

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.9>

УДК: 621.396, 535.4

## **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ**

**Б. А. Бараболя, Д. Д. Габриэльян, С. В. Караваев, А. В. Петухов, А. Г. Прыгунов**

**Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «Ростовский-на-Дону  
научно-исследовательский институт радиосвязи» (ФГУП «РНИИРС»)  
344038, г. Ростов-на-Дону, ул. Нансена, д. 130**

Статья поступила в редакцию 1 октября 2021 г.

**Аннотация.** В работе представлен результат теоретического исследования функционирования доплеровского измерителя частоты принимаемого радиосигнала. В исследуемом устройстве реализована возможность управления частотой излучения лазера сигналом, амплитуда которого пропорциональна доплеровскому смещению частоты принимаемого радиосигнала. Излучаемый лазером когерентный световой поток разделяется на два оптических пучка, с использованием которых формируется интерференционное распределение. При этом один из пучков проходит дополнительно через линию задержки, что приводит к фазовому сдвигу в формирующей его оптической волне. Величина этого фазового сдвига пропорциональна частоте излучаемого лазером оптического излучения, изменения которой вызывают соответствующие этому изменения пространственно-спектрального распределения интенсивности оптического поля в плоскости интерферограммы. Анализ изменений интенсивности оптического поля в центре интерферограммы позволяет определять изменение частоты излучения лазера, однозначно связанное с доплеровским сдвигом частоты принимаемого радиосигнала. В работе выявлена

противоречивость требований, предъявляемых к параметрам интерферометрической системы определения доплеровского сдвига частоты (коэффициенту пропорциональности преобразования доплеровского смещения частоты принимаемого радиосигнала в частоту излучения лазера и длительности задержки): большой динамический диапазон измерений и высокая разрешающая способность измерения доплеровского смещения частоты принимаемого радиосигнала. Предложен вариант обработки принимаемого радиосигнала, обеспечивающий одновременное выполнение этих требований. Предложенный алгоритм измерений реализует многошкальный принцип оценивания неизвестных параметров. Отмечено, что предложенный вариант обработки результатов измерений может быть реализован, как путём параллельной обработки в каналах с различными значениями коэффициентов преобразования, так и последовательной – при их итерационном изменении.

**Ключевые слова:** доплеровское смещение частоты, интерферометрическая система, доплеровский измеритель частоты, динамический диапазон, разрешающая способность при измерении.

**Abstract.** This work presents the result of the received signal measuring system for processing Doppler frequency theoretical research. In the researching device means of controlling laser frequency whose amplitude is proportional to the Doppler frequency shift of the received RF signal is realized. The coherent laser beam is divided in two forming interference pattern. In this case, one of the beams passes through the delay line, which leads to a phase shift in the optical wave. The rate of this phase shift is proportional to the laser frequency, changes in which cause corresponding changes in the interference pattern. Changes in the interference pattern in center analysis makes it possible to determine the changes of the laser frequency, which depends on Doppler frequency shift of the received RF signal. In this work opposition of the requirements for the Doppler frequency shift determination interferometric system parameters (the coefficient of proportionality to conversion Doppler frequency shift of the received RF signal in laser frequency and time delay) is discovered: large dynamic measurement range and high Doppler frequency shift measurement resolution. The processing the

received RF signal method is proposed. This method take into consideration these requirements. The proposed measurement algorithm implements the multiscale principle. It is pointed that the proposed processing the measurements results method can be implemented both the parallel processing in channels with different values of conversion coefficients, and sequential – with their iterative change.

**Key words:** Doppler frequency shift, interferometric system, Doppler frequency measuring system, dynamic range, measurement resolution.

## **Введение.**

Повышение эффективности использования околоземного космического пространства (ОКП) связано с информационным обменом между спутниками в составе спутниковых группировок не только через наземные станции, но и непосредственно по спутниковым каналам связи [1, 2].

