы синхронизации. Указано, что на работу системы синхронизации обмена данными в спутниковых радиоканалах оказывает отрицательное влияние ряд внешних факторов, таких, например, как наличие эффекта Доплера, ошибки в определении относительных скоростей и направлений перемещения искусственных спутников Земли (ИСЗ), наличие времени запаздывания передаваемого сигнала из-за значительных расстояний между узлами сети спутниковой связи. Приведены основные недостатки современных систем синхронизации, используемых в спутниковых радиоканалах, и сделан вывод о том, что имеет место относительно высокая вероятность срыва синхронизма. Указано, что первичным видом синхронизации в спутниковом радиоканале является фазовая синхронизация, погрешности которой влияют на все последующие виды синхронизации (тактовую, кадровую и цикловую). Анализ технических характеристик современных систем фазовой синхронизации в спутниковых радиоканалах позволил сделать вывод об актуальности поиска нового подхода к построению этих систем,

обеспечивающего повышение быстродействия и точности их работы. Возможным направлением решения этой задачи является использование в измерительной аппаратуре, обеспечивающей функционирование и синхронизацию спутниковых радиоканалов, элементов голографической фотоники с опорой на голографические чувствительные элементы. В статье решается задача построения голографической фотонной системы фазовой синхронизации в спутниковом радиоканале. Предлагается техническое решение для повышения быстродействия, чувствительности и точности системы фазовой синхронизации путём использования в конструкции этой системы объёмной отражательной Фурье-голограммы. Разработан вариант структурной схемы голографической фотонной системы фазовой синхронизации и описана работа этой схемы. Предложено конструктивное построение оптических элементов разработанной структурной схемы в виде электрооптических модуляторов и дефлекторных оптических систем. Указаны отдельные особенности построения этих конструктивных элементов. Сформулировано функциональное назначение объёмной отражательной Фурье-голограммы в конструкции голографической фотонной системы фазовой синхронизации. Исследованы закономерности изменения параметров оптических полей в голографических фотонных элементах системы фазовой синхронизации спутникового радиоканала. На конкретных численных примерах показана возможность обеспечения высокой чувствительности и точности голографической фотонной системы фазовой синхронизации.

Ключевые слова: спутниковый радиоканал, фазовая синхронизация, голографическая фотоника, объёмная отражательная Фурье-голограмма, чувствительность, точность, закономерности изменения параметров.

Финансирование: работа подготовлена в рамках научной темы «Разработка беспилотных технологий на основе комплексной поэтапной оптимизации с редукцией экстремальных задач и инструментов нейро-нечёткого моделирования (FZNE-202 2-0006).».

Автор для переписки: Прыгунов Александр Германович, agprygunov@mail.ru

Введение

Спутниковые системы связи (ССС) играют всё большую роль в решении телекоммуникационных, инфокоммуникационных и навигационных задач [1]. Необходимым условием качественного решения этих задач является наличие в спутниковых радиоканалах высокоточной системы синхронизации [1, 2]. К сожалению, на работу системы синхронизации обмена данными в спутниковых радиоканалах оказывает отрицательное влияние ряд внешних факторов, таких, например, как наличие эффекта Доплера, ошибки в определении относительных скоростей и направлений перемещения искусственных спутников Земли (ИСЗ), наличие времени запаздывания передаваемого сигнала из-за значительных расстояний между узлами сети спутниковой связи [2]. Задача оценки и компенсации вредного влияния различных факторов на процесс синхронизации и обмена информацией в спутниковых радиоканалах не может быть успешно решена для всех из этих факторов одновременно, т.е. не существует и не может существовать какого-то одного общего решения для этой задачи. На фоне роста требований к техническим характеристикам аппаратуры СССР, современные системы синхронизации имеют ряд существенных недостатков, ограничивающих перспективы модернизации их аппаратуры, что ограничивает её дальнейшее использование в новейших ИСЗ [2, 3]. Основными из недостатков этих систем являются: ограниченное быстродействие, недостаточная точность синхронизации (точность измерения фазового сдвига между двумя частотами, которую могут обеспечить фазовые дискриминаторы, находится в пределах 2-3 градусов [2, 3]) и высокая сложность конструктивного исполнения аппаратуры. Сложно решается вопрос устранения в радиоканалах дополнительных помех и искажений, обусловленных активными нелинейными элементами в схемах преобразования и усиления сигналов. Имеет место относительно высокая вероятность срыва синхронизма.

Первичным видом синхронизации в спутниковом радиоканале является фазовая синхронизация, погрешности которой влияют на все последующие виды

синхронизации (тактовую, кадровую и цикловую). При фазовой синхронизации измеряется фазовый сдвиг между принимаемым и опорным сигналами, а затем измеренный фазовый сдвиг компенсируют путём использования системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1, 2].

Анализ технических характеристик современных систем фазовой синхронизации в спутниковых радиоканалах [1-3] позволяет сделать вывод об актуальности поиска нового подхода к построению этих систем, обеспечивающего повышение быстродействия и точности их работы. Возможным направлением решения этой задачи является использование в измерительной аппаратуре, обеспечивающей функционирование и синхронизацию спутниковых радиоканалов, элементов голографической фотоники с опорой на голографические чувствительные элементы [4-7]. Использование в системе синхронизации спутникового радиоканала элементов голографической фотоники открывает возможность повышения скорости и точности синхронизации путём высокоточного и оперативного измерения разности фаз между принимаемым и опорным сигналами и устранения этой разности. Таким образом, задача построения системы фазовой синхронизации спутникового радиоканала с использованием элементов голографической фотоники является актуальной.

