

## **Новый радиофотонный метод определения скорости и расстояния воздушных объектов**

Силаков К.А.

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ*

*420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10*

*E-mail: [industar61ld@gmail.com](mailto:industar61ld@gmail.com)*

*В докладе представлен новый радиофотонный метод одновременного определения радиальной скорости и расстояния до воздушных объектов. Метод основан на использовании двух блоков тандемной амплитудно-фазовой модуляции (ТАФМ) и зондирующего сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), имеющего симметричные последовательные чирпы. Проведено имитационное компьютерное моделирование работы системы в среде Optisystem. Результаты моделирования подтвердили возможность однозначного определения величины и направления радиальной скорости цели, а также расстояния до неё по измеренным значениям частотных компонент на выходе фотодетектора.*

*Ключевые слова: тандемная амплитудно-фазовая модуляция, линейная частотная модуляция, доплеровский сдвиг частоты*

## **A novel radio-photonic method for determining the velocity and range of aerial objects**

Silakov K.A.

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI*

*The report presents a novel radio-photonic method for simultaneous determination of radial velocity and distance to aerial targets. The method is based on the use of two tandem amplitude-phase modulation (TAPM) units and a linear frequency-modulated (LFM) probe signal with symmetric consecutive chirps. Computer simulation of the system operation was carried out in the Optisystem environment. The simulation results confirmed the possibility of unambiguous determination of the magnitude and direction of the target's radial velocity, as well as the distance to it, based on the measured frequency components at the photodetector output.*

*Keywords: tandem amplitude-phase modulation, linear frequency modulation, Doppler frequency shift*

### **Введение**

Ранее был представлен ряд радиофотонных радиолокационных систем [1, 2], использующих блоки тандемной амплитудно-фазовой модуляции (ТАФМ) и решающих задачу одновременного определения направления и величины радиальной скорости цели, преимущества которых в сравнении с распространенными схемами на модуляторах Маха-Цендера заключаются в возможности полного подавления неинформативной оптической несущей и получения более чистого промодулированного сигнала, в том числе в области гармоник высших порядков [3].

Современные РЛС представляют собой сложные системы, задачи которых не ограничиваются определением скорости цели, они способны извлекать большой объем информации о цели из эхо-сигнала, за счет чего могут определять большее количество параметров, например, производить одновременное измерение скорости цели и расстояния до нее. Таким образом, актуальна разработка радиофотонной

радиолокационной системы, построенной на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции, способной по параметрам отраженного эхо-сигнала одновременно определять как направление и величину радиальной скорости зондируемого объекта, так и расстояние до него. Ранее в результате проведения научных исследований было определено, что для построения такой системы оптимальным типом зондирующего сигнала является непрерывный сигнал с линейной частотной модуляцией и симметричными последовательными chirпами.

### Принцип работы

На рисунке 1 представлена структурная схема радиофотонной зондирующей системы, реализующей принципы нового радиофотонного метода одновременного определения скорости цели и расстояния до нее с использованием сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигнала) в качестве зондирующего и реализующего обработку радиолокационных сигналов в оптической области при помощи блоков тандемной амплитудно-фазовой модуляции.

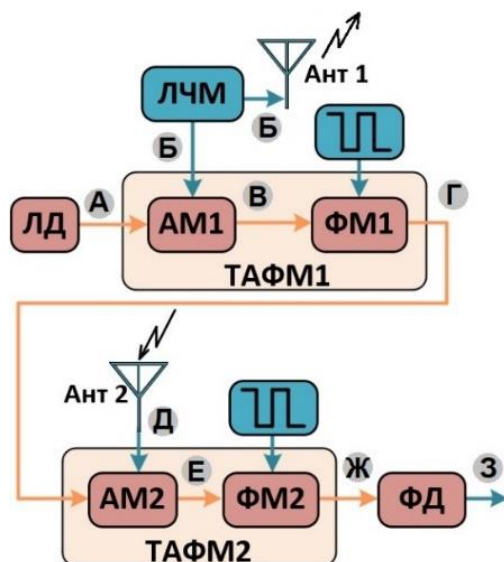


Рис. 1. Структурная схема нового радиофотонного метода: ЛД – лазерный диод; ТАФМ1-2 – блоки тандемной амплитудно-фазовой модуляции; АМ1,2 – амплитудные модуляторы; ФМ1,2 – фазовые модуляторы; ЛЧМ – источник ЛЧМ-сигнала; ФД – фотодетектор; Ант 1,2 – передающая и приемная антенны