Дальнейшее развитие аппаратуры межспутниковых радиоканалов состоит в использовании более высоких  $V$ - и  $W$ -диапазонов частот и применении сложных цифровых многопозиционных сигналов. Использование более высоких диапазонов частот обусловлено двумя факторами:

- расширение полосы рабочих частот, определяющей повышение пропускной способности канала радиосвязи;

- уменьшение массогабаритных параметров антенных систем ИСЗ, достижение узких диаграмм направленности антенн, способствующих помехозащищенности связи и ослаблению интерференционных помех.

Практическая реализация этих факторов обеспечивает высокую спектральную эффективность, информационную ёмкость и скорость передачи информации. Повышение рабочих частот в межспутниковых радиоканалах позволяет снизить массогабаритные характеристики приёмо-передающей аппаратуры, повысить энергетическую эффективность, скрытность и помехозащищённость каналов радиосвязи.

В то же время, ограничивающим фактором при организации спутниковых радиоканалов является эффект доплеровского смещения несущей частоты, негативно влияющий на качество связи, ухудшая соотношение «сигнал – шум», и увеличивающий число ошибок при демодуляции сигналов [3-5].

Как показано в [6] геометрическая интерпретация влияния доплеровского сдвига частоты в принимаемом сигнале заключается в повороте фазового созвездия квадратурного радиосигнала на некоторый угол. Начиная с некоторого значения угла возникающий поворот созвездия, не позволяет правильно демодулировать и соответственно декодировать принятый радиосигнал, так как происходит полная замена его истинных состояний на соседние, ложные состояния. Величина допустимого поворота фазового созвездия зависит от размера алфавита манипулированного сигнала (числа возможных состояний). В [6] определены границы допустимого значения угла поворота фазового созвездия, при котором не возникает ошибка демодуляции.

Целью работы является повышение точности определения доплеровского смещения частоты в спутниковых каналах радиосвязи.

Решаемые задачи:

1. Разработка математической модели интерферометрической системы определения доплеровского сдвига частоты радиосигнала.
2. Исследование параметров интерферометрической системы определения доплеровского сдвига частоты радиосигнала.

### **1. Разработка математической модели интерферометрической системы определения доплеровского сдвига частоты радиосигнала.**

На рисунке 1 приведена структурная схема квадратурного когерентного демодулятора [6], включающего в себя интерферометрическую систему определения доплеровского сдвига несущей частоты (выделена пунктиром). Система определения доплеровского сдвига несущей частоты состоит из преобразователя частоты радиосигнала (ПР) в управляющее напряжение,

поступающее на лазер (Л), оптического делителя мощности (ДМ), линии задержки (ЛЗ), интерферометрического детектора (ИД), осуществляющего определение величины доплеровского сдвига несущей частоты.

Алгоритм обработки сигналов, на основе которого осуществляется определение доплеровского сдвига частоты радиосигнала, включает в себя следующие операции:

- выделение сигнала разностной частоты, формируемого на выходе смесителя, при подаче принимаемого и опорного сигналов;
- управление частотой излучения лазера сигналом разностной частоты;
- формирование лазером когерентного светового потока и деление его на два отдельных световых потока, фаза одного из которых изменяется фиксированной линией задержки;
- использование указанных световых потоков для формирования интерферограммы;
- анализ параметров интерферограммы для определения доплеровского сдвига частоты.