Целью статьи является разработка варианта структурной схемы голографической фотонной системы фазовой синхронизации спутникового радиоканала.

Решаемые задачи:

- 1) Разработка варианта структурной схемы голографической фотонной системы фазовой синхронизации.
- 2) Исследование закономерностей изменения параметров оптических полей в голографических фотонных элементах системы фазовой синхронизации спутникового радиоканала.

1. Разработка варианта структурной схемы голографической системы фазовой синхронизации.

Известно, что наиболее высокие чувствительность и точность при измерении физических величин обеспечивают методы интерферометрии [8-10]. Среди интерферометрических методов измерений лучшими техническими характеристиками обладают методы голографической интерферометрии [11, 12]. Использование голограмм в измерительных схемах конструкций фотонных устройств различного назначения позволяет исключить ошибки, вносимые элементами оптических каналов, по которым распространяются световые потоки, формирующие интерферограмму, повышает соотношение сигнал/шум и контрастность интерференционной картины, а также обеспечивает её устойчивость при воздействии вибрационных и ударных нагрузок на корпус фотонного устройства [6, 13]. Это обуславливает актуальность использования голограмм в конструкциях фотонных устройств и систем, в том числе и в конструкции системы фазовой синхронизации спутникового радиоканала. Вариант структурной схемы голографической фотонной системы фазовой синхронизации спутникового радиоканала представлен на рисунке 1.

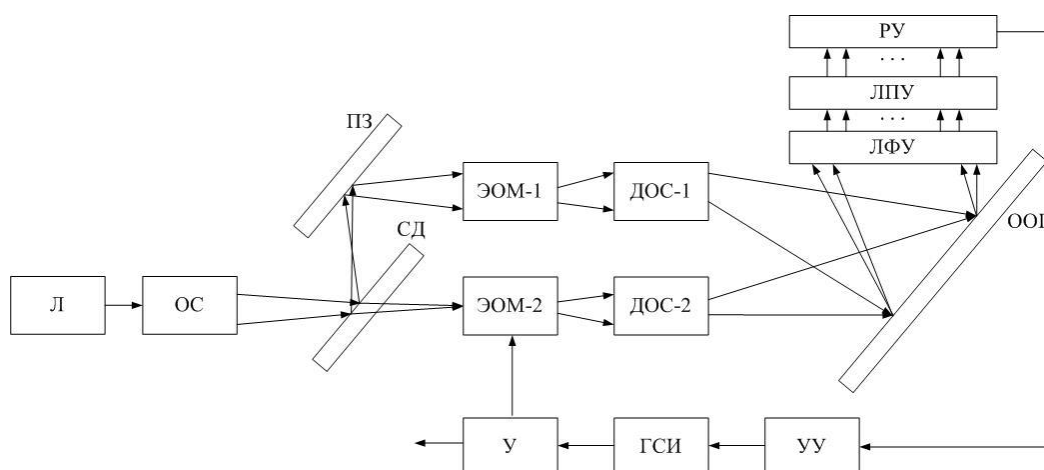


Рис. 1. Голографическая фотонная система фазовой синхронизации.

Голографическая система фазовой синхронизации в спутниковом радиоканале (Рисунок 1) устроена и работает следующим образом. Лазерный излучатель (Л) формирует когерентный световой поток, который направляют

на вход оптической системы (ОС), осуществляющей коллимирование и фокусировку этого светового потока. С выхода ОС световой поток со сферическим волновым фронтом падает на светоделитель (СД), который разделяет этот световой поток на два отдельных световых потока. Один из этих световых потоков падает на поворотное зеркало (ПЗ), а другой световой поток проходит через СД и падает на электрооптический модулятор ЭОМ-2. В ЭОМ-2 осуществляется фазовая модуляция светового потока со сферическим волновым фронтом, проходящего через этот модулятор, усиленным выходным электрическим сигналом генератора синхроимпульсов (ГСИ). С выхода ЭОМ-2 световой поток, модулированный по фазе (с модулированной кривизной его волнового фронта), направляют на вход дефлекторной оптической системы ДОС-2. С выхода ДОС-2 модулированный световой поток направляют в плоскость объёмной отражательной Фурье-голограммы (ООГ) под одним из углов оптимальной реконструкции [14]. Вторым световым потоком со сферическим волновым фронтом от светоделителя СД падает на поворотное зеркало ПЗ, которое направляет этот световой поток на вход электрооптического модулятора ЭОМ-1. В ЭОМ-1 осуществляют фазовую модуляцию светового потока, проходящего через этот модулятор усиленным принимаемым радиосигналом. В процессе модуляции изменяется кривизна волнового фронта модулируемого светового потока (смещается в пространстве его фазовый центр в виде перемещений точки его фокусировки). С выхода ЭОМ-1 модулированный световой поток падает на вход дефлекторной оптической системы ДОС-1. Модулированный световой поток с выхода ДОС-1 также, как и световой поток с выхода ДОС-2, направляют в плоскость ООГ под одним из углов оптимальной реконструкции. В плоскости ООГ световыми потоками с выходов ДОС-1 и ДОС-2 в области их перекрытия формируется интерференционная картина, которая, с учётом дифракционных свойств ООГ, проецируется в прожекторную зону на входную плоскость линейки фотоприёмных устройств (ЛФУ). ЛФУ представляют собой набор микрофотоприёмников, размещённых в виде линейки. Выход каждого отдельного фотоприёмника ЛФУ электрически