Оптическая несущая  $f_c$  поступает на вход первого блока ТАФМ1, на который с источника ЛЧМ-сигнала подается зондирующий сигнал, спектр которого занимает полосу от  $f_1$  до  $f_2$ . С источника ЛЧМ-сигнала также посылается и на передающую антенну для излучения в пространство. Согласно принципу работы ТАФМ, в блоке ТАФМ1 формируются две копии исходного ЛЧМ-сигнала в виде боковых полос при полном подавлении неинформативной оптической несущей  $f_c$ . Далее с выхода ТАФМ1 сигнал поступает в блок ТАФМ2, в котором производится обработка принимаемого эхо-сигнала с устранением частотной модуляции и выделение информационных частот. Спектр принимаемого эхо-сигнала имеет некоторый сдвиг  $\Delta f$ , вызванный задержкой на распространение и ДСЧ, относительно исходного спектра ЛЧМ-сигнала. В результате работы блока ТАФМ2 формируется сигнал, спектр которого содержит информационные частоты  $f_{up}$  и  $f_{down}$ , образованные смещением соответственно возрастающих и убывающих сегментов исходного и принятого ЛЧМ-сигналов. Далее сигнал претерпевает оптико-электрическое преобразование на фотодетекторе ФД, на выходе

которого могут быть сформировано два вида спектра, содержащих частоты биений  $f_{bu}$  и  $f_{bd}$ , взаимное расположение которых зависит от знака ДСЧ, то есть от того, как направлена радиальная скорость зондируемой цели. Различить  $f_{bu}$  и  $f_{bd}$  в выходном сигнале можно на основании того, что частота  $f_{bu}$  формируется первой, так как используемый зондирующий сигнал содержит последовательные возрастающий и убывающий сегменты изменения частоты. Таким образом, предлагаемая радиофотонная система позволяет одновременно определять расстояние до цели, а также величину и направление ее радиальной скорости.

Дополнительно спектры сигналов на всех этапах работы предлагаемой системы представлены на диаграммах на рис. 2.

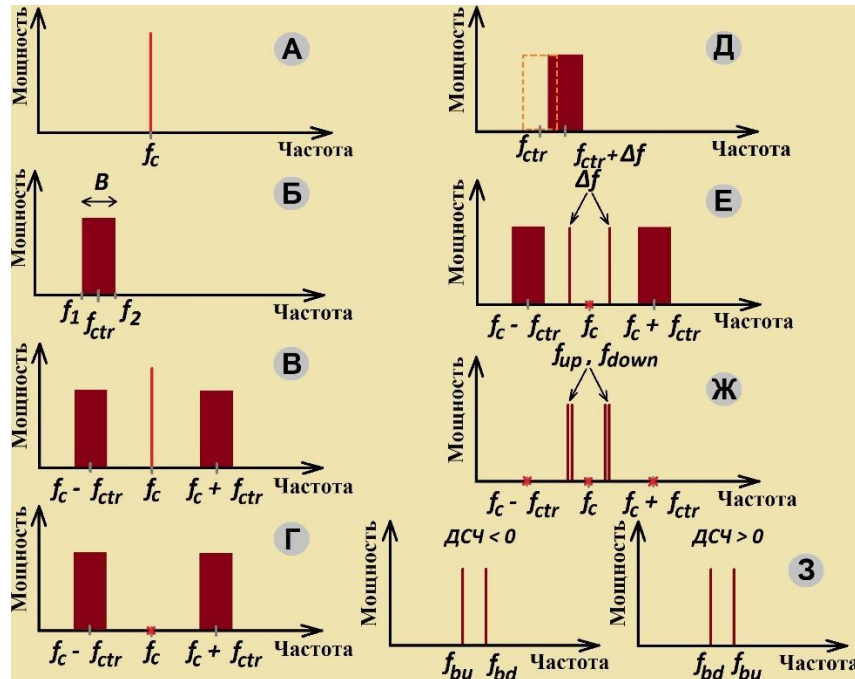


Рис. 2. Схематичное представление спектров сигналов на всех этапах работы системы

### Математическая модель

Оптический несущий сигнал, генерируемый в схеме лазерным диодом (ЛД), имеет частоту  $f_c$  и подается на первую систему ТАФМ (ТАФМ1).