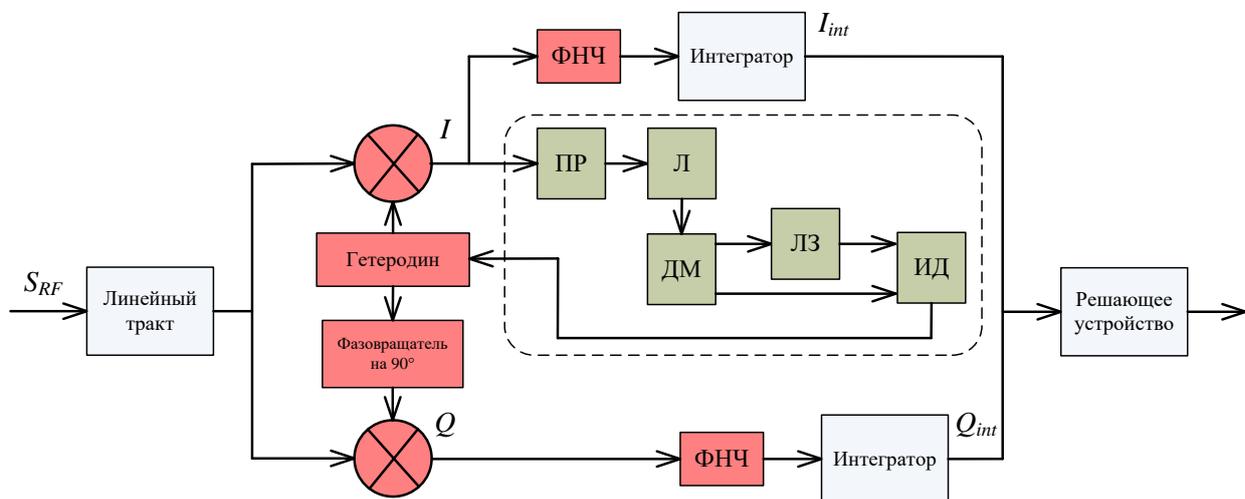


Рис. 1. Структурная схема квадратурного когерентного демодулятора с интерферометрической системой определения доплеровского сдвига частоты.

Сигнал, поступающий на вход интерферометрической системы измерений, запишем в виде:

$$S_{np}(t) = \sin((\omega_0 + \omega_D)t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$  - частота несущей излучаемого радиосигнала;  
 $\omega_D = 2\pi f_D$  - доплеровский сдвиг частоты, обусловленный относительным движением объектов, излучающего и принимающего радиосигнал;  
 $\varphi_0$  - начальная фаза радиосигнала.

На второй вход смесителя подаётся опорный сигнал:

$$S_{on}(t) = \sin(\omega_0 t + \varphi_1). \quad (2)$$

На выходе смесителя формируется сигнал разностной частоты, соответствующий доплеровскому сдвигу несущей частоты принятого радиосигнала:

$$S_{разн}(t) = \sin(\omega_D t). \quad (3)$$

Выделенный сигнал разностной частоты (3) подаётся на управляющий вход лазера, в результате чего выходной сигнал лазера будет определяться следующим соотношением:

$$S_{л}(t) = S_0 \sin((\omega_{л} + K\omega_D)t + \varphi_1 - \varphi_0), \quad (4)$$

где  $\omega_{л}$  - частота оптического излучения на выходе лазера при отсутствии сигнала на его управляющем входе.

С использованием светоделителя формируются два световых потока:

- световой поток на выходе первого канала, в который включена линия задержки

$$S_1(t) = \sin((\omega_{л} + K\omega_D)(t + \tau) + \Psi_1), \quad (5)$$

- световой поток на выходе второго канала

$$S_2(t) = \sin((\omega_{л} + K\omega_D)t + \Psi_2). \quad (6)$$

При интерференции указанных соосных световых потоков формируется интерферограмма, интенсивность оптического поля в плоскости которой определяется выражением

$$I(\omega_D) = I_0 \sin(K\omega_D \tau + \Psi_2 - \Psi_1). \quad (7)$$

Информативным параметром, на основе которого может быть определён доплеровский сдвиг частоты, является изменение интенсивности оптического

поля в центре интерферограммы по отношению к интенсивности оптического поля в той же точке при  $\omega_D = 0$

$$I(0) = I_0 \sin(\Psi_2 - \Psi_1). \quad (8)$$

В частности, при  $\Psi_2 - \Psi_1 = 0$ , получаем  $I(0)$ .

