

17. Liou Y.C. Stoichiometric perovskite PMN-PT ceramics produced by reaction-sintering process, *Materials science and engineering: B*, 2003, 103 (3), pp. 281-284.
18. Sharapov V.M., Minaev V.G., Sotula Zh.V., Kunitskaya L.G. Elektroakusticheskie preobrazovateli [Electroacoustic transducers]. Moscow: Tekhnosfera, 2013, 296 p.
19. Bogush M.V. P'ezoelektricheskoe priborostroenie. T. III. P'ezoelektricheskie datchiki dlya ekstremal'nykh usloviy ekspluatatsii [Piezoelectric instrument making. Vol. III. Piezoelectric sensors for extreme operating conditions]. Rostov-on-Don: Izd-vo SKNTS VSh, 2006, 335 p.
20. Belinkur D., Kerran D., Zhaffe G. P'ezoelektricheskie i p'ezomagnitnye materialy i ikh primeneniye v ul'trazvuke [Piezoelectric and piezomagnetic materials and their application in ultrasound], *Fizicheskaya akustika* [Physical acoustics], Vol. 1, Part A., ed. by U. Mezona. Moscow: Mir, 1966, pp. 204-324.
21. Anan'eva A.A. Keramicheskie priemniki zvuka [Ceramic sound receivers]. Moscow, 1963.
22. Marakhovskiy M.A., Marakhovskiy V.A., Miryushchenko E.A., Panich E.A. Issledovanie vozmozhnosti sozdaniya novykh polifaznykh p'ezomaterialov dlya gidroakusticheskikh preobrazovateley. GA-2018 [Study of the possibility of creating new polyphase piezoelectric materials for hydroacoustic transducers. GA-2018]. Saint Petersburg, 2018, 616 p.
23. Marakhovskiy M.A., Nesterov A.A., Svirskaya S.N., Panich A.E. Izmeneniye mekhanizma spekaniya poroshkov p'ezomaterialov, kak sposob snizheniya temperatury formirovaniya plotnykh keramicheskikh karkasov [Changing the sintering mechanism of piezoelectric material powders as a way to reduce the formation temperature of dense ceramic frameworks], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2013, No. 2.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Мараховский Михаил Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: marmisha@mail.ru; г. Ростов-на-Дону; Россия; тел.: +79045015431; к.т.н.; начальник сектора.

Дыкина Любовь Александровна – e-mail: diykina@mail.ru; тел.: +79043415495; начальник лаборатории.

Филь Вадим Владимирович – e-mail: vfil@srfedu.ru; тел.: +79889968173; м.н.с.

Панич Александр Анатольевич – e-mail: rctt.rctt@mail.ru; тел.: +79034888887; д.т.н.; директор Института высоких технологий и пьезотехники.

Marakhovskiy Mikhail Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: marmisha@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79045015431; cand. of eng. sc.; head of the sector.

Dykina Lyubov Alexandrovna – e-mail: diykina@mail.ru; phone: +79043415495; head of the laboratory.

Fil Vadim Vladimirovich – e-mail: vfil@srfedu.ru; phone: +79889968173; junior researcher.

Panich Alexander Anatolievich – e-mail: rctt.rctt@mail.ru; phone: +79034888887; dr. of eng. sc.; director of Institute of High Technologies and Piezotechnics.

УДК 53.088.7

DOI 10.18522/2311-3103-2024-4-157-169

В.В. Сердюков, К.С. Коротков, А.В. Голан, А.Т. Маньшина, С.Е. Калужная

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОСТИ ФАЗ В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ И СВЧ ИНТЕРФЕЙСНЫХ МОДУЛЯХ СИСТЕМ СВЯЗИ С МНОГОУРОВНЕВЫМИ ФОРМАТАМИ МОДУЛЯЦИИ

Целью исследования является расчет и проектирование устройства, измеряющего разности фаз сигналов, с возможностью приема команд управления и передачи результатов через высокоскоростной Ethernet интерфейс. Любой современный измерительный прибор оптического или сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона имеет в своей конструкции важный элемент, без которого невозможно ни одно измерение, а именно – векторный вольтметр, измеряющий сдвиг фаз и отношение амплитуд сигналов. Реализацией таких приборов практически не занимаются и такие разработки в основном являются интеллектуальной собственностью крупных компаний, поэтому проектирование и создание такого устройства в широкодоступном исполнении крайне необходимо и актуально. Рассмотрены современные форматы модуляции и реализация транспондеров по

передаче оптических сигналов с использованием многоуровневых форматов квадратурной манипуляции фазовым сдвигом с двойной поляризацией (DP QPSK) и 16-ти позиционной квадратурно-амплитудной модуляции с двойной поляризацией (DP 16QAM). Так же рассмотрены основные методы построения векторных вольтметров с использованием микроконтроллеров и field programmable gate arrays (FPGA), произведено моделирование оптических каналов связи и создано устройство измерения сдвига фаз. В результате исследования получен векторный вольтметр на FPGA, который, в свою очередь, может быть использован для создания установки по измерению сдвига фаз смесителей с подключением по Ethernet интерфейсу для передачи данных. Также на языке аппаратного программирования Verilog HDL для FPGA Altera Cyclone V составлен программный код для электронно-вычислительной машины (ЭВМ) по измерению разности фаз двух гармонических сигналов. Реализована программа на языке СИ для процессора ARM Cortex A9 в среде Quartus Prime Lite в составе сверхбольшой интегральной схемы (СБИС) Cyclone V, передающая результаты измерений в реальном времени по интерфейсу 1GB на ЭВМ с возможностью приема команд управления.

ПЛИС; FPGA; смесители; сдвиг фаз; СВЧ; оптоэлектроника; векторный вольтметр; СБИС.