Закон изменения частоты симметричного ЛЧМ-сигнала  $f_{LFM}(t)$  отражен формулой 1:

$$f_{LFM}(t) = \begin{cases} f_{min} + kt, & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ f_{max} - k \left( t - \frac{T}{2} \right), & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

где  $t$  – время;

$f_{min}$  – минимальная частота в спектре симметричного ЛЧМ-сигнала;

$f_{max}$  – максимальная частота в спектре симметричного ЛЧМ-сигнала;

$k$  – коэффициент (скорость) чирпа ЛЧМ-сигнала;

$T$  – период симметричного ЛЧМ сигнала.

Коэффициент чирпа можно найти по формуле 2:

$$k = \frac{2B}{T}, \quad (2)$$

где  $B$  – ширина спектра симметричного ЛЧМ-сигнала.

Ширина спектра симметричного ЛЧМ-сигнала по формуле 3:

$$kB = f_{max} - f_{min}. \quad (3)$$

Описанный симметричный ЛЧМ-сигнал обозначим  $f_p$ , он является зондирующим. Электрическое поле сигнала на выходе ТАФМ1  $E_{out1}$  можно описать следующим образом:

$$E_{out1} = \frac{\alpha_i E_{in}}{2\sqrt{2}} e^{j2\pi f_c t} [J_1(m_p, \phi_p) e^{j\pi f_p t} - J_1(m_p, \phi_p) e^{-j\pi f_p t}] \quad (4)$$

где  $E_{in}$  – амплитуда электрического поля лазерного излучения, поступающего на вход ТАФМ1;

$\alpha_i$  – потери, вносимые в сигнал одним блоком ТАФМ;

$J_1(m_p, \phi_p)$  – функция Бесселя первого рода первого порядка;

$m_p, \phi_p$  – параметры амплитудного и фазового преобразования в ТАФМ, зависящие от амплитуды подаваемого симметричного ЛЧМ сигнала.

Задержка  $\tau$  отраженного эхо-сигнала может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\tau = \frac{2R}{c}, \quad (5)$$

где  $R$  – расстояние до цели;

$c$  – скорость распространения электромагнитных волн в пространстве.

В формуле 5 в числителе стоит  $2R$ , так как посылаемый сигнал дважды проходит расстояние между зондирующей системой и целью.

Величина ДСЧ  $f_d$  может быть найдена по следующей формуле:

$$f_d = \frac{2vf_p}{c}, \quad (6)$$

где  $v$  – скорость цели.

В формуле 6 в числителе стоит  $2vf_p$ , так как в эхо-сигнал в процессе зондирования доплеровский сдвиг вносится дважды вносится – при отражении от цели и при получении его на приемной антенне.

Частоту эхо-сигнала  $f_s$ , отраженного от цели и принятого антенной, с учетом внесения задержки  $\tau$  и доплеровского сдвига  $f_d$ , можно выразить по формуле 7:

$$f_s(t) = f_p(t - \tau) + f_d. \quad (7)$$

Электрическое поле сигнала на выходе ТАФМ2  $E_{out2}$  можно описать формулой 8:

$$E_{out2} = \frac{\alpha_i^2 E_{in}}{4} e^{j2\pi f_c t} [J_1(m_p, \phi_p) J_1(m_s, \phi_s) (e^{j2\pi(f_p - f_s)t} + e^{-j2\pi(f_p - f_s)t})], \quad (8)$$

где  $J_1(m_s, \phi_s)$  – функция Бесселя первого рода первого порядка;

$m_s, \phi_s$  – параметры амплитудного и фазового преобразования в ТАФМ, зависящие от амплитуды принимаемого эхо-сигнала.

Взаимодействие спектров передаваемого и эхо-сигнала формирует спектральные компоненты  $f_{1-4}$ , частоты которых отражены формулой 9:

$$f_{1-4} = f_c \pm f_p(t) \pm f_s(t). \quad (9)$$

Часть компонент являются высокочастотными и не несут полезной информации. В выходном спектре блока ТАФМ2 наблюдаются спектральные информационные компоненты на следующих частотах:

$$f_c \pm k \cdot \tau \pm f_d. \quad (10)$$

Описанные в формуле 10 частотные компоненты ранее были обозначены как компоненты  $f_{up}$  и  $f_{down}$ .