соединён со входом соответствующего ему порогового устройства линейки пороговых устройств (ЛПУ). Конструктивно ЛПУ представляет собой набор пороговых устройств в виде прямых или инверсных усилителей с порогом Шмитта. На выходе каждого порогового элемента ЛПУ, в зависимости от освещённости соединённого конкретно с ним фоточувствительного элемента ЛФУ и установленным порогом срабатывания, формируется потенциал, соответствующий «единице» или «нулю» цифровой информации. Каждой разности фаз световых потоков, интерферирующих в плоскости ООГ, на выходах ЛПУ будет формироваться соответствующая этому кодовая комбинация позиционного цифрового двоичного кода. Цифровые двоичные коды с выходов ЛПУ, соответствующие параметрам каждой конкретной интерферограммы, направляют

на параллельные входы решающего устройства (РУ). Основой РУ является быстродействующий микроконтроллер. В РУ, на основе анализа кодовых комбинаций позиционного цифрового двоичного кода, поступающих на его вход, определяется мгновенное значение величины рассогласования между сигналами фазовой синхронизации, которые вырабатываются генератором синхроимпульсов (ГСИ), и сигналами фазовой синхронизации, поступающими на вход радиоприёмной аппаратуры от передатчиков спутниковой системы связи. Пропорционально величине этого рассогласования РУ вырабатывает и подаёт сигнал в устройство управления (УУ) для управления параметрами ГСИ, в котором, соответствующим образом, изменяются параметры последовательности синхроимпульсов на его выходе. Выходные сигналы ГСИ усиливаются усилителем У и направляют на модулирующий вход ЭОМ-2. В результате модуляции в ЭОМ-2 изменяется кривизна волнового фронта светового потока, проходящего через этот модулятор и направляемого через ДОС-2 в плоскость интерференции. Со второго выхода усилителя У электрические сигналы в виде усиленных синхроимпульсов поступают в тракт обработки принимаемого радиосигнала. Образцы кодовых комбинаций позиционного цифрового двоичного кода, поступающего с выходов ЛПУ

на параллельные входы РУ, соответствующие различным значениям величины фазовой рассинхронизации, хранятся в запоминающем устройстве, размещённом в РУ. Это обеспечивает их оперативное сравнение с кодовыми комбинациями позиционного цифрового двоичного кода, поступающего в РУ с выходов ЛПУ, и высокую скорость выработки сигнала коррекции в ГСИ. Таким образом, параметры выходных сигналов ГСИ синхронизируются по фазе с параметрами принимаемой последовательности синхроимпульсов. При построении структурной схемы голографической фотонной системы фазовой синхронизации в спутниковом радиоканале практический интерес представляет конструктивное построение её оптических элементов в виде ЭОМ и ДОС, а также функциональное назначение ООГ.

Электрооптические модуляторы (ЭОМ-1 и ЭОМ-2) построены с использованием ниобата лития с реализацией линейного электрооптического эффекта Поккельса. Известно [15], что электрооптические модуляторы светового потока с использованием ниобата лития могут работать на частотах в десятки и даже сотни гигагерц. Дефлекторная оптическая система типа ДОС-1 или ДОС-2, может быть конструктивно выполнена на основе акустооптического дефлектора [16], обеспечивающего широкий диапазон углов отклонения для световых лучей, падающих на его вход. Диапазон углов отклонения светового потока дефлекторной оптической системой может быть существенно расширен путём использования в его конструкции нескольких оптических линз, реализующих эффект усиления набега фазы светового потока [17]. Важным конструктивным элементом голографической фотонной системы синхронизации является ООГ, которая экспонируется в линейном режиме двумя встречными световыми пучками, имеющими сферические волновые фронты. ООГ в схеме фотонной системы синхронизации выполняет следующие функции:

а) канализирует и направляет энергию оптической волны, дифрагировавшей от ООГ, в центральную область интерферограммы [18, 19], что обеспечивает возможность повышения чувствительности и точности при определении величины фазового рассогласования;

б) обеспечивает пространственную и спектральную селективность к световому потоку, падающему на ООГ [14], что даёт возможность формирования интерферограммы при использовании источников оптического излучения с низкой когерентностью формируемого светового потока, а также повышает контрастность формируемой интерферограммы;

в) проецирует изображение интерферограммы в прожекторную зону за пределы оптических осей световых потоков, формирующих эту интерферограмму [18];

г) обеспечивает возможность формирования интерферограммы с широким диапазоном пространственных частот с подбором значений этих частот [18, 20].

