

М.Н. БЕЗРУК, Р.В. РОМАШКО, Ю.Н. КУЛЬЧИН,
С.А. ЕРМОЛАЕВ, Б.С. НОТКИН

Экспресс-калибровка чувствительности многоканального адаптивного фазового демодулятора

Рассматривается метод одновременной экспресс-калибровки многоканального адаптивного фазового демодулятора, заключающийся во внесении известной фазовой модуляции с переменной амплитудой в каналы демодулятора, построении переходной характеристики и определении с ее помощью калибровочного коэффициента для каждого канала демодулятора. Процесс калибровки автоматизирован и занимает 2 с. Применение экспресс-калибровки позволяет нивелировать разброс чувствительности по каналам адаптивного фазового демодулятора.

Ключевые слова: адаптивный фазовый демодулятор, калибровка, динамическая голограмма, фоторефрактивный кристалл.

Method for express-calibration of the sensitivity of a multichannel adaptive phase demodulator. M.N. BEZRUK (Institute for Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok), R.V. ROMASHKO (Institute for Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Far Eastern Federal University, Vladivostok), Yu.N. KULCHIN (Institute for Automation and Control Processes, FEB RAS, Far Eastern Federal University, Vladivostok), S.A. ERMOLAEV (Institute for Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok), B.S. NOTKIN (Institute for Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok).

In this paper, we present a method for calibrating a multichannel adaptive phase demodulator. The proposed method consists of introducing a known phase modulation with variable amplitude into the channels of the demodulator, constructing a transient response and determining with it the calibration coefficient for each channel of the demodulator. The process of calibration is automated and takes 2 seconds. Express calibration method gives an opportunity to mitigate a sensitivity spread through the channels of adaptive phase demodulator.

Key words: adaptive phase demodulator, calibration, dynamic hologram, photorefractive crystal.

В основу многоканального адаптивного фазового демодулятора (рис. 1) положен принцип мультиплексирования ортогональных динамических голограмм в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии¹.

*БЕЗРУК Михаил Николаевич – младший научный сотрудник (Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток), РОМАШКО Роман Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, КУЛЬЧИН Юрий Николаевич – академик, директор (Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток), ЕРМОЛАЕВ Сергей Александрович – аспирант (Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток), НОТКИН Борис Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник (Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: bezmisha@list.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований, грант № 18-32-00476 мол_а.

¹ Six-channel adaptive fibre-optic interferometer / R.V. Romashko, M.N. Bezruk, A.A. Kamshilin, Y.N. Kulchin // Quantum Electron. 2012. Vol. 42, N 6. P. 551–556.

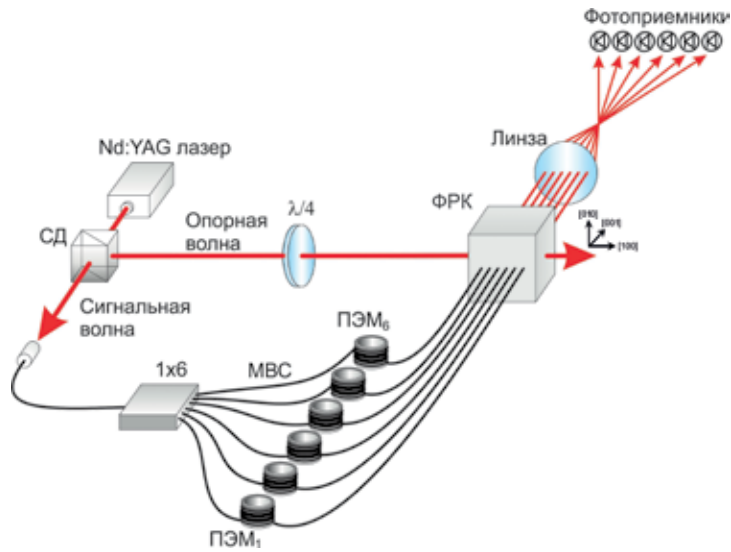


Рис. 1. Схема многоканального адаптивного фазового демодулятора. СД – светоделитель, МВС – многомодовые волоконные световоды, ФРК – фоторефрактивный кристалл

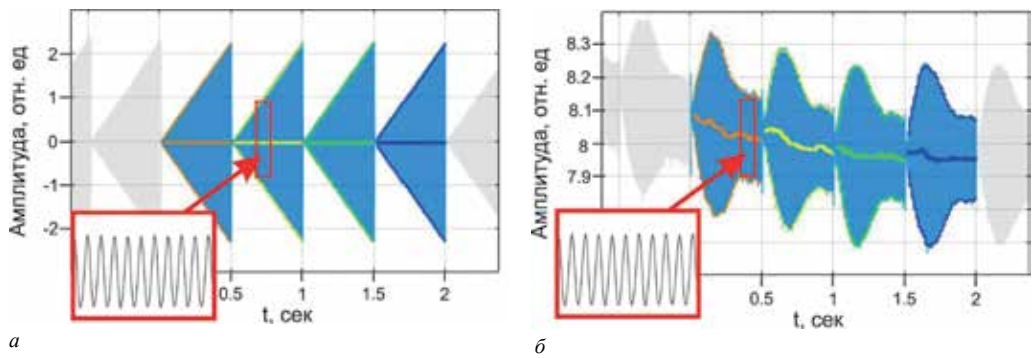


Рис. 2. Модуляционный сигнал (а) и выходной сигнал в одном из каналов фазового демодулятора (б)