V.V. Serdukov, K. S. Korotkov, A.V. Golan, A.T. Manshina, S.E. Kaliuzhnaya

RESEARCH OF THE PHASE DIFFERENCE IN OPTOELECTRONIC AND MICROWAVE INTERFACE MODULES OF COMMUNICATION SYSTEMS WITH MULTILEVEL MODULATION FORMATS

The purpose of the study is to calculate and design the device that measures the phase differences of signals, with the ability to receive control commands and transmit the results via a high-speed Ethernet interface. Any modern measuring device of the optical or ultrahigh frequency (microwave) range has an important element in its design, without which no measurement is possible, namely, a vector voltmeter that measures the phase shift and the ratio of signal amplitudes. Practically no one is engaged in the implementation of such devices and such developments are mainly the intellectual property of large companies, therefore, the design and creation of such a device in a widely available version is necessary. We have considered modern modulation formats and the implementation of transponders for the transmission of optical signals using multi-level formats of quadrature phase shift manipulation with double polarization (DP QPSK) and 16-position quadrature amplitude modulation with double polarization (DP 16QAM), as well as the basic methods for constructing vector voltmeters using microcontrollers and field programmable gate arrays (FPGA), optical communication channels were simulated and a phase shift measurement device was created. As a result of our research, we obtained a vector voltmeter on an FPGA, which, in turn, can be used to create an installation for measuring the phase shift of mixers connected via an Ethernet interface. Also, in the Verilog HDL hardware programming language for the Altera Cyclone V FPGA, a program code has been compiled for an electronic computing machine to measure the phase difference of two harmonic signals. A C program has been implemented for the ARM Cortex A9 processor in the Quartus Prime Lite environment as part of the Cyclone V ultra-large integrated circuit (VLSI), transmitting measurement results in real time over the 1GB interface to a computer with the ability to receive control commands.

FPGA; mixers; phase shift; microwave; optoelectronics; vector voltmeter; VLSI.

Введение. Экспоненциальный рост потребности современного общества в скорости и объеме получения информации повышает требования к помехоустойчивости, защищенности и высокой пропускной способности ВОЛС. Перед инфокоммуникационными компаниями стоит проблема увеличения пропускной способности в существующих магистральных и локальных сетях [1]. Особое внимание заслужили новые форматы модуляции, использование которых возможно при использовании современного стационарного оборудования. Однако внедрение новых форматов модуляции невозможно без разработки более совершенных интерфейсных модулей, реализующих эти форматы. Подобные модули способны измерять не только амплитуду, но и фазу сигналов. В оптических интерфейсах зачастую измерение разности фаз может производиться интерференционными методами на компонентах интерфейсов до использования АЦП. В радиосистемах, если они низкоскоростные, (обычно они реализуются с помощью FPGA), задача измерения фазового сдвига решается программным способом – формированием аппаратной части из

вентилей. Однако при скоростях выше 1 Гб/с достичь требуемых параметров измерения фазового сдвига возможно лишь с применением более сложных систем наподобие ASIC (интегральная схема целевого применения) и NPU (блок сетевой обработки).

В связи с этим, необходимо произвести проектирование структурной и функциональной схемы устройства, измеряющего разности фаз сигналов.

Современные форматы модуляции в оптических системах связи. Модуляция как способ преобразования информации используется очень давно, начиная с импульсно-кодовой модуляции, которая использовалась на витой паре, до различных фазовых и амплитудных манипуляций в оптоволокне [2].

На оптических линиях связи возможно использование следующих форматов модуляции:

- ◆ ASK – амплитудная;
- ◆ PSK – фазовая;
- ◆ FSK – частотная;
- ◆ DPSK – дифференциальная фазовая;
- ◆ BPSK – двоичная фазовая;
- ◆ QPSK – квадратурная фазовая;
- ◆ QAM – квадратурная амплитудная модуляция.

Чаще остальных используются ASK, PSK форматы ввиду малой стоимости и простоты реализации. При более высоких скоростях, выше 10 Гбит/с, в этих форматах модуляции появляются различные нелинейные эффекты, что неблагоприятно сказывается на коэффициенте битовых ошибок (BER) [3]. Поэтому увеличение скорости до 40 Гбит/с и выше требует внедрения новых, более эффективных и менее восприимчивых к искажениям форматов модуляции. В последнее время активно исследовались и внедрялись различные форматы модуляции. Особое внимание получили: BPSK, QPSK, QAM [4–9].

Моделирование оптического канала связи. Наибольшую функциональную нагрузку в подсистеме приема-передачи сигналов ВОЛС выполняет транспондер, представляющей собой коммуникационное оборудование, выполняющее оптоэлектронное преобразование оптического сигнала [10]. Важной составляющей современных транспондеров является блок коррекции ошибок FEC [11, 12].

Для достижения до некоторой степени достоверных результатов при сравнении работы смоделированных оптоэлектронных схем необходимо приблизить параметры каждой систем к реальным настолько это возможно. Для достижения данной цели смоделирован оптический канал связи, который встроен в каждую смоделированную систему передачи.

Волоконная линия, состоящая из 4 регенерационных участков, представляет собой цепь из чередующихся волокон типа SMF и DCF. После каждого участка установлен соответствующий ему оптический усилитель для компенсации затухания. Общая длина канала связи составила 300 км.

В явном виде в моделях представлена только одна пара волокон, а требуемое количество участков достигнуто за счет использования закливания. Данная возможность программной среды позволяет не строить длинную цепь повторяющихся волокон (и другого оптоэлектронного оборудования), а представить только наименьшую единицу цепи и повторить ее произвольное количество. Характеристики используемых волокон представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики используемых волокон

Параметр	SMF-волокно	DCF-волокно
Затухание	$0,152 \frac{\text{дБ}}{\text{км}}$	$0,235 \frac{\text{дБ}}{\text{км}}$
Дисперсия	$20,2 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$	$-38 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$
Наклон дисперсии	$0,06 \frac{\text{пс}}{\text{нм}^2 \cdot \text{км}}$	$-0,12 \frac{\text{пс}}{\text{нм}^2 \cdot \text{км}}$
Коэффициент поляризационно-модовой дисперсии	$0,02 \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$	$0,05 \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$

Для фильтрации прошедшего волоконный тракт сигнала от шумов и помех перед приемником находится оптический фильтр с гауссовым профилем (Gaussian Optical Filter) с центральной длиной волны спектра 1550 нм, полосой пропускания 50 ГГц. После прохождения фильтра сигнал попадает на DP-QPSK или DP-16-QAM ресивер когерентного типа. Полная схема смоделированного канала связи изображена на рис. 1.

