

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОФОТОННОГО МОДУЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ПРИХОДА РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА



Денисенко Е.П., Искрин М.Е.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им.  
А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Российская Федерация

Целью данной работы является подтверждение работоспособности радиотонного модуля определения угла прихода (УП) радиолокационного сигнала и сравнения полученных практических данных с расчетными

Информация об УП может быть использована для минимизации мощности сигнала помехи при максимальном увеличении мощности искомого сигнала и улучшения эффективности работы РЛС.

В РЛС слежения УП отраженного сигнала должен быть определен для регулировки направления наведения ДН РЛС так, чтобы объект оставался в центре луча зондирования. Кроме того, определение УП необходимо для систем радиоэлектронной борьбы, систем широкополосной мобильной связи поколения 5G и др.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОФОТОННОГО МОДУЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ПРИХОДА РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА



Денисенко Е.П., Искрин М.Е.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им.  
А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Российская Федерация

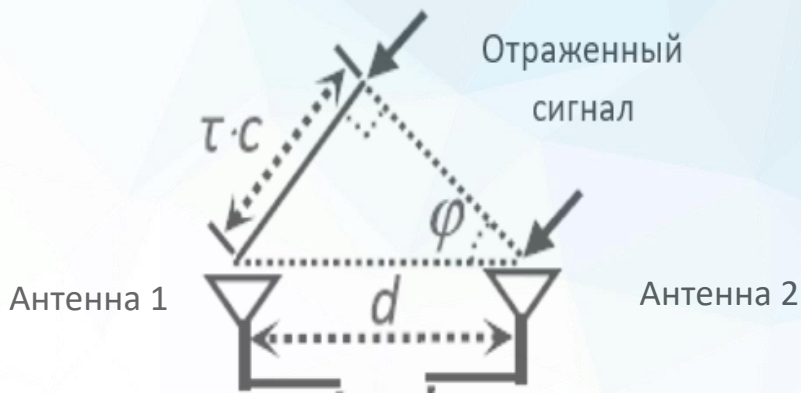


Рис. 1. Ситуационное положение элементов ФАР и фронта падающей волны микроволнового сигнала, отраженного от объекта

В фазированных антенных решетках в режиме приема входящий сигнал, отраженный от объекта, поступает на каждый антенный элемент с разным временем задержки  $\tau$  в зависимости от угла  $\varphi$  между источником сигнала и антенной решеткой из-за пространственного разнесения  $d$  между антенными элементами

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОФОТОННОГО МОДУЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ПРИХОДА РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА



Денисенко Е.П., Искрин М.Е.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им.  
А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Российская Федерация

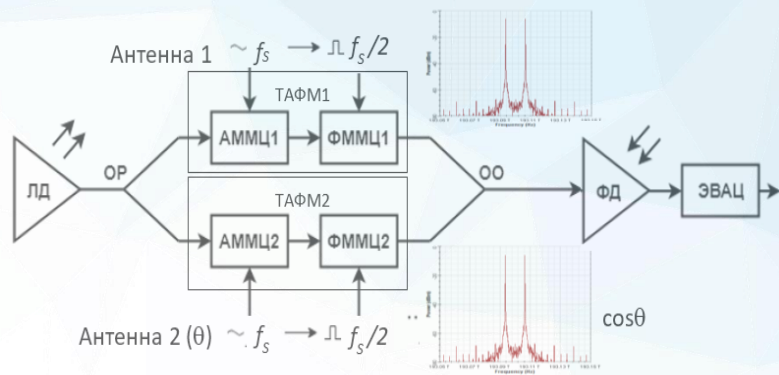


Рис. 2. Структурная схема радиофотонного модуля определения угла прихода радиолокационного сигнала

ЛД – лазерный диод; ОР – оптический разветвитель;  
ОО – оптический объединитель; ФД – фотодетектор;  
ЭВАЦ – электронный векторный анализатор цепей.

Блок электрооптических модуляторов построен на двух тандемных однопортовых амплитудного и фазового модуляторов (ТАФМ), состоящих из последовательно включенных амплитудного модулятора Маха-Цендера (АММЦ) и фазового (ФММЦ). Общая структура включения ТАФМ параллельная. На два параллельных ТАФМ1 и ТАФМ2, образующих измерительный канал, последовательно поступает отраженный от объекта микроволновый сигнал на частоте с временной задержкой  $\tau$ , величина которой определяется УП  $\varphi$ . При этом исходные компоненты оптического излучения на входе ТАФМ полностью подавляются, что существенно отличает предложенное решение от известных в лучшую сторону с точки зрения повышения точности измерений.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОФОТОННОГО МОДУЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ПРИХОДА РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА



Денисенко Е.П., Искрин М.Е.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Российская Федерация



Рис. 3. Общий вид макета

В устройстве используется узкополосный лазерный источник с распределенной обратной связью с центральной длиной волны 1550 нм и шириной линии менее 10 МГц. Выход устройства контролировался с помощью ЭВАЦ Rohde & Schwarz FSH8, обладающий диапазоном частот до 8 ГГц, с подключением к ПК через программу FSH8 View для сохранения результатов измерений в виде массивов данных. В качестве амплитудных модуляторов АММЦ был использован амплитудный модулятор Маха-Цендера предоставленный ПАО «ПНППК», Пермь (Рис. 4). Фазовая модуляция осуществлялась с помощью электрооптического модулятора Thorlabs LN53S-FC (Рис. 5). В качестве тестовой частоты использовалась частота 6,5 ГГц.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОФОТОННОГО МОДУЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ПРИХОДА РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА

Денисенко Е.П., Искрин М.Е.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Российская Федерация