Соотношения (1) ÷ (8) представляют математическую модель интерферометрической системы определения доплеровского сдвига частоты, с использованием которой могут быть проведены исследования взаимосвязи её параметров с динамическим диапазоном измерений и разрешением определения доплеровского сдвига частоты.

## 2. Исследование параметров интерферометрической системы определения доплеровского сдвига частоты радиосигнала.

Основными параметрами, определяющими динамический диапазон измерений и разрешение при определении доплеровского сдвига частоты, являются, как следует из соотношений (7) и (8), коэффициент преобразования  $K$  и величина времени задержки  $\tau$ . Функция  $I(\omega_D)$  является  $2\pi$ -периодической функцией. Следовательно, первым условием выбора значений параметров  $K$  и  $\tau$  является возможность обеспечения заданного динамического диапазона изменений доплеровского сдвига частоты, что приводит к следующему неравенству

$$K \cdot \tau \leq \left| 2\pi / \omega_{D \max} \right|, \quad (9)$$

где  $\omega_{D \max}$  - максимальный доплеровский сдвиг частоты, который должен измеряться рассматриваемой системой.

Второе условие, накладываемое на выбор параметров  $K$  и  $\tau$ , связано с обеспечением требуемого разрешения по определению доплеровского сдвига частоты.

При изменении доплеровского сдвига частоты на величину  $\Delta\omega_D$  уровень интенсивности оптического поля в центре интерферограммы изменится на величину

$$\Delta I_D = I_0 \cdot K \cdot \tau \cdot \cos(K\omega_D\tau + \Psi_1 - \Psi_2) \cdot \Delta\omega_D. \quad (10)$$

Величина изменения параметра  $\Delta I_D$  должна быть больше минимально регистрируемого изменения интенсивности оптического поля  $\Delta I_{рег}$ . В частности, при регистрации уровня интенсивности оптического поля  $M$  – разрядным АЦП минимальная величина параметра  $\Delta I_{рег}$  определяется равенством  $\Delta I_{рег}^{(min)} = I_0/2^M$ . Таким образом, достигаемое разрешение при определении доплеровского сдвига частоты радиосигнала определяется следующим образом:

$$I_0 \cdot K \cdot \tau \cdot \cos(K\omega_D\tau + \Psi_1 - \Psi_2) \cdot \Delta\omega_D^{(раз)} = I_0/2^M. \quad (11)$$

Таким образом, второе условие, определяющее требования к параметрам  $K$  и  $\tau$ , можно записать в виде:

$$K \cdot \tau \geq \frac{1}{2^M \cdot \cos(K\omega_D\tau + \Psi_1 - \Psi_2) \cdot \Delta\omega_D^{(раз)}}. \quad (12)$$

С учётом (9) и (12) можно отметить, что требования к параметрам  $K$  и  $\tau$  при обеспечении широкого динамического диапазона однозначных измерений значений  $\omega_D$  и точности измерений  $\Delta\omega_D$  являются противоречивыми. Преодоление указанного противоречия связано с использованием переменных значений параметров  $K$  и  $\tau$ , что, по своей сути, является реализацией принципа многошкальных измерений [7].

На первом этапе, с учётом ожидаемого значения  $\omega_D$ , из условия (9) определяются значения параметров  $K^{(1)}$  и  $\tau^{(1)}$ . Соответствующее этим значениям разрешение по измеряемому доплеровскому сдвигу частоты составляет

$$\delta\omega_D^{(1)} \geq \frac{\omega_D}{2^M \cdot 2\pi \cdot \cos(\Psi_1 - \Psi_2)}. \quad (13)$$