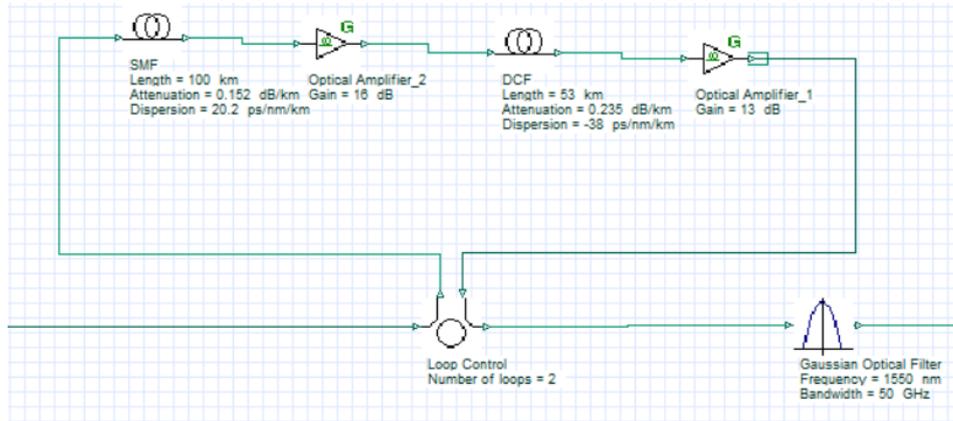


Рис. 1. Схема смоделированного канала связи

Для смоделированных оптоэлектронных схем проведена эмуляция работы в среде OptiSystem, результатом которой является совокупность численных результатов передачи, а именно Q-фактора и EVM.

Каждая схема подверглась передаче 65536 бит информации с различными скоростями передачи данных. Скорость передачи варьировалась в промежутке от 20 до 100 Гбит/с (с шагом в 20 Гбит/с). Параметр OSNR изменялся от 8 до 24 дБ с единичным шагом. В общей сложности произведено 85 вычислительных итераций. В результате каждой итерации сняты характеристики получившихся сигнальных созвездий, на основе полученных данных, был вычислен коэффициент битовых ошибок. После сбора всех полученных данных были построены соответствующие графики зависимости коэффициента битовых ошибок от соотношения «сигнал-шум» для обоих исследуемых форматов модуляции. Построенные графики представлены на рис. 2.

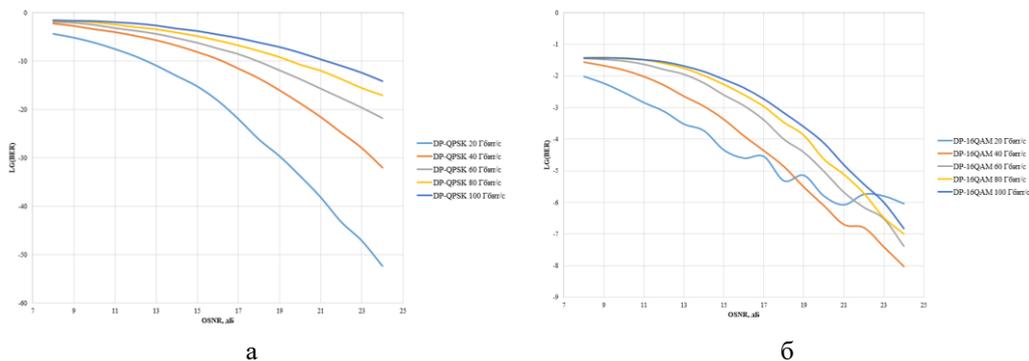


Рис. 2. Зависимость BER от OSNR: а – при DP-QPSK-модуляции; б – при DP-16QAM-модуляции

На основе рис. 2 можно сделать следующие выводы:

1. При использовании формата DP-QPSK проявляется линейная зависимость BER от OSNR на участке от 14 до 20 дБ, при формате DP16QAM линейность проявляется меньше.

2. У DP-QPSK-формата скорость изменения коэффициента битовых ошибок значительно выше, чем у формата DP-16QAM. К примеру, на скорости передачи данных 20 Гбит/с при переходе OSNR от 21 до 23 дБ наблюдается изменение BER на 10 порядков при DP-QPSK передаче, а при DP-16QAM передаче всего лишь на порядок.

Цифровые методы измерения фазы сигнала. В 2008 году компания Agilent Technologies объявила об изобретении нелинейного векторного анализатора цепей и создании новой системы X-параметров [13–17]. Помимо нового подхода к измерению активных устройств, работающих в нелинейных режимах (например, усилителей), данная технология открыла и новые возможности для измерения параметров смесителей. В 2009 году в университете Вайкато, г. Гамильтон, Новая Зеландия [18], а затем и в компании Agilent Technologies, США [19, 20], была разработана новая методика измерения параметров устройств с преобразованием частоты, в том числе и их сдвигов фаз, которая основана на применении генератора комбинационных частот – генератора гармоник.

В настоящее время разработано большое количество методов измерения фазы с использованием различных математических алгоритмов, реализуемых как программно на микроконтроллерах, так и на FPGA [21,22].

Схема измерителя представлена на рис. 3. Сигналы от источников S1 и S2 поступают в два идентичных канала, преобразуются в цифровой вид с помощью 14-разрядного АЦП и передаются в FPGA.

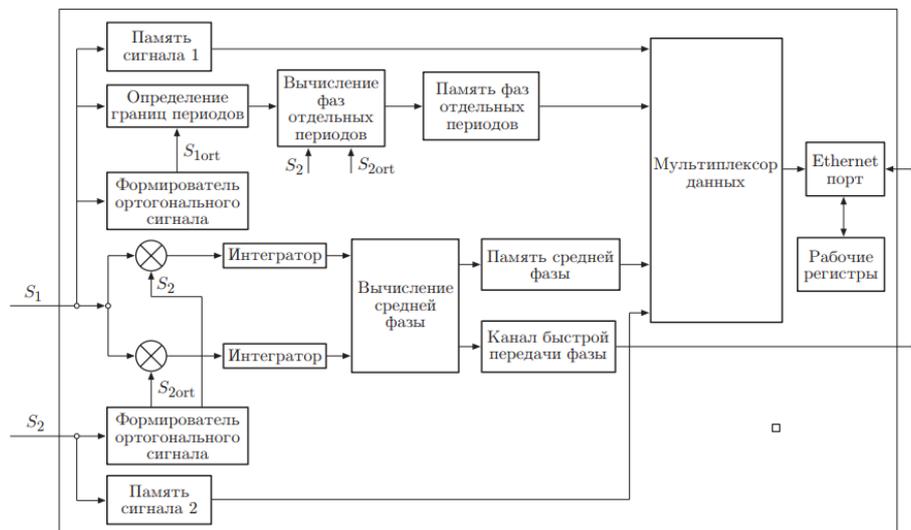


Рис. 3. Схема измерителя фаз на основе FPGA

В основе процесса измерения фазы лежит квадратурное синхронное детектирование. Для опорного сигнала S_2 задаётся ортогональная компонента S_{2ort} . Формируется эта компонента путём прохождения сигнала S_2 через цепочку регистров, запись в каждый последующий регистр осуществляется с задержкой, равной периоду тактовой частоты FPGA. Компонента S_{2ort} создаётся на основе сигналов S_{2i} и S_{2j} , взятых с выходов регистров i, j . При вычислении S_{2ort} используется линейная интерполяция.