Анализ конструктивного исполнения голографической фотонной системы фазовой синхронизации, представленной на рисунке 1, показывает, что эта система может быть реализована на практике с использованием конструктивных элементов, производимых отечественными предприятиями и организациями. При этом обеспечиваются повышенные быстродействие, чувствительность и точность голографической фотонной системы фазовой синхронизации по сравнению с современными системами подобного назначения.

2. Исследование закономерностей изменения параметров оптических полей в голографических фотонных элементах системы фазовой синхронизации спутникового радиоканала.

Голографическим элементом разработанной конструкции голографической фотонной системы фазовой синхронизации спутникового радиоканала является объёмная отражательная Фурье-голограмма (Рисунок 1). Для оценки взаимосвязи параметров интерферограммы, формируемой в плоскости ООГ, и исследования закономерностей изменений этих параметров рассмотрим оптическую схему формирования интерферограммы в голографической фотонной системе фазовой синхронизации спутникового радиоканала, представленную на рисунке 2.

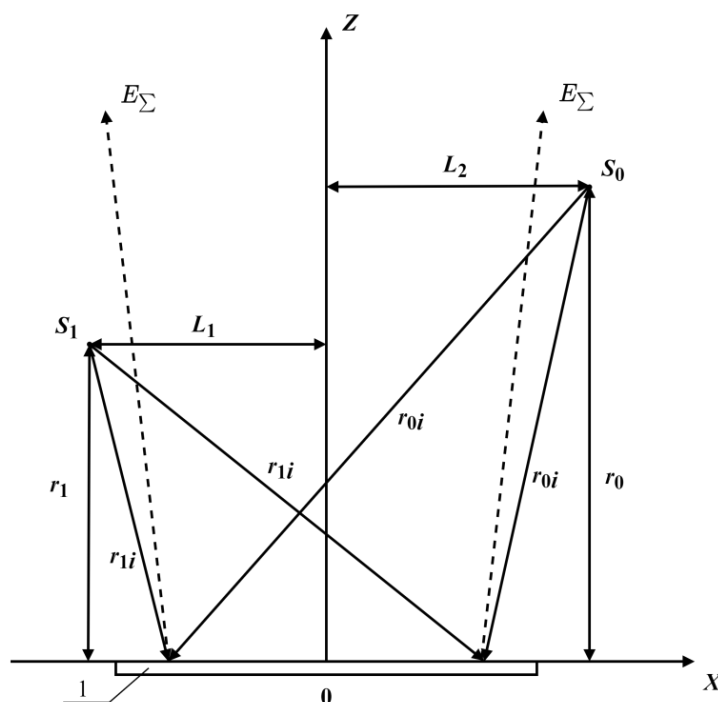


Рис. 2. Оптическая схема формирования интерферограммы.

На рисунке 2 использованы обозначения: 1 – объёмная отражательная Фурье-голограмма (ООГ); S_1 и S_0 – точечные источники когерентных световых потоков (применительно к структурной схеме голографической фотонной системы синхронизации, представленной на рисунке 1, точечными источниками когерентных световых потоков являются точки их фокусировки за дефлекторными оптическими системами ДОС-1 и ДОС-2); XOZ – прямоугольная система координат; r_1 – расстояние от точечного источника света S_1 до плоскости ООГ; r_0 – расстояние от точечного источника света S_0 до плоскости ООГ; L_1 – расстояние от точечного источника света S_1 до оси Z ; L_2 – расстояние от точечного источника света S_0 до оси Z ; r_{1i} – расстояние от точечного источника света S_1 до произвольной точки в плоскости интерференции; r_{0i} – расстояние от точечного источника света S_0 до произвольной точки в плоскости интерференции; E_Σ – суммарное оптическое поле, проецируемое ООГ в прожекторную зону. Это поле формируется в результате дифракции на ООГ световых потоков, падающих на эту Фурье-голограмму от когерентных точечных источников света S_1 и S_0 . В силу дифракционных свойств ООГ, обусловленных условиями

её экспонирования [11], поле E_{Σ} формируется двумя световыми потоками минус первого порядка и направлено в сторону от оптических осей световых потоков, падающих на эту голограмму. Это облегчает пространственное размещение фотоприёмных устройств в конструкции голографической фотонной системы синхронизации.

Интенсивность светового потока в плоскости ООГ, описывается выражением [21]:

$$I = I_0 + I_1 \cdot \cos(\varphi), \quad (1)$$

где I_0 – член, определяющий постоянный световой фон в плоскости интерферограммы;

I_1 – амплитуда интерференционной составляющей интенсивности светового потока в плоскости интерференции;

φ – разность фаз интерферирующих световых потоков.