Далее в спектре электрического сигнала на выходе фотодетектора формируются информационные компоненты  $f_{bu}$  и  $f_{bd}$  от смещения возрастающих и убывающих чирпов эталонного и эхо-сигнала соответственно. Данные информационные компоненты можно найти по формулам 11 и 12:

$$f_{bu} = 2(k \cdot \tau + f_d), \quad (11)$$

$$f_{bd} = 2(k \cdot \tau - f_d). \quad (12)$$

Информационные компоненты на фотодетекторе формируются на удвоенных частотах вследствие отсутствия в оптическом сигнале центральной несущей частоты  $f_c$ .

Зная величины  $f_{bu}$  и  $f_{bd}$ , можно вычислить задержку эхо-сигнала  $\tau$  по следующей формуле:

$$\tau = \frac{f_{bu} + f_{bd}}{4k}. \quad (13)$$

Значение ДСЧ в отраженном эхо-сигнале можно найти по следующей формуле:

$$f_d = \frac{f_{bu} - f_{bd}}{4}. \quad (14)$$

Формулы для нахождения скорости цели  $v$  и расстояния до цели  $R$  по задержке  $\tau$  и величине ДСЧ  $f_d$  имеют следующий вид:

$$v = \frac{cf_d}{2f_p}, \quad (15)$$

$$R = \frac{c\tau}{2}. \quad (16)$$

В качестве  $f_p$  может быть взята центральная частота в спектре ЛЧМ-сигнала:

$$f_p = \frac{f_{max} - f_{min}}{2}. \quad (17)$$

Тогда формула нахождения скорости цели принимает следующий вид:

$$v = \frac{cf_d}{f_{max} - f_{min}}. \quad (18)$$

### Имитационное моделирование

Схема моделирования представлена на рис. 3. Подробно разберем устройство и особенности функционирования блоков.

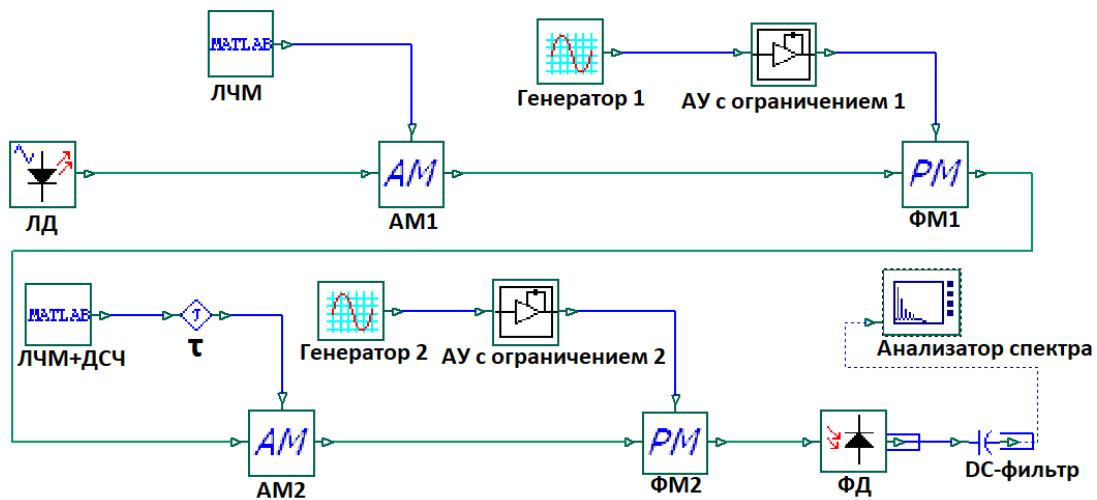


Рис. 3. Схема моделирования нового метода в Optisystem: ЛД – лазерный диод; AM1-2 – амплитудные модуляторы в составе систем ТАФМ1-2; ФМ1-2 – фазовые модуляторы в составе системы ТАФМ1-2; ЛЧМ – блок, формирующий ЛЧМ-сигнал; Генератор 1-2 – генераторы синусоидального сигнала; АУ с ограничением 1-2 – амплитудные усилители с ограничением амплитуды; ЛЧМ+ДСЧ – блок, формирующий ЛЧМ-сигнал с ДСЧ;  $\tau$  – внесение задержки сигнала на распространение; ФД – фотодетектор; DC-фильтр – фильтр постоянной составляющей