Вычисление квадратурных компонент F_{sin} и F_{cos} (1), (2):

$$F_{sin} = \int_0^{nT} S_1 S_2 dt = \frac{nT}{2} \sin(\varphi_0), \quad (1)$$

$$F_{cos} = \int_0^{nT} S_1 S_{2ort} dt = \frac{nT}{2} \cos(\varphi_0), \quad (2)$$

где φ_0 – разность фаз между первыми гармониками S_1 и S_2 ; n – число периодов сигнала, в течение которого осуществляется интегрирование.

Далее разность фаз φ_0 находится как арктангенс отношения F_{\sin}/F_{\cos} . Арктангенс вычисляется с использованием итерационного алгоритма CORDIC [23, 24].

Подбор компонентов и выбор схемы реализации устройства, измеряющего фазу сигнала. На основе проведенного анализа методов модулирования несущей, используемых в современных системах связи, а также устройства интерфейсных модулей, непосредственно формирующих передаваемый сигнал, установлено, что:

- ◆ в интерфейсном модуле должны производиться измерение амплитуды и фазы сигнала;
- ◆ для увеличения скорости передачи данных интерфейсные модули, как правило, представляют собой либо специальные логические интегральные схемы (ASIC), либо программируемые пользователем вентильные матрицы (FPGA).

Задачами разрабатываемого устройства являются:

- ◆ оцифровка двух синхронизированных гармонических радиосигналов частотой 278 кГц;
- ◆ вычисление в реальном времени разности фаз и отношения амплитуд этих сигналов;
- ◆ передача обработанных данных на ПК по протоколу Ethernet.

Исходя из предъявляемых задач, можно сформировать требования к компонентам и схеме реализации разрабатываемого устройства, измеряющего фазу сигнала:

- ◆ наличие двух высокоскоростных АЦП большой разрядности;
- ◆ высокая скорость обработки данных;
- ◆ возможность проведения калибровок устройства, необходимых при изменении параметров измеряемых сигналов;
- ◆ наличие Ethernet модуля, поддерживающего работу со стандартами не ниже Fast Ethernet;
- ◆ устройство должно быть реализовано без использования навесного монтажа, для уменьшения влияния внешних помех.

Исходя из задач и требований программная обработка, реализованная на микроконтроллере, признана нецелесообразной из-за больших задержек при обработке и меньшей производительности микроконтроллеров по сравнению с аппаратными средствами. Так как для немассовых устройств применение ASIC является нецелесообразным по различным причинам, в первую очередь из-за высокой сложности разработки. Поэтому выбран СБИС с программируемой логикой Cyclone V от компании Intel [27].

Наиболее подходящей под требования является плата ADC-SoC от компании Terasic, показанная на рис. 4, где обозначены как элементы, подключенные к FPGA, так и к микропроцессору (обозначен как HPS) [28].



Рис. 4. Плата ADC-SoC

На основе проведенного анализа и с учетом выбранных компонентов обоснованы структурная и функциональная схемы, показанные на рис. 5.

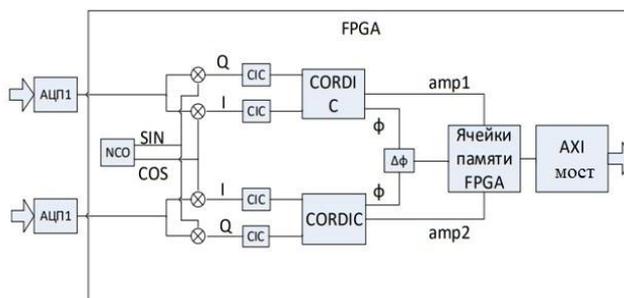


Рис. 5. Функциональная схема блока математической обработки сигналов

Особенностью данного чипа является то, что на одном кристалле расположены и FPGA, и микропроцессор ARM Cortex A9, имеющие возможность обмена данными с помощью шины AXI, что позволит разделить процессы обработки данных и их передачи [29].

Как видно из рисунка 5 оцифрованные сигналы подаются на цифровые смесители, где перемножаются с ортогональными колебаниями, сгенерированными NCO. На выходах смесителей для каждого входного сигнала фактически будут наблюдаться действительная и мнимая компоненты.

Далее подключаются CIC-фильтры, пропускающие только сигнал с частотой равной разности частот входного сигнала и гетеродина. Вычисление фазы и амплитуды каждого сигнала выполняется с помощью алгоритма CORDIC. Вычисление фазы может проводиться с точностью до десятых и сотых долей градуса. После чего рассчитывается разность фаз двух гармонических сигналов и отношение их амплитуд.

Проведя анализ сигналов, FPGA записывает полученные данные в ячейки памяти, к которым посредством AXI Bridge имеет доступ микропроцессор ARM Cortex A9 [28]. Микропроцессор, с установленной операционной системой на базе Linux, проводит расчет отношения амплитуд сигналов, переводит значение в градусы, формирует кадры протокола Ethernet и передает их на физический уровень.

Разработка на языке Verilog блока обработки измеряемых сигналов. Задача блока NCO, используя в качестве входного сигнала только тактирующие импульсы, генерировать гармонические колебания частотой 278 кГц. Чтобы получить нужную частоту сигнала на выходе, необходимо чтобы на входе конвейера CORDIC по каждому тактовому сигналу с шины «clk» по определенному алгоритму изменялась фаза. Программный код составлен в Quartus Prime Lite версия 18.0, являющейся частью дистрибутива Intel FPGA.

Для работы реализуемого алгоритма необходим мультипликативный преобразователь частоты. На рисунке 6 показана структурная схема цифрового преобразователя частоты. Отдельно произведен расчет и программная реализация CIC фильтра

Расчет и генерация программного кода CIC фильтра выполнялись в демонстрационной версии среды MATLAB 2021 с использованием расширения Filter Builder. Решено для расчета фазы использовать сигнал, являющийся разностью частот измеряемого сигнала и гетеродина. Таким образом, сигнал на выходе фильтра при неизменной амплитуде и разности фаз сигналов будет представлять собой некоторой постоянное значение, описываемое выражением $s(t) = \cos(\varphi)$, где φ – разность фаз измеряемого сигнала и гетеродина. Такая реализация значительно снижает требования к фильтру, т.к. позволяет подобрать минимум первого лепестка АЧХ равный сумме частот преобразуемых сигналов, не учитывая минимумы последующих лепестков.