При использовании фазовой ООГ с дифракционной эффективностью близкой к 100% [21] постоянный световой фон в плоскости интерференции можно не учитывать. В соответствии с рисунком 2 фаза интерференционного члена в (1) будет определяться соотношениями:

$$\varphi = k \cdot (r_{1i} - r_{0i}), \quad (2)$$

где k – волновое число.

$$r_{1i} = \sqrt{r_1^2 + (L_1 + x)^2}, \quad (3)$$

$$r_{0i} = \sqrt{r_0^2 + (L_2 + x)^2}, \quad (4)$$

При фазовой модуляции световых потоков, формируемых точечными источниками света S_1 и S_0 , в выражениях (2) и (3) появятся добавки к набегу фазы модулируемых когерентных световых потоков, что обусловлено перемещениями в пространстве формирующих их точечных источников света. С учётом этого выражения (2) и (3) будут иметь следующий вид:

$$r_{1i} = \sqrt{(r_1 + \Delta r_1(t))^2 + (L_1 + x)^2}; \quad (5)$$

$$r_{0i} = \sqrt{(r_0 + \Delta r_0(t))^2 + (L_2 + x)^2}; \quad (6)$$

где $\Delta r_1(t)$ – перемещение в пространстве точки фокусировки светового потока, падающего на ООГ с выхода ДОС-1, обусловленное воздействием на ЭОМ-1 усиленного электрического сигнала, поступающего из тракта радиоприёма (Рис. 1);

$\Delta r_0(t)$ – перемещение в пространстве точки фокусировки светового потока, падающего на ООГ с выхода ДОС-2, обусловленное воздействием на ЭОМ-2 усиленного электрического сигнала, поступающего с выхода ГСИ.

Изменение пространственных положений точек фокусировки световых потоков в ЭОМ-1 и ЭОМ-2 (Рисунок 1) обусловлено изменениями коэффициентов преломления электрооптических кристаллов этих модуляторов и сферичностью волновых фронтов световых потоков, падающих на входы этих модуляторов. При этом необходимо учитывать, что на выходах ДОС-1 и ДОС-2 последовательно стоят две тонкие линзы, реализующие эффект увеличения набега фазы светового потока [17]. Этот эффект заключается в многократном (на порядок и более) увеличении изменения кривизны сферического волнового фронта светового потока (увеличении набега его фазы) на выходе второй линзы, по отношению к изменению кривизны сферического волнового фронта светового потока на входе первой линзы, при определённом размещении этих линз друг относительно друга. Для практической реализации этого эффекта необходимо, чтобы точка фокусировки светового потока на выходе первой линзы находилась вблизи и перед точкой переднего фокуса второй линзы. Коэффициент усиления набега фазы светового потока (пространственного перемещения точки его фокусировки) системой из двух тонких собирающих линз $K_{\text{тл}}$ определяется выражением:

$$K_{\text{тл}} = \frac{F}{d + \Delta d_i - F}; \quad (7)$$

где d – расстояние от точки фокусировки светового потока первой линзой до оптического центра второй линзы;

Δd_i – величина линейного перемещения в соответствующем ДОС (в ДОС-1 или в ДОС-2 на рисунке 1) точки фокусировки светового потока

на выходе первой тонкой собирающей линзы усилителя набега фазы светового потока, состоящего из двух тонких собирающих линз;

F – переднее фокусное расстояние второй тонкой собирающей линзы.

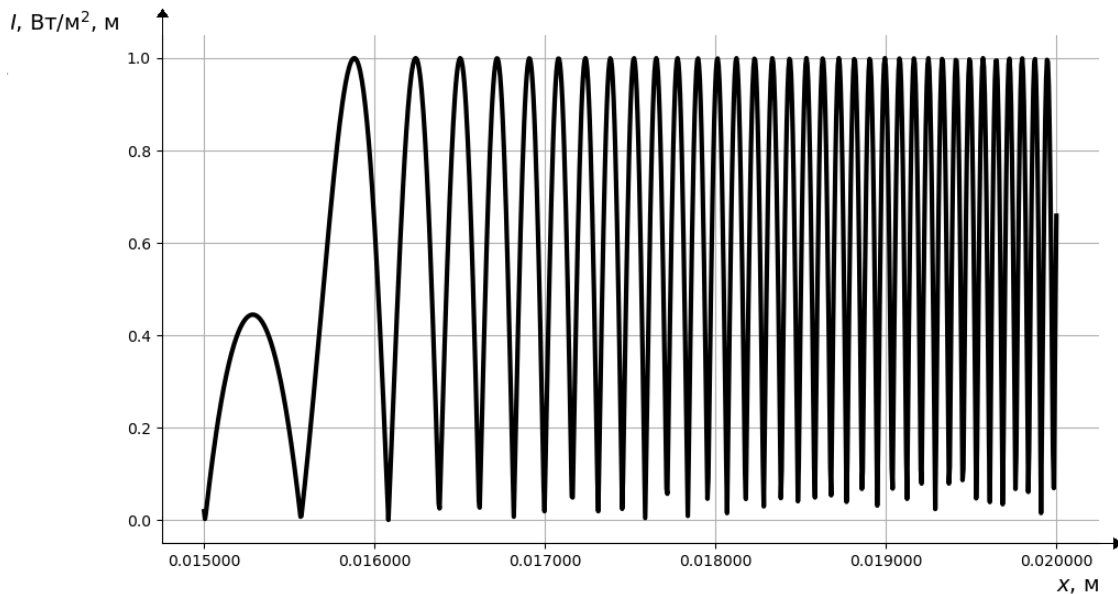
Анализ выражения (7) показывает, что, путём выбора соответствующих значений параметров d , Δd_i и F , имеется возможность изменять параметр $K_{\text{тл}}$ и, таким образом, регулировать чувствительность схемы голографической фотонной системы фазовой синхронизации в спутниковом радиоканале к величине параметра фазовой рассинхронизации.