Для генерации симметричного ЛЧМ-сигнала используется блок MATLAB Component. Данный блок на схеме моделирования обозначен как блок ЛЧМ. Используется блок генератора синусоидального сигнала (Генератор 1), сигнал с которого поступает на амплитудный усилитель сигнала с ограничением амплитуды (АУ с ограничением 1). На выходе блока АУ с ограничением формируется сигнал меандра.

Для моделирования прихода отраженного эхо-сигнала используются компоненты MATLAB Component и Electrical Signal Time Delay. MATLAB Component (блок ЛЧМ+ДСЧ) используется для вызова соответствующего скрипта MATLAB, который формирует сигнал нужной структуры с некоторым доплеровским смещением. Electrical Signal Time Delay (блок задержки  $\tau$ ) вносит в сформированный сигнал заданную задержку по времени.

Спектр полученного сигнала можно наблюдать в окне компонента RF Spectrum Analyzer (блок Анализатор спектра). При необходимости в схеме перед блоком анализатора спектра может быть использован фильтр нижних частот.

В параметрах блока лазерного диода установлена частота излучения 193,1 ТГц и ширина излучения  $100 \cdot 10^{-12}$  МГц, а мощность излучения равна 10 дБм. Лазерный диод подает узкополосную несущую на частоте  $f_c = 193,1$  ТГц на вход системы ТАФМ1. Используем непрерывный симметричный ЛЧМ-сигнал с частотами  $f_{min} = 4,5$  ГГц,  $f_{max} = 6,5$  ГГц, общей длительностью возрастающего и убывающего чирпов 20 мкс и защитным интервалом между пачками чирпов длительностью 20 мкс. В качестве сигнала коммутации фазы используется меандр с частотой 11 ГГц. Такие параметры сигнала коммутации фазы позволяют полностью подавить в сигнале оптическую несущую  $f_c$  и получить боковые полосы на тех же местах в спектре. Спектр сигнала на выходе ТАФМ1, полученный в результате моделирования, приведён на рис. 5.

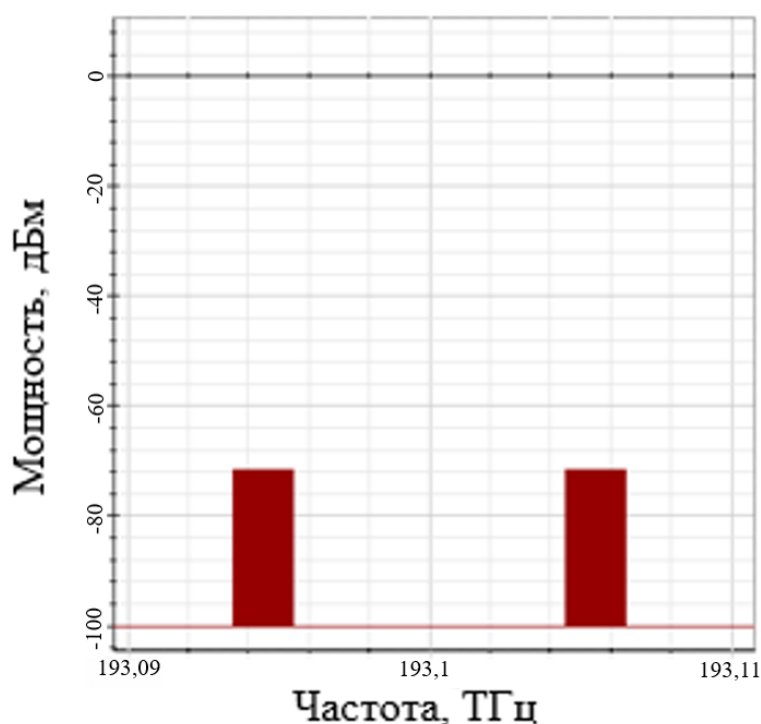


Рис. 5. Спектр сигнала на выходе ТАФМ1

Используется ДСЧ величиной 1 МГц и временная задержка на величину 5 мкс.