На втором этапе однозначность измерений обеспечивается для значения  $\delta\omega_D^{(1)}$ , а соответствующие значения параметров  $K^{(2)}$  и  $\tau^{(2)}$  определяются условием

$$K^{(2)} \cdot \tau^{(2)} \leq |2\pi/\delta\omega_D^{(1)}|. \quad (14)$$

С учетом того, что  $\delta\omega_D^{(1)} \prec \omega_D$ ,  $K^{(2)} \cdot \tau^{(2)} \succ K^{(1)} \cdot \tau^{(1)}$  разрешение при определении доплеровского сдвига частоты улучшается. При этом величина параметра  $\delta\omega_D^{(2)}$  составляет

$$\delta\omega_D^{(2)} \geq \frac{\delta\omega_D^{(1)}}{K^{(2)} \cdot \tau^{(2)} \cdot \cos(\Psi_1 - \Psi_2)}. \quad (15)$$

С учётом условий (13) и (14) соотношение (15) может быть представлено в виде

$$\delta\omega_D^{(2)} \geq \frac{\omega_D}{2^M \cdot (2\pi)^2 \cdot \cos(\Psi_1 - \Psi_2)}. \quad (16)$$

Число выполняемых итераций определяется требованиями к разрешающей способности и точности определения доплеровского сдвига частоты. Выбор изменяемых параметров (коэффициента усиления и постоянной времени задержки) определяется конкретным схемотехническим решением, зависящим непосредственно от конкретных требований по обеспечению диапазона измерений и разрешающей способности, и связан с выбором элементной базы, используемой для создания интерферометрической системы.

## **Заключение.**

1. Анализ интерференции двух световых потоков, формируемых в интерферометрической системе определения доплеровского сдвига частоты, позволил разработать математическую модель, на основе которой получена взаимосвязь основных параметров интерферометрической системы (коэффициента усиления и постоянной времени задержки) с диапазоном измеряемых значений и разрешающей способностью при определении доплеровского сдвига частоты.

2. Исследование разработанной математической модели показало, что требования к параметрам интерферометрической системы для расширения динамического диапазона измеряемых значений доплеровского сдвига частоты и повышения разрешающей способности являются противоречивыми.

Итерационное изменение коэффициента усиления и времени задержки обеспечивает возможность одновременного выполнения требований по расширению динамического диапазона и повышению разрешающей способности измерений при определении доплеровского сдвига частоты в радиоканале между объектами, движущимися относительно друг друга.

### Литература

1. Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. *Спутниковые сети связи*. Учеб. Пособие. Москва, Альпина Паблишер. 2004. 536 с.
2. Богатырев Е.В. *Разработка и исследование модемов помехозащищённых станций спутниковой и тропосферной связи*. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Красноярск, СФУ. 2018. 179 с.
3. Савченко В.И. *Исследование влияния эффекта Доплера на каналные сигналы в системах беспроводной связи*. Выпускная квалификационная работа. Белгород, НИУ «БелГУ». 2018. 69 с.
4. Ершов Р.А. *Методы оценки частотно-временных параметров широкополосных сигналов спутниковых систем связи*. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Нижний Новгород, ННГУ. 2017. 142 с.
5. Белов С.П., Рачинский С.А., Белов А.С., Белов АН.С., Ефимов Н.О. О влиянии Доплеровского сдвига частоты на помехоустойчивость спутниковых телекоммуникационных систем со сложными сигналами. *Научные ведомости Белгородского Государственного Университета. Серия: Экономика. Информатика*. 2017. №9 (258). С.179-186.
6. Бараболя Б.А., Караваев С.В., Мусинов В.М., Петухов А.В., Прыгунов А.Г. Оценка влияния доплеровского сдвига частоты на прием сигналов с фазовой манипуляцией в спутниковых каналах связи. *Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь»*. 2020. С.388-395.

7. Никольский Б.А. *Бортовые радиоэлектронные системы*. Самара, Самарский государственный аэрокосмический университет. 2013. 417 с.

**Для цитирования:**

Бараболя Б.А., Габриэльян Д.Д., Караваев С.В., Петухов А.В., Прыгунов А.Г. Разработка математической модели интерферометрической системы определения доплеровского сдвига частоты. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.9>