Изменение разности фаз φ модулируемых световых потоков, формируемых точечными источниками света S_1 и S_0 , приведёт к соответствующему изменению параметров пространственно-спектрального распределения интенсивности оптического поля в плоскости интерферограммы, которое преобразуется в соответствующие кодовые комбинации позиционного цифрового двоичного кода, передаваемого в РУ (Рисунок 1). Для каждой кодовой комбинации этого кода РУ вырабатывает строго определённый сигнал коррекции параметров выходных колебаний ГСИ, который подаётся на управитель, изменяющий частоту и фазу выходных колебаний ГСИ.

На рисунке 3 для конкретных исходных данных представлена графическая зависимость распределения нормированной интенсивности светового потока в плоскости интерференции от координаты x . Исходные данные для проведения математического моделирования при построении этого графика представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

L_1 и L_2 , м	0,01
x , м	от 0,015 до 0,02, с шагом $0,5 \cdot 10^{-4}$
r_1 , м	0,05
r_0 , м	0,06
Δr_1 и Δr_0 , м	0

Рис. 3. График зависимости нормированной амплитуды оптического поля в плоскости интерференции от координаты X .

Анализ графической зависимости, представленной на рисунке 3, позволяет сделать вывод о том, что распределение нормированной интенсивности светового потока в плоскости интерференции имеет квазигармонический характер. При увеличении значения координаты x растёт порядок интерференционных полос и их пространственная частота, наблюдается всё более высокая чувствительность в изменении уровня интенсивности светового потока.

На рисунке 4 для конкретных исходных данных представлена графическая зависимость координаты максимума интерференционной полосы первого порядка $x_{\max,1}$ от параметра L_1 . Исходные данные для проведения математического моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Исходные данные для проведения математического моделирования

$L_1, \text{ м}$	от 0,0566 до 0,1, с шагом $1 \cdot 10^{-5}$
$L_2, \text{ м}$	0,16
$r_1, \text{ м}$	0,01
$r_0, \text{ м}$	0,05
Δr_1 и $\Delta r_0, \text{ м}$	0

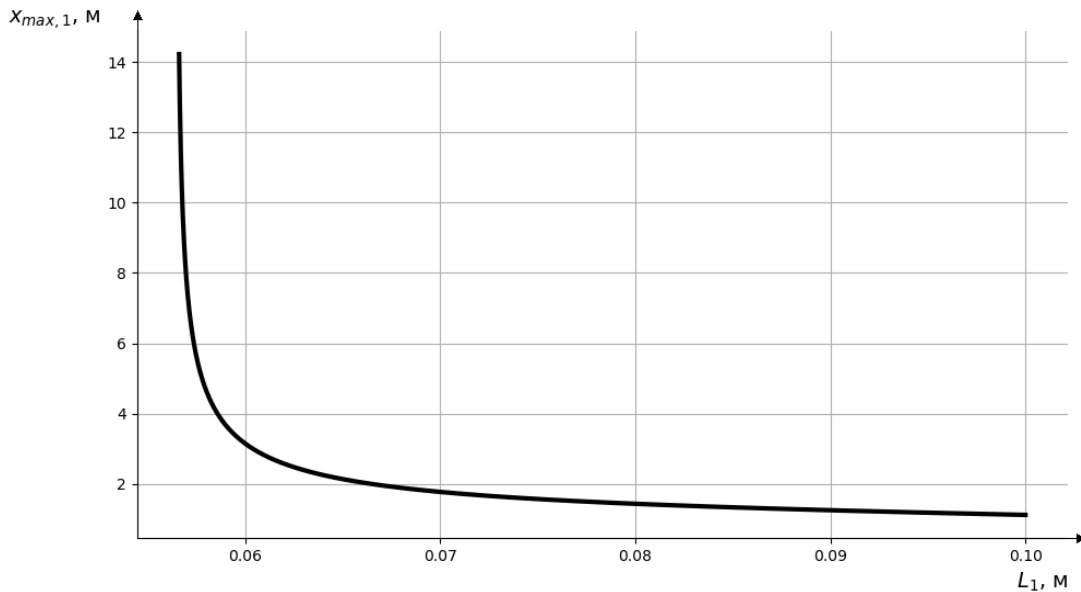


Рис. 4. График зависимости координаты $x_{\max,1}$ от параметра L_1 .

Графическая зависимость, представленная на рисунке 4, является сильно нелинейной и представляет собой функцию, похожую на убывающую экспоненту.

Для исходных данных, использованных при построении этого графика, величина изменения параметра L_1 вызывает большее, но различное по величине, перемещение в плоскости интерференции координаты $x_{\max,1}$. Наиболее высокая чувствительность к изменениям координаты $x_{\max,1}$ наблюдается при значениях параметра $L_1 \leq 0,06 \text{ м}$. При выполнении условия, что параметр $L_1 = 0,06 \text{ м}$ наблюдается резкий рост изменения значений координаты $x_{\max,1}$ при изменении значений этого параметра.

Для получения требуемой точности измерений необходимо путём моделирования и практических экспериментов подбирать значения параметра L_1 . Аналогичные выводы относятся к параметру L_2 .