С учетом описанных выше особенностей наиболее эффективен для применения в разрабатываемой программе децимирующий СИС фильтр, т.к. «прореживание» выходной последовательности данных при условии, что на выходе некоторое значение, изменяющееся в небольших пределах и невысокой скоростью, позволяет дополнительно снизить нагрузку на аппаратную составляющую.

Также программно реализован алгоритм CORDIC, вычисляющий фазу и амплитуду сигналов. Наиболее значимым элементом модуля `cordic_phase` является таблица углов поворота. Таблица углов задается внутри функции с использованием поведенческого блока `case`.

Модуль `rotator_phase` является ядром алгоритма CORDIC – именно данный модуль непосредственно выполняет операции сдвига. Объединенные в конвейер модули `rotator_phase` последовательным приближением вычисляют значения амплитуды и фазы каждого из измеряемых сигналов. Программный код модулей `cordic_phase` и `rotator_phase` имеет объем 78 и 53 строки соответственно.

Задачей модуля `PHASE_METER` является объединение описанных выше блоков и модулей в одну структуру, показанную на рис. 7.

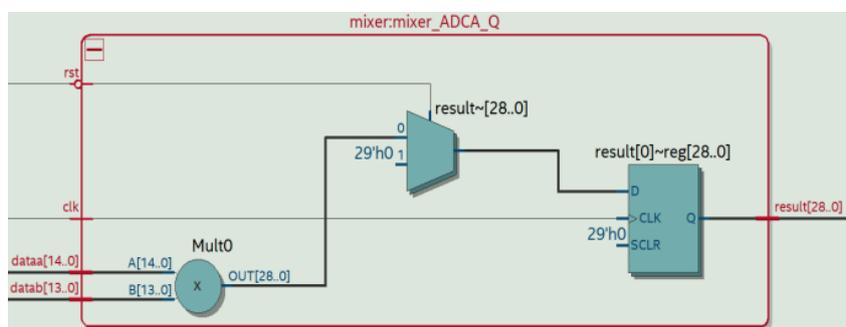


Рис. 6. Структурная схема цифрового преобразователя частоты

На структурной схеме кроме описанных выше модулей также присутствуют дополнительные регистры.

- ◆ input `clk` – тактовый сигнал;
- ◆ input `rst` – сигнал сброса;
- ◆ input[14:0] `data` – вход гетеродина, разрядность увеличена на 1 бит для передачи сигналов с учетом знака;
- ◆ input [13:0] `datab` – вход, соединяемый с АЦП.

Единственным выходной сигнал данного модуля – `result [28:0]`. Они необходимы для корректной передачи сигналов между модулями – отсутствие этих связующих регистров приводит к полной невозможности передачи данных следующему модулю.

В разрабатываемой системе ведущими блоками являются IP-ядра `Terasic_AD9254` (с подключенным IP-ядром `PHASE_METER`) и `Arria V/Cyclone V Hard Processor System`, ведомыми, соответственно, `On-Chip Memory (RAM or ROM)` `Intel FPGA IP` и `PHASE_METER`. Задачей блоков `Terasic_AD9254` (исходный код IP-ядра открыт) является управление АЦП и прием оцифрованных сигналов для дальнейшей обработки (блок подключен к физическим входам/выходам чипа).

С помощью `Lightweight HPS-to-FPGA` в `FPGA` из микропроцессора передаются команды на начало измерений и информация о количестве отсчетов АЦП, которые нужно принять и обработать. Все интерфейсы `Avalon Mapped-Memory` данного блока являются ведущими. Схема соединений IP-ядер, составлена с использованием среды системной интеграции `Platform Designer`.

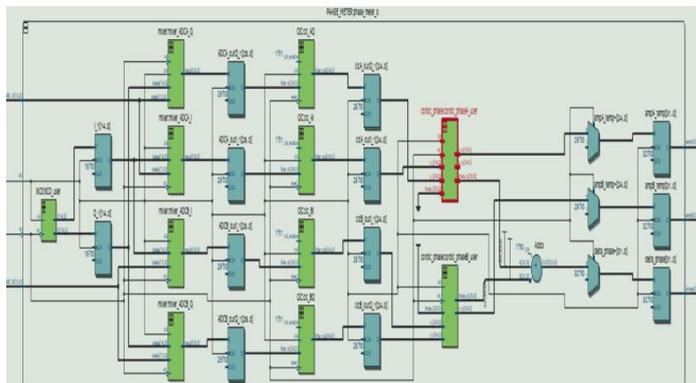


Рис. 7. Структурная схема модуля PHASE_METER

Для работы системы, необходимо чтобы в блоки PHASE_METER и Terasic_AD9254 поступили команды на начало измерений. Источником команд является микропроцессор, передающий команды с помощью моста Lightweight HPS-to-FPGA. Работа микропроцессора при взаимодействиях с FPGA определяется приложением, скомпилированным под ОС Linux и запускаемым из файлового пространства операционной системы. Смонтированный образ ОС Linux записан на флэш-карту, входящую в комплект поставки платы Terasic ADC-SoC. Работа через операционную систему избавляет от необходимости написания программного кода, реализующего передачу информации по Ethernet интерфейсу, т.к. уже содержит все необходимые драйверы. Погрешность измерения на собранном тестовом стенде, состоящем из генератора сигнала и созданное устройства. Для проведения измерений частота выходного сигнала на выходе генератора равнялась 278 кГц. Проведены две серии измерений: в первой – при постоянном отношении амплитуд изменялась разность фаз сигналов в диапазоне от -180° до 180° , во второй – при постоянной разности фаз изменялась амплитуда сигналов (отношение амплитуд сигналов на выходе генератора изменялась от -12 до 12 дБ с шагом 1 дБ). Погрешность измерения для разностей фаз и отношений амплитуд соответственно разработанного устройства не превышают $\pm 0,02$ дБ и $\pm 0,1$ дБ.

Заключение. Рассчитано и спроектировано устройство, измеряющее разность фаз сигналов, с возможностью приема команд управления и передачи результатов через высокоскоростной Ethernet интерфейс.