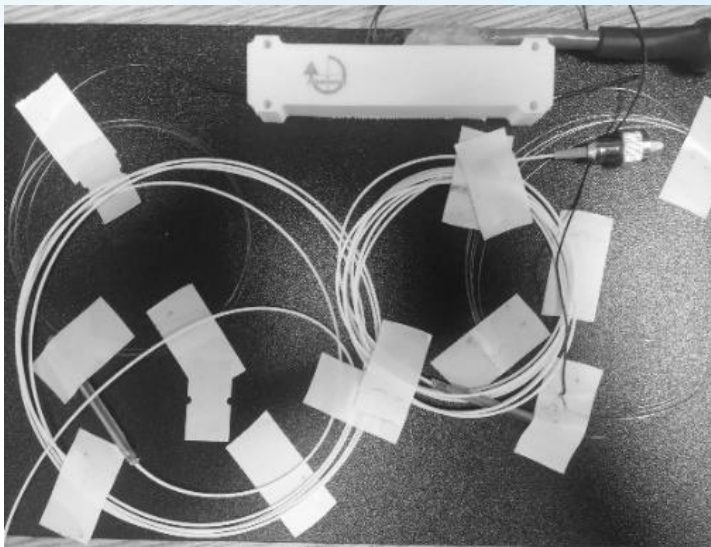


Рис. 4. Амплитудный модулятор Маха-Цендера  
(к рис. 3)



Рис. 5. Электрооптического модулятор  
Thorlabs LN53S-FC  
(к рис. 3)

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОФОТОННОГО МОДУЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ПРИХОДА РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА



Денисенко Е.П., Искрин М.Е.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Российская Федерация

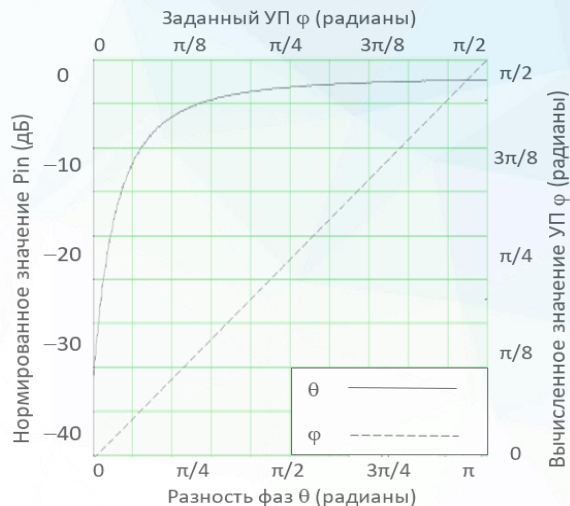


Рис. 6. Зависимость мощности информативной компоненты на частоте  $f_s$  разности фаз  $\theta$  и зависимость измеренного УП от заданного

Сплошной линией на рис. 6 показаны зависимость мощности информативной компоненты на частоте от разности фаз  $\theta$ , а пунктирной линией приведена зависимость измеренного УП от заданного. Графики приведены для погрешности определения амплитуд информативных составляющих в  $10^{-3}$  от полной шкалы измерений выходного тока фотодетектора.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОФОТОННОГО МОДУЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ПРИХОДА РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА



Денисенко Е.П., Искрин М.Е.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им.  
А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Российская Федерация

$$\varphi = \sin^{-1}(\theta/\pi).$$

Информационная пиковая мощность была измерена на ЭВАЦ Rohde & Schwarz FSH8 для разности фаз отраженного сигнала от 0 до  $\pi$ , смоделированных генератором специальных сигналов. На рис. 6 (сплошная линия, левая и нижняя шкалы) показано, что информационная пиковая мощность увеличивается с увеличением разности фаз отраженного сигнала.

Реально две антенны, подключенные к радиочастотным входам ТАФМ должны быть расположены практически на расстоянии  $d \sim \lambda/2$  ( $\approx 6,5$  МГц). При этом условии расчетное соотношение между УП и разностью фаз  $\theta$  будет определяться как  $\varphi = \sin^{-1}(\theta/\pi)$ . Вычисленное значение УП было получено на основе измеренных значений пиковой мощности и расчетных уравнений и также показано на рис. 6 (пунктирная линия, верхняя и правая шкалы).

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОФОТОННОГО МОДУЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ПРИХОДА РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА



Денисенко Е.П., Искрин М.Е.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им.  
А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Российская Федерация

Результат статистических оценок по массиву измерений показывает, что погрешность измерения УП в диапазоне от 0 до  $\pi/2$  составляет угол меньше  $\pm 1,7$  мрад. В идеальном случае информативная компонента равна 0 при разности фаз  $\theta=0$  и равна нормированной 1 при  $\theta=\pi$ . Однако на практике из-за несбалансированности сигналов на двух радиочастотных портах ТАФМ, отклонении параметров преобразования от оптимальных, нормализованная информативная пиковая мощность составляет около -35 дБ при разности фаз  $\theta=0$  и -2 дБ при разности фаз  $\theta=\pi$ .

**Выводы:** Экспериментальные результаты показывают, что измерение УП в диапазоне от 0 до  $\pi/2$  возможно с погрешностью менее  $\pm 1,7$  мрад при определении мощности информативной компоненты на частоте отраженного сигнала с погрешностью  $\pm 10^{-3}$ .

Контакты: Российская Федерация,  
420078, г. Казань, ул. Карла Маркса,  
д. 10  
e-mail для вопросов и обсуждения:  
greydeni@mail.ru



О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, Г.И. Ильин, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов, И.Н. Ростокин, А.А. Иванов, А.А. Лустина, Е.П. Денисенко, П.Е. Денисенко, В.Д. Андреев Радиофотонный метод определения угла прихода отраженного радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и информационные системы. 2021. № 1 (49). С. 50-62. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.50>