На рисунке 5 для конкретных исходных данных представлена графическая зависимость координаты $x_{\max,1}$ от параметра Δr_1 . Исходные данные для проведения математического моделирования представлены в таблице 3.

Таблица 3. Исходные данные для проведения математического моделирования

$L_1, \text{ м}$	0,06
$L_2, \text{ м}$	0,16
$\Delta r_1, \text{ м}$	от $1 \cdot 10^{-5}$ до $9 \cdot 10^{-4}$, с шагом $0,1 \cdot 10^{-5}$
$r_1, \text{ м}$	0,01
$r_0, \text{ м}$	0,05
$\Delta r_0, \text{ м}$	0

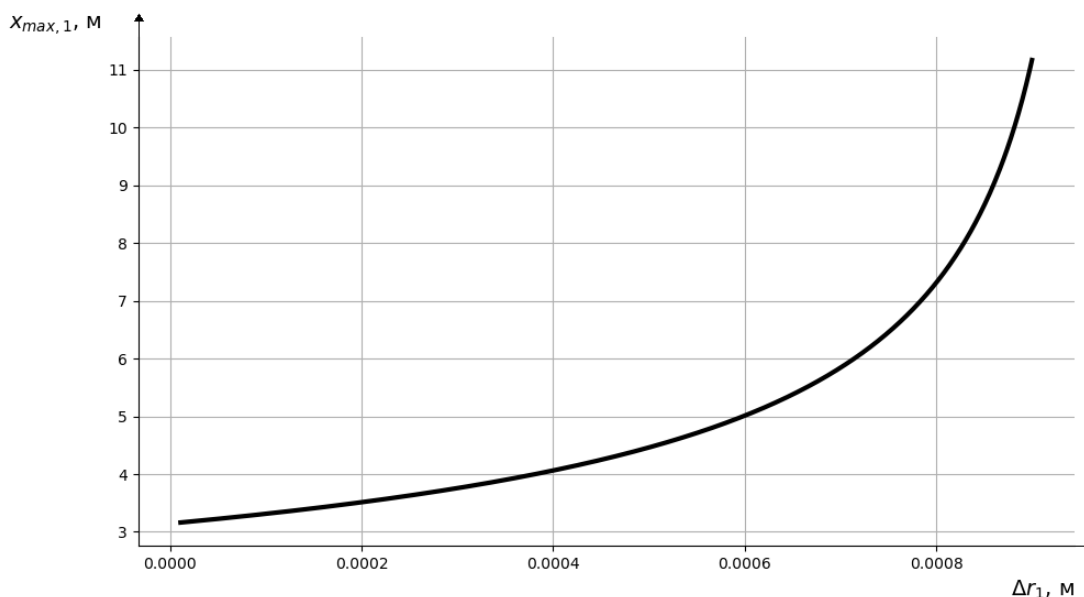


Рис. 5. График зависимости координаты $x_{\max,1}$ от изменения параметра Δr_1 .

Исследование графической зависимости координаты максимума интерференционной полосы первого порядка $x_{\max,1}$ от изменения параметра Δr_1 , обусловленных модуляцией оптического излучения в ЭОМ-1 (Рисунок 1) показывает, что эта зависимость является нелинейно возрастающей

при увеличении параметра Δr_1 . Имеется квазилинейный участок этой графической зависимости. Для исходных данных, указанных в таблице 3, изменение параметра Δr_1 в пределах от $2,86 \cdot 10^{-4}$ м до $5,71 \cdot 10^{-4}$ м, координата $x_{\max,1}$ изменяется в пределах от 3,71 м до 4,82 м. Таким образом, имеем изменения параметра $x_{\max,1}$ большее в примерно 3859 раз, чем соответствующее этому изменению параметра Δr_1 . Это свидетельствует о высокой чувствительности и потенциальной точности фотонной голографической системы синхронизации к разностному сигналу рассинхронизации выходных синхроимпульсов ГСИ и входных синхроимпульсов, поступающих на ЭОМ-1 из тракта радиоприёма (Рисунок 1).

Заключение

1) Анализ конструктивного исполнения голографической фотонной системы фазовой синхронизации показывает, что эта система, может быть, реализованная на практике с использованием конструктивных элементов, производимых отечественными предприятиями и организациями. При этом разработанная система фазовой синхронизации такого типа обеспечивает повышенные быстродействие и точность функционирования по сравнению с современными системами подобного назначения.

2) Голографическим элементом разработанной конструкции системы фазовой синхронизации спутникового радиоканала является объёмная отражательная Фурье-голограмма, обладающая физическими свойствами, обеспечивающими возможность улучшения технических характеристик системы фазовой синхронизации. Путём выбора соответствующих значений параметров оптических элементов схемы ДОС, имеется возможность изменять коэффициент усиления набега фазы светового потока путём использования системы из двух тонких собирающих линз и, таким образом, регулировать чувствительность схемы голографической фотонной системы фазовой синхронизации в спутниковом радиоканале к величине параметра фазовой

рассинхронизации. Исследование закономерностей изменения параметров интерферограммы в голографической фотонной системе фазовой синхронизации спутникового радиоканала показало актуальность практической реализации такой системы, обеспечивающей повышенные характеристики быстродействия и точности и имеющей повышенную чувствительность. Путём изменения параметров оптической схемы голографической системы фазовой синхронизации имеется возможность регулировки и выбора требуемых значений чувствительности и точности такой системы.