Для достижения цели, в инженерном программном обеспечении OptiSystem проведено моделирование работы транспондеров DP-QPSK и DP-16QAM форматов модуляции. На основе моделирования проанализированы полученные характеристики работы линии длиной 300 км на одной из несущих DWDM систем передачи при скорости передачи данных от каналообразующего оборудования до 100 Гбит/с, а также отношение сигнал-шум канала передачи в пределах от 8 до 24 дБ. В результате анализа определено, что требуемая полоса пропускания канала DWDM относительно формата NRZ при DP-QPSK модуляции уменьшается в 4 раза относительно потока каналообразующего оборудования, а при DP-16QAM модуляции – в 8 раз. Таким образом, для передачи потока в 100 Гбит/с DP-QPSK требует полосы пропускания канала 25 Гбит/с, а DP-16QAM – 12,5 Гбит/с.

Для применения в стенде по измерению фазовой задержки гетеродинного преобразования составлены структурная и функциональная схемы устройства, измеряющего разность фаз двух гармонических сигналов заданной частоты 278 кГц [29].

На языке аппаратного программирования Verilog для процессов, обрабатываемых FPGA, составлена программа объемом 818 строк для реализации функциональной схемы устройства, измеряющего разность фаз двух гармонических сигналов [30]. Также на языке программирования СИ составлена программа объемом 180 строк для микропро-

цессора ARM Cortex A9, входящего в состав СБИС Cyclone V. С помощью как готовых, так и самостоятельно созданных IP-ядер собрана логическая схема, для программирования FPGA.

На основании эксперимента определены относительные погрешности разработанного устройства, не превышающие $\pm 0,02$ и $\pm 0,1$ дБ при измерении разности фаз сигналов и отношения их амплитуд соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Наний О.Е., Трещиков В.Н.* Анализ форматов модуляции для систем DWDM со скоростью 40 Гбит/с // Вестник связи. – 2012. – № 1.
2. *Филиппов А.В., Мальцева Н.С.* Особенности развития систем DWDM // Технические средства систем управления и связи: Матер. V Международной конференции «Информационные технологии и технические средства управления». – Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2021. – С. 57-60.
3. *Величко М.А., Наний О.Е., Сусьян А.А.* Новые форматы модуляции в оптических системах связи // LIGHTWAVE Russian Edition. – 2005. – № 4.
4. *Листвин В.Н., Трещиков В.Н.* DWDM системы. – М.: Техносфера, 2015. – 296 с.
5. *Голоиков А.М.* Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика. – СПб.: Лань, 2018. – 419 с.
6. *Лучковский Д.П., Сухарев Е.Н., Куклина А.И.* Квадратурная амплитудная модуляция // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. – 2016. – № 15. – С. 50-51.
7. *Li M., Hong W., Zhang X., Li S., Song W., Han C., Zhu M., Li W., Huang D.* Transparent wavelength conversion for a novel orthogonal FSK/IM modulation format at 40-Gb/s based on FWM effect of SOA // Proceedings of SPIE. – 2008. – No. 12.
8. *Гуркин Н.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н.* Оптические когерентные DWDM системы связи с канальной скоростью 100 Гбит/с // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – № 4.
9. *Леонов А.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н.* Совершенствование форматов модуляции в оптических системах связи DWDM // Первая миля. – 2019. – № 1. – С. 30-37.
10. *Проскурин А.А., Близнюк В.И., Ивкин В.Б.* Реализационные аспекты разработки отечественного транспондера когерентных волоконно-оптических систем передачи со скоростью 100 Гбит/с // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 64-69.
11. *Гуркин Н.В., Трещиков В.Н., Новиков А.Г., Наний О.Е.* Российское DWDM оборудование с канальной скоростью 100 Гбит/с // Т-COMM: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – Т. 6, № 4. – С. 65-67.
12. *Juliano S., Martins F., Prata A., Lopes S.* High Performance Microwave Point-to-Point Link for 5G Backhaul with Flexible Spectrum Aggregation // 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 17–22 May 2015. – Phoenix, USA, 2015.
13. *Root D.E.* A New Paradigm for Measurement, Modeling, and Simulation of Nonlinear Microwave and RF Components // Berkeley Wireless Research Center. Presentation. Agilent Technologies. – Apr. 17, 2009. – URL: http://www.learningace.com/doc/3086134/0867637b6f4bb9900348a7da473cf467/bwrc_root_april09.
14. *Root D.E., Horn J., Betts L., Gillease C., Verspecht J.* X-parameters: The new paradigm for measurement, modeling, and design of nonlinear RF and microwave components // Microwave Engineering Europe. – December 2008. – P. 16-21.
15. *Vue D.* Fundamentally Changing Nonlinear Microwave Design // Microwave Journal. – 2010. – Vol. 53, No. 3. – P. 22-38.
16. *Николаев Е.* X-параметры эффективный инструмент для анализа электрических цепей // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2012. – № 1 (00115). – С. 7679.
17. *Саятин В.Ю.* Описание нелинейных цепей на основе X-параметров и методика их измерения // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2 (26). – Ч. 1. – С. 83-86.
18. *Scott J., Hoy M.* Group-Delay Measurement of Frequency-Converting Devices using a Comb Generator // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2010. – Vol. 59, Issue 11. – P. 3012-3017.
19. *Павлов Л.А., Первова Н.В.* Структуры и алгоритмы обработки данных: учебник. – 2-е изд., испр. и доп. – С.Пб.: Лань, 2020. – 256 с.
20. *Баженов В.Г., Богдан Г.А., Кравченко М.В.* Цифровая система измерения фазовых сдвигов радиоимпульсных сигналов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 4. – С. 36-38.