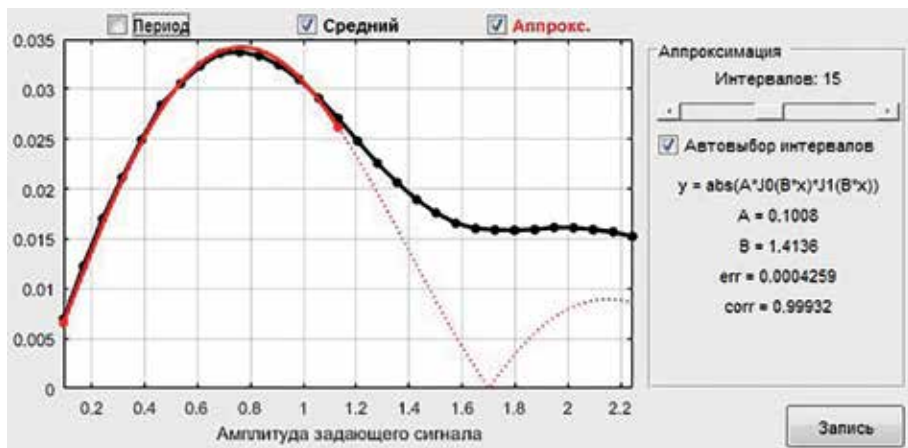


Рис. 3. Зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды модуляции фазы для одного из каналов многоканального фазового демодулятора. Пунктирная линия – аппроксимационная кривая

Источником лазерного излучения в демодуляторе является твердотельный Nd : YAG лазер ($P = 1$ Вт, $\lambda = 1,06$ мкм). В качестве среды для записи динамических голограмм использован фоторефрактивный кристалл кубической симметрии CdTe : V. С помощью светоделителя излучение лазера делится на опорную и сигнальную волны. Опорная волна, приобретая эллиптическую поляризацию после прохождения через четвертьволновую фазовую пластинку, направляется в ФРК вдоль основной кристаллографической оси [100]. В свою очередь, сигнальная волна с помощью волоконно-оптического (ВО) разветвителя 1×6 дополнительно разделяется на 6 сигнальных волн, которые затем направляются в 6 многомодовых волоконных световодов (МВС) ($\text{dia} = 62,5$ мкм, $\text{NA} = 0,22$). Деполяризованное излучение сигнальных волн, полученное на выходе из МВС, направляется в фоторефрактивный кристалл вдоль основной кристаллографической оси [001] перпендикулярно опорной волне. В ФРК попарное взаимодействие сигнальных волн с общей опорной приводит к формированию диффузионных динамических голограмм, волновой вектор которых направлен вдоль оси [110]. Фазовая демодуляция осуществляется за счет дифракции волн на динамических голограммах. Интенсивность сигнальных волн, прошедших через кристалл и собранных затем фокусирующей линзой, детектируется при помощи 6 фотодетекторов.

В силу неоднородности свойств фоторефрактивного кристалла по его объему, неизбежных отличий в параметрах световых пучков в различных каналах демодулятора, а также возможного различия характеристик фотодетекторов чувствительность к модуляции фазы в каждом канале демодулятора оказывается различной. Чтобы нивелировать разброс чувствительности по каналам, в настоящей работе предложен метод одновременной экспресс-калибровки каналов адаптивного фазового демодулятора.

Суть калибровки заключается во введении во все каналы фазового демодулятора одинаковой фазовой модуляции. В каждом канале демодулятора регистрируется величина выходного сигнала. При этом за выходной сигнал в каждом канале демодулятора принимается глубина модуляции интенсивности сигнальной волны, определяемая выражением

$$M(\Delta\varphi) = \frac{\Delta I(\Delta\varphi)}{I_0} = \frac{AJ_0(\Delta\varphi) \cdot J_1(\Delta\varphi)}{I_0}, \quad (1)$$

где ΔI – амплитуда сигнальной волны, I_0 – ее постоянная составляющая, J_q – функции Бесселя q -го порядка; A – коэффициент, который определяет чувствительность в канале фазового демодулятора с учетом эффективности взаимодействия сигнальной и опорной волн и, таким образом, является калибровочным.