Финансирование: Работа подготовлена в рамках научной темы «Разработка беспилотных технологий на основе комплексной поэтапной оптимизации с редукцией экстремальных задач и инструментов нейро-нечёткого моделирования (FZNE-202 2-0006).».

Литература

1. Спилкер Д. *Цифровая спутниковая связь*. Москва, Связь. 1979. 592 с.
2. Куликов Г.В. Нгуен В.З. Влияние погрешностей синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов М-ФМ. *Russian Technological Journal*. 2019. Т.7. №5. С.47-61. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>
3. Дереча Е.В., Привалов Д.Д. Исследование алгоритма фазовой синхронизации GMSK-сигналов для низкоорбитальных систем спутниковой связи. *Техника радиосвязи*. 2017. №2. С.87-95.
4. Межведомственная программа исследований и разработок в области фотоники на 2017-2020 годы. Разработана на основании Протокола заседания президиума Совета при Президенте РФ по модернизации экономики и инновационному развитию России от 9 июля 2014 г. № 4. [web]. *Технологическая платформа "Фотоника"*. Дата обращения: 10.06.2023.
URL: http://www.photonica.cislaser.com/data/program_photonica_2017-2020.pdf

5. Прыгунов А.Г. Физические основы использования объемных отражательных голограмм в устройствах радиофотоники. *Электросвязь*. 2021. №8. С. 54-59. <http://doi.org/10.34832/ELSV.2021.21.8.009>
6. Прыгунов А.Г. Физические основы использования голографического интерферометра в фотонных телекоммуникационных устройствах. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2021. №2(42). С. 42 - 49. <http://doi.org/10.24412/2221-2574-2021-242-42-49>
7. Прыгунов А.Г. Анализ свойств избирательности объёмных голограмм в радиофотонных устройствах. *Журнал радиотехники* [электронный журнал]. 2021. №11. <http://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.5>
8. Андреев А.Н., Гаврилов Е.В., Ишанин Г.Г. *Оптические измерения*. Москва, Университетская книга. Логос. 2008. 416 с.
9. Кирилловский В.К., Точилина Т.В. *Оптические измерения. Часть 1. Введение и общие вопросы. Точность оптических измерений*. Санкт-Петербург, Университет ИТМО. 2017. 49 с.
10. Коломийцов Ю.В. *Интерферометры: Основы инженерной теории. Применение*. Ленинград, Машиностроение (Ленинградское отделение). 1976. 296 с.
11. Островский Ю.И. *Голографическая интерферометрия*. Москва, Наука. 1977. 336 с.
12. Островская Г.В. Голографическая интерферометрия физических процессов. *Журнал технической физики*. 2016. Т.86. №6. С.1-16.
13. Прыгунов А.Г. Физические основы использования объемных отражательных голограмм в устройствах радиофотоники. *Электросвязь*. 2021. №8. С. 54-59. <http://doi.org/10.34832/ELSV.2021.21.8.009>
14. Прыгунов А.Г. Особенности применения объёмных голограмм в фотонных устройствах телекоммуникационных систем. *Радиотехника*. 2023. Т.87. №1. С. 116-125.
15. Macario J. et al. Full spectrum millimeter-wave modulation. *Optics express*. 2012. Т.20. №21. С.23623-23629.

16. Ребрин Ю.К. *Управление оптическим лучом в пространстве*. Москва, Советское радио. 1977. 336 с.
17. Краснопахтич А.А., Прыгунов А.А., Прыгунов А.Г. Повышение чувствительности голографического измерителя путём использования тонкой собирающей линзы. *Конференция профессорско-преподавательского состава, сотрудников и обучающихся по итогам работы за 2013-2014 учебный год (в части молодёжной науки): сборник докладов НТК*. Ростов-на-Дону. 2014. С. 314-323.
18. Безуглов Д.А., Прыгунов А.Г., Трепачев В.В. Анализ дифракции света на эталонной голограмме при измерении перемещений объектов пространственно-спектральным методом. *Автометрия*. 1998. №5. С.21-28.
19. Прыгунов А.Г., Прыгунов А.А., Трепачёв В.В., Трепачёва А.В. Увеличение плотности энергии информационного поля оптического интерферометра дифракционным голографическим методом. *Современные проблемы радиоэлектроники. Материалы четвёртой научной международной конференции*. Ростов-на-Дону. 2012. С.178-181.
20. Прыгунов А.Г., Сизов В.П., Безуглов Д.А. Метод определения перемещений объектов на основе анализа волновых фронтов оптического поля с использованием эталонных голограмм. *Оптика атмосферы и океана*. 1995. Т.8. №6. С. 826-830.
21. Милер М. *Голография*. Ленинград, Машиностроение (Ленинградское отделение).1979. 207 с.

Для цитирования:

Прыгунов А.Г., Зуйков А.П., Лободинов В.С. Голографическая фотонная система фазовой синхронизации в спутниковом радиоканале. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.9.10>