В результате смещения спектров эталонного (передаваемого) и принятого эхо-сигнала и операции дечирпирования, производимых блоком ТАФМ2 на его выходе формируются пары информационных компонент по сторонам от подавленной несущей (рис. 6).

Полученный сигнал далее был протестирован. Был получен следующий спектр электрического сигнала (рис. 7).

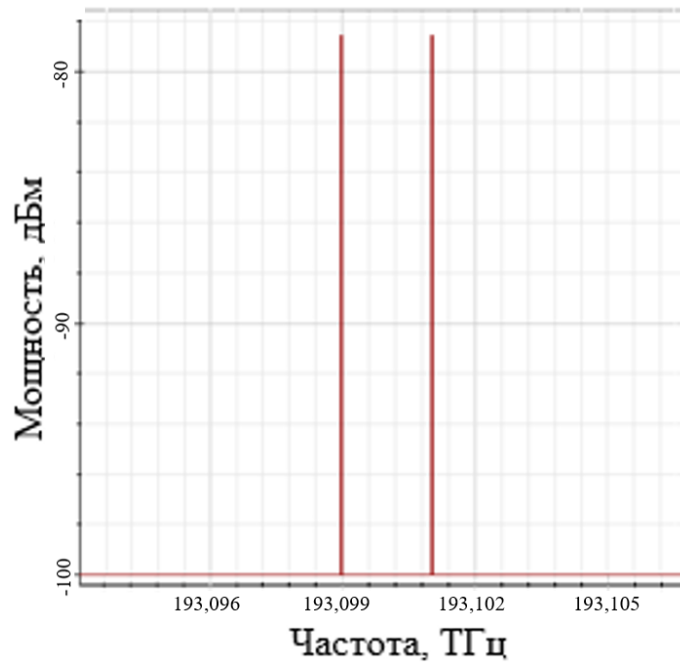


Рис. 6. Спектр сигнала на выходе ТАФМ2

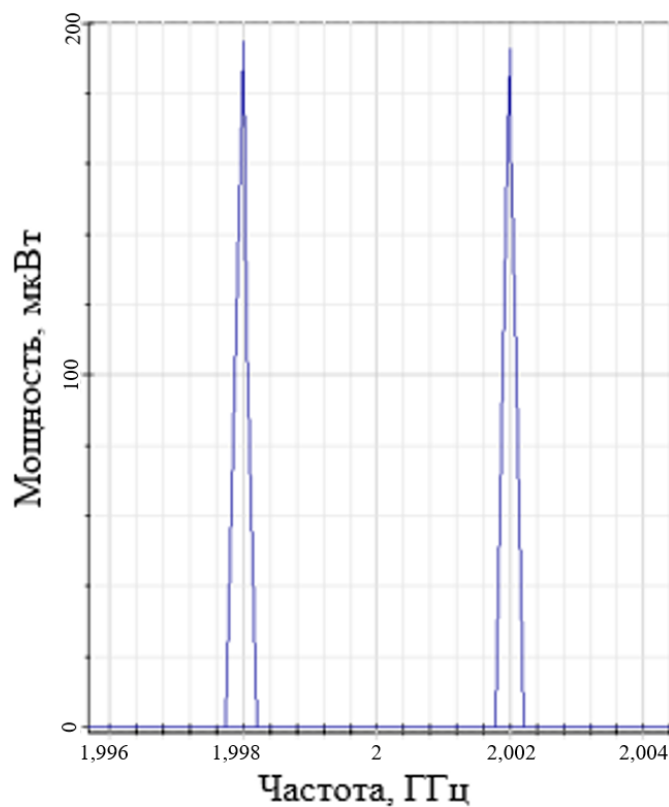


Рис. 7. Информационные компоненты на выходе блока ФД  
для ДСЧ = 1 МГц,  $\tau = 5$  мкс

В данном случае наблюдаются две компоненты на частотах 1,998 ГГц и 2,002 ГГц. Какая из этих компонент является  $f_{bu}$ , а какая  $f_{bd}$ , можно определить по времени формирования этих компонент на выходе фотодетектора ФД. Частотная компонента, формирующаяся первой, соответствует частоте  $f_{bu}$ , следующая – частоте  $f_{bd}$ . В данном случае известно, что  $f_{bu} = 2,002$  ГГц, а  $f_{bd} = 1,998$  ГГц.