Аппроксимация экспериментально полученных для каждого канала демодулятора зависимостей с помощью выражения (1) позволяет для каждого канала найти калибровочный коэффициент A . Затем, при проведении непосредственно измерений, значения выходных сигналов каждого канала нормируются на соответствующие им калибровочные коэффициенты. Таким образом, определение этого коэффициента для каждого канала фазового демодулятора позволяет выровнять чувствительность всех каналов относительно друг друга.

Процедура проведения калибровки многоканального фазового демодулятора заключается в следующем. Перед ВО-разветвителем добавляется волоконный световод, навитый на калиброванный пьезоэлектрический модулятор, что обеспечивает одинаковую модуляцию фазы в каждом канале. В свою очередь, на модулятор подается переменное синусоидальное напряжение, что приводит к одинаковой модуляции фазы во всех каналах демодулятора. Амплитуда синусоидального напряжения циклически (4 цикла) меняется

² Two-wave mixing on reflection dynamic gratings in sillenite crystals under phase modulation of signal beam / S.M. Shandarov, A.A. Kolegov, N.I. Burimov, V.I. Bykov, V.M. Petrov, Y.F. Kargin // Phys. Wave Phenom. 2009. Vol. 17, N 1. P. 39–44.

от минимальной до максимальной в диапазоне 0–2 рад (рис. 2а). При этом осуществляется регистрация выходного сигнала в каждом канале фазового демодулятора. Пример регистрируемого сигнала в одном из каналов фазового демодулятора представлен на рис. 2б. Следующий этап калибровки, осуществляемый после проведения измерений, состоит в обработке полученных калибровочных данных. Для каждого канала строятся зависимости глубины модуляции сигнала от амплитуды модуляционного сигнала для всех четырех циклов. С помощью разработанного алгоритма в среде программирования Matlab зависимости для 4 циклов усредняются и аппроксимируются с помощью выражения (1) (рис. 3). В результате для каждого канала фазового демодулятора определяется калибровочный коэффициент, который затем используется в измерениях. Полный цикл калибровки, включая обработку данных, занимает 30 с.

Следует отметить, что стабильность калибровочных коэффициентов определяет стабильность выходного сигнала многоканального фазового демодулятора. Для этого в работе была проведена оценка временной стабильности значений калибровочных коэффициентов. Выполнено три серии калибровок, интервалы между которыми составили 10 и 15 мин. Внутри каждой серии калибровка проводилась каждые 20 с. Таким образом, общее время измерений составило около 40 мин (рис. 4).

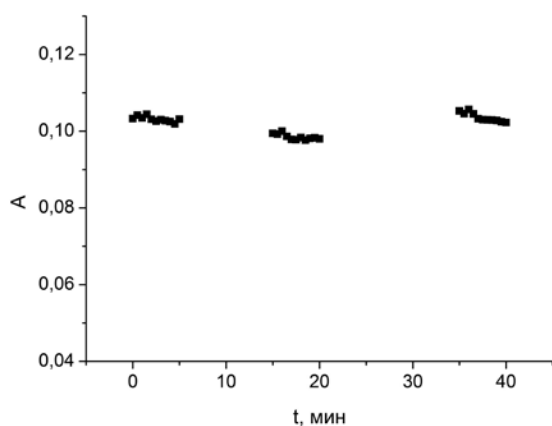


Рис. 4. Динамика изменения калибровочного коэффициента в одном из каналов фазового демодулятора на временном интервале 40 мин

На основе полученных результатов определены среднеквадратичные отклонения (СКО) калибровочного коэффициента ΔA для отдельно взятого канала. Как видно из рис. 4, в течение 5 мин непрерывной работы демодулятора отклонение значения калибровочного коэффициента в отдельно взятом канале практически отсутствует (СКО не более 0,5 %), на временном интервале 40 мин СКО составило 2 %. Увеличение отклонения калибровочного коэффициента с увеличением времени наблюдения связано с тем, что при длительной работе фазового демодулятора (15 мин и дольше) в случае использования мощных световых пучков (суммарная мощность излучения около 1 Вт) возникает нагрев фоторефрактивного кристалла, что влечет за собой снижение эффективности взаимодействия волн внутри кристалла. В связи с этим при использовании в адаптивном фазовом демодуляторе излучения высокой мощности рекомендуется проводить калибровку 1 раз в 5 мин: процесс ее проведения, будучи автоматизированным, занимает всего 2 с, т.е. по сути это экспресс-калибровка.

Таким образом, разработанный метод экспресс-калибровки эффективен в случае устранения разброса чувствительности в каналах фазового демодулятора и ее оперативно-го уточнения для определенного канала при необходимости. Следует отметить, что предложенный в работе метод калибровки применим к адаптивным фазовым демодуляторам с любым количеством измерительных каналов.