21. Naik R., Nadaf R. Sine-Cosine Computation Using CORDIC Algorithm // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – 2015. – Vol. 4, Issue 9.
22. Jack Volder. The CORDIC computing technique // In Papers presented at the the March 3-5, 1959, western joint computer conference (IRE-AIEE-ACM '59 (Western)). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1959. – P. 257-261. – <https://doi.org/10.1145/1457838.1457886>.
23. Garrido M., Källström P., Kumm M. and Gustafsson O. CORDIC II: A New Improved CORDIC Algorithm // in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – Feb. 2016. – Vol. 63, No. 2. – P. 186-190. – DOI: 10.1109/TCSII.2015.2483422.
24. Ifeachor E.C., Jervis B.W. Digital Signal Processing: A Practical Approach. – 2nd ed. – Prentice Hall, – 2001. – 933 p. – ISBN 9785845907103.
25. Matthew P.D. CIC Filter Introduction. – URL: <https://www.dspguru.com/files/cic.pdf> (дата обращения: 20.05.2024).
26. Cyclone V Device Overview // Intel: official site. – 2018. – URL: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/cyclone-v/cv_51001.pdf (дата обращения: 12.04.2024).
27. ADC-SoC User Manual // Intel: official site. – 2016. – URL: https://www.intel.com/content/dam/altera-www/global/en_US/portal/dsn/42/docus-dsnbk-42-2108361005542-adc-soc-user-manual-dsn.pdf (дата обращения: 06.05.2024).
28. Jaymin P., Yash S., Lili H. Design between AXI Lite and AHB Bus Protocol // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1993.
29. Патент № 2618046 Российская Федерация, МПК G 01 R 25/00. Способ измерения разности фаз и отношения уровней двух гармонических сигналов: № 2016109376: заявл. 15.03.2016: опубл. 10.05.2017, Бюл. №13 / Бабенко А.А., Гноевой А.В., Коротков К.С., Левченко А.С., Фролов Д.Р.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный университет". – 12 с.
30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022660602 Российская Федерация. Программа для определения комплексного коэффициента передачи и отражения СВЧ-смесителей методом суммы и разности: №2022619520: заявл. 26.05.2022: опубл. 07.06.2022 / Коротков К.С., Большов А.В., Гайдено И.В., Пожидаев Р.Б., Сердюков В.В.; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет» (ФГБОУ ВО «КубГУ»). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

REFERENCES

1. Naniy O.E., Treshchikov V.N. Analiz formatov modulyatsii dlya sistem DWDM so skorost'yu 40 Gbit/s [Analysis of modulation formats for DWDM systems with a speed of 40 Gbit/s], *Vestnik svyazi* [Vestnik svyazi], 2012, No. 1.
2. Filippov A.V., Mal'tseva N.S. Osobennosti razvitiya sistem DWDM [Features of the development of DWDM systems], *Tekhnicheskie sredstva sistem upravleniya i svyazi: Mater. V Mezhdunarodnoy konferentsii «Informatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva upravleniya»* [Technical means of control and communication systems: Proceedings of the V International Conference "Information Technologies and Technical Means of Control"]. Astrakhan': Astrakhanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2021, pp. 57-60.
3. Velichko M.A., Naniy O.E., Sus'yan A.A. Novye formaty modulyatsii v opticheskikh sistemakh svyazi [New modulation formats in optical communication systems], *LIGHTWAVE Russian Edition*, 2005, No. 4.
4. Listvin V.N., Treshchikov V.N. DWDM sistemy [DWDM systems]. Moscow: Tekhnosfera, 2015, 296 p.
5. Golikov A.M. Modulyatsiya, kodirovanie i modelirovanie v telekommunikatsionnykh sistemakh. Teoriya i praktika [Modulation, coding and modeling in telecommunication systems. Theory and practice]. Saint Petersburg: Lan', 2018, 419 p.
6. Luchkovskiy D.P., Sukharev E.N., Kuklina A.I. Kvadraturnaya amplitudnaya modulyatsiya [Quadrature amplitude modulation], *Molodezh'. Obshchestvo. Sovremennaya nauka, tekhnika i innovatsii* [Youth. Society. Modern science, technology and innovation], 2016, № 15, pp. 50-51.
7. Li M., Hong W., Zhang X., Li S., Song W., Han C., Zhu M., Li W., Huang D. Transparent wavelength conversion for a novel orthogonal FSK/IM modulation format at 40-Gb/s based on FWM effect of SOA, *Proceedings of SPIE*, 2008, No. 12.
8. Gurkin N.V., Gurkin O.E. Naniy V.N. Treshchikov Opticheskie kogerentnye DWDM sistemy svyazi s kanal'noy skorost'yu 100 Gbit/s [Optical coherent DWDM communication systems with a channel rate of 100 Gbit/s], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm: Telecommunications and transport], 2013, No. 4.