Для проверки работы системы найдем величину ДСЧ и времени задержки по значениям  $f_{bu}$  и  $f_{bd}$ .

Рассчитаем величину доплеровского сдвига  $f_d$  эхо-сигнала:

$$f_d = \frac{f_{bu} - f_{bd}}{4} = \frac{2,002 \cdot 10^9 - 1,998 \cdot 10^9}{4} = 1 \text{ МГц.} \quad (19)$$

Рассчитаем величину временной задержки эхо-сигнала, предварительно найдя коэффициент чирпа для используемого ЛЧМ-сигнала.

Коэффициент чирпа для рассмотренного ЛЧМ-сигнала находится следующим образом:

$$k = \frac{2B}{T} = \frac{2(f_{max} - f_{min})}{T} = \frac{2(6,5 \cdot 10^9 - 4,5 \cdot 10^9)}{20 \cdot 10^{-6}} = 2 \cdot 10^{14} \frac{\text{Гц}}{\text{с}}. \quad (20)$$

Следовательно, далее можно рассчитать задержку эхо-сигнала  $\tau$ :

$$\tau = \frac{f_{bu} + f_{bd}}{4k} = \frac{2,002 \cdot 10^9 + 1,998 \cdot 10^9}{4 \cdot 2 \cdot 10^{14}} = 5 \text{ мкс.} \quad (21)$$

Знак ДСЧ  $f_d$ , а значит и направление скорости цели можно определить, сравнив значения частот  $f_{bu}$  и  $f_{bd}$ . В данном случае  $f_{bu} > f_{bd}$ , следовательно ДСЧ имеет положительный знак, а радиальная скорость цели направлена навстречу зондирующей системе.

Полученные в результате компьютерного моделирования спектры сигналов полностью соответствуют своему теоретическому виду, что говорит о корректном функционировании системы на практике. Величины ДСЧ и времени задержки на распространение, найденные по значениям информационных компонент, равны значениям, заложенным в сигнал при моделировании.

## Выводы

Предложенная радиофотонная радиолокационная система способна одновременно определять как радиальную скорости цели, так и расстояние до нее по величине доплеровского сдвига частоты и величине сдвига частоты эхо-сигнала вследствие задержки сигнала на распространение в пространстве. Система построена на основе блоков тандемной амплитудно-фазовой модуляции и обладает всеми преимуществами, присущими такому подходу к модулированию оптического сигнала перед применением модуляторов Маха-Цендера. В качестве зондирующего сигнала используется непрерывный линейный частотно-модулированный сигнал с симметричными последовательными чирпами, что позволяет однозначно разделить вклад доплеровского смещения и сдвига частоты отраженного сигнала вследствие задержки на распространение в общий частотный сдвиг эхо-сигнала относительно эталонного передаваемого сигнала. Результаты компьютерного моделирования говорят о работоспособности системы и достоверности реализуемых ею измерений в рамках заложенных в работу системы параметров зондирующего сигнала и конфигурации тандемной амплитудно-фазовой модуляции.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №23-79-10059.*

## Литература

1. Силаков К.А., Викулов К.В., Денисенко П.Е., Иванов А.А. Радиофотонный метод определения доплеровского изменения частоты // Оптические технологии в телекоммуникациях: материалы XX Международной научно-технической конференции. Уфа: 2022. С. 333-334.
2. Силаков К.А., Викулов К.В., Денисенко П.Е., Денисенко Е.П. Развитие доплеровских измерителей скорости на основе радиофотонных архитектур // Прикладная



электродинамика, фотоника и живые системы – 2023: материалы X Международной молодежной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Казань: 2023. С. 333-334.

3. Морозов О.Г., Морозов Г.А., Ильин Г.И., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж., Ростокин И.Н., Иванов А.А., Лустина А.А., Денисенко Е.П., Денисенко П.Е., Андреев В.Д. Радиопотонный метод определения доплеровского изменения частоты отражённого радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. Йошкар-Ола: 2021. № 2(50). С. 63-75.