9. Leonov A.V., Naniy O.E., Treshchikov V.N. Sovershenstvovanie formatov modulyatsii v opticheskikh sistemakh svyazi DWDM [Improving modulation formats in DWDM optical communication systems], *Pervaya milya* [First Mile], 2019, No. 1, pp. 30-37.
10. Proskurin A.A., Bliznyuk V.I., Ivkin V.B. Realizatsionnye aspekty razrabotki otechestvennogo transpondera kogerentnykh volokonno-opticheskikh sistem peredachi so skorost'yu 100 Gbit/s [Implementation aspects of the development of a domestic transponder for coherent fiber-optic transmission systems with a speed of 100 Gbit/s], *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Tula State University. Technical sciences], 2020, No. 2, pp. 64-69.
11. Gurkin N.V., Treshchikov V.N., Novikov A.G., Naniy O.E. Rossiyskoe DWDM oborudovanie s kanal'noy skorost'yu 100 Gbit/s [Russian DWDM equipment with a channel rate of 100 Gbit/s], *T-COMM: Telekommunikatsii i transport* [T-COMM: Telecommunications and transport], 2012, Vol. 6, No. 4, pp. 65-67.
12. Juliano S., Martins F., Prata A., Lopes S. High Performance Microwave Point-to-Point Link for 5G Backhaul with Flexible Spectrum Aggregation, *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 17–22 May 2015*. Phoenix, USA, 2015.
13. Root D.E. A New Paradigm for Measurement, Modeling, and Simulation of Nonlinear Microwave and RF Components, *Berkeley Wireless Research Center. Presentation. Agilent Technologies*, Apr. 17, 2009. Available at: http://www.learningace.com/doc/3086134/0867637b6f4bb9900348a7da473cf467/bwrc_root_april09
14. Root D.E., Horn J., Betts L., Gillease C., Verspecht J. X-parameters: The new paradigm for measurement, modeling, and design of nonlinear RF and microwave components, *Microwave Engineering Europe*, December 2008, pp. 16-21.
15. Vye D. Fundamentally Changing Nonlinear Microwave Design, *Microwave Journal*, 2010, Vol. 53, No. 3, pp. 22-38.
16. Nikolaev E. X-parametry effektivnyy instrument dlya analiza elektricheskikh tsepy [X-parameters are an effective tool for analyzing electrical circuits], *Elektronika. Nauka. Tekhnologiya. Biznes* [Electronics. Science. Technology. Business], 2012, No. 1 (00115), pp. 7679.
17. Sayapin V.Yu. Opisanie nelineynykh tsepy na osnove X-parametrov i metodika ikh izmereniya [Description of nonlinear circuits based on X-parameters and methods of their measurement], *Doklady TUSURa* [Reports of TUSUR], 2012, No. 2 (26), Part 1, pp. 83-86.
18. Scott J., Hoy M. Group-Delay Measurement of Frequency-Converting Devices using a Comb Generator, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, Vol. 59, Issue 11, pp. 3012-3017.
19. Pavlov L.A., Pervova N.V. Struktury i algoritmy obrabotki dannykh: uchebnik [Structures and algorithms of data processing: textbook]. 2nd ed. Saint Petersburg: Lan', 2020, 256 p.
20. Bazhenov V.G., Bogdan G.A., Kravchenko M.V. Tsifrovaya sistema izmereniya fazovykh sdvigoov radioimpul'snykh signalov [Digital system for measuring phase shifts of radio pulse signals], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International research journal], 2016, No. 4, pp. 36-38.
21. Naik R., Nadaf R. Sine-Cosine Computation Using CORDIC Algorithm, *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2015, Vol. 4, Issue 9.
22. Jack Volder. The CORDIC computing technique, *In Papers presented at the the March 3-5, 1959, western joint computer conference (IRE-AIEE-ACM '59 (Western))*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1959, pp. 257-261. Available at: <https://doi.org/10.1145/1457838.1457886>.
23. Garrido M., Källström P., Kumm M. and Gustafsson O. CORDIC II: A New Improved CORDIC Algorithm, *in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, Feb. 2016, Vol. 63, No. 2, pp. 186-190. DOI: 10.1109/TCSII.2015.2483422.
24. Ifeachor E.C., Jervis B.W. Digital Signal Processing: A Practical Approach. 2nd ed. Prentice Hall, 2001, 933 p. ISBN 9785845907103.
25. Matthew P.D. CIC Filter Introduction. Available at: <https://www.dspguru.com/files/cic.pdf> (accessed 20 May 2024).
26. Cyclone V Device Overview, *Intel: official site*, 2018. Available at: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/cyclone-v/cv_51001.pdf (accessed 12 April 2024).
27. ADC-SoC User Manual, *Intel: official site*, 2016. Available at: https://www.intel.com/content/dam/altera-www/global/en_US/portal/dsn/42/docus-dsnbk-42-2108361005542-adc-soc-user-manual-dsn.pdf (accessed 06 May 2024).
28. Jaymin P., Yash S., Lili H. Design between AXI Lite and AHB Bus Protocol, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 1993.
29. Babenko A.A., Gnoevoy A.V., Korotkov K.S., Levchenko A.S., Frolov D.R. Patent № 2618046 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G 01 R 25/00. Sposob izmereniya raznosti faz i otnosheniya urovney dvukh garmonicheskikh signalov: № 2016109376: zayavl. 15.03.2016: opubl. 10.05.2017, Byul.

- No. 13; заявитель и патентообладатель Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Kubanskiy gosudarstvennyy universitet" [Patent No. 2618046 Russian Federation, IPC G 01 R 25/00. Method for measuring the phase difference and the level ratio of two harmonic signals: No. 2016109376: decl. 15.03.2016: publ. 10.05.2017, Bull. No. 13; applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State University"], 12 p.
30. *Korotkov K.S., Bol'shov A.V., Gaydenko I.V., Pozhidaev R.B., Serdyukov V.V.* Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2022660602 Rossiyskaya Federatsiya. Programma dlya opredeleniya kompleksnogo koeffitsienta peredachi i otrazheniya SVCh-smesiteley metodom summy i raznosti: №2022619520: zayavl. 26.05.2022: opubl. 07.06.2022; pravoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Kubanskiy gosudarstvennyy universitet» (FGBOU VO «KubGU»). Zaregistrirovano v Reestre programm dlya EVM [Certificate of state registration of computer program No. 2022660602 Russian Federation. Program for determining the complex transmission and reflection coefficient of microwave mixers using the sum and difference method: No. 2022619520: declared 05/26/2022: published 06/07/2022; copyright holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State University" (FGBOU VO "KubSU"). Registered in the Register of Computer].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Сердюков Владимир Владимирович – Кубанский государственный университет; e-mail: serdyukov-vladimir1996@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: 89528524156; преподаватель.

Коротков Константин Станиславович – e-mail: korsar@phys.kubsu.ru; тел.: 89182513055; д.т.н.; профессор.

Голан Антон Васильевич – e-mail: blazepr17@gmail.com; тел.: 89528668695; студент.

Маньшина Александра Тарасовна – e-mail: eteriliro@mail.ru; тел.: 89183596321; студентка.

Калиужная Софья Евгеньевна – e-mail: kaliuzhnaya.sophia.evgenyevna@gmail.com; тел.: 89676747515; студентка.

Serdukov Vladinir Vladimirovich – Kuban State University; e-mail: serdyukov-vladimir1996@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79528524156; teacher.

Korotkov Konstantin Stanislavovich – e-mail: korsar@phys.kubsu.ru; phone: +79182513055; dr. of eng. sc.; professor.

Golan Anton Vasil'evich – e-mail: blazepr17@gmail.com; phone: +79528668695; student.

Manshina Aleksandra Tarasovna – e-mail: eteriliro@mail.ru; phone: +79183596321; student.

Kaliuzhnaya Sof'ya Evgen'evna – e-mail: kaliuzhnaya.sophia.evgenyevna@gmail.com; phone: +79676747515; student.

УДК 621.396.677

DOI 10.18522/2311-3103-2024-4-169-181

К.М. Занин, Д.Д. Габриэльян, Ю.В. Кузнецов, С.Е. Мищенко

ПРОФИЛИРОВАНИЕ РЕФЛЕКТОРА ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННОГО КОНТУРА ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

При построении комплексов спутниковой связи требуется обеспечение заданного уровня коэффициента усиления бортовой антенны в строго определенной области покрытия и значительно более низкого уровня вне этой области. Граница области покрытия при этом может иметь сложную, но неизменную в течение всего периода эксплуатации форму. Для удовлетворения данных требований применяются, в том числе, зеркальные антенны с профилированным рефлектором, в которых закон профилирования поверхности описывается гладкими аналитическими функциями. Однако при формировании контурной диаграммы направленности с более сложной формой сечения главного лепестка требуемое фазовое распределение может иметь разрывы при переходе через период 2π , которые не могут быть аппроксимированы гладкими функциями без искажений.