

Новый подход к решению задач оптической метрологии, основанный на статистическом анализе райсовских сигналов

Т.В. Яковлева¹

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Вавилова, 44/2, Москва, Россия, 119333

Аннотация

В работе представлен новый подход к решению достаточно широкого круга задач оптики и фотоники, в которых искомая характеристика оптического сигнала вычисляется посредством измерения и анализа величины, подчиняющейся статистическому распределению Райса. Развиваемый подход основан на методах так-называемого двухпараметрического анализа райсовских данных. Такой анализ обеспечивает возможность точного совместного оценивания как величины сигнала, так и величины шума без каких-либо априорных предположений относительно процесса. Одно из предлагаемых применений такого подхода касается решения задачи измерения оптических свойств среды, таких как электрооптический коэффициент, на основе анализа статистических характеристик модулированной оптической волны, отраженной от образца электрооптической среды. Другой пример перспективного применения развиваемого подхода касается решения задач высокоточного измерения фазового сдвига при интерферометрии квазигармонических оптических сигналов

Ключевые слова

квазигармонический сигнал, распределение Райса, электро-оптический коэффициент, фазовый сдвиг

1. Введение

Многие задачи, связанные с высокоточными измерениями в оптике и фотонике, как оказалось, адекватно описываются статистической моделью Райса, [1]. Такие измерения используются в оптической метрологии, в системах дальнометрии, в задачах неразрушающего контроля и т.п., [2]. С другой стороны, математические методы, разработанные в последнее время для анализа сигналов в условиях статистической модели Райса, являются эффективным инструментом повышения точности оптических измерений, так как они обеспечивают подавление влияния неизбежного гауссовского шума. Новый подход представлен применительно к задаче измерения оптических характеристик среды, таких как, например, электро-оптический (ЭО) коэффициент. Традиционный подход к определению величины ЭО коэффициента основан на модуляции отражения света [3], обусловленной изменением коэффициента отражения переменным электрическим полем в силу электрооптического эффекта, и использовании метода линейной регрессии для обработки результатов такой модуляции и вычисления ЭО коэффициента. При этом в ходе вычислений получают результат совместного влияния как ЭО свойств среды, так и неизбежного гауссовского шума, что снижает точность измерения непосредственно ЭО коэффициента, в то время как предлагаемый подход позволяет в значительной степени устранить негативное влияние гауссовского шума.

Подход, развиваемый в настоящей работе, рассматривается также применительно к задаче высокоточных измерений разности фаз двух сигналов [4], одной из наиболее важных проблем в оптике, а также в радиофизике, радиолокации, навигации и т.п.

2. Особенности задач, решаемых посредством предлагаемого подхода

Задачи, к решению которых может эффективно применяться представленный в данной работе подход, основанный на математических методах статистической обработки райсовских данных, объединяет следующая особенность. Искомая оптическая характеристика в каждой из этих задач определяется как результат измерений и анализа данных, которые в виду неизбежного присутствия гауссовского шума являются стохастическими. При этом весьма распространенной ситуацией является такая, когда измеряемая величина представляет собой амплитуду сигнала, полученного суммированием большого числа разбросанных по фазе величин с гауссовской статистикой. Такая величина, как известно, подчиняется статистическому распределению Райса. Ранее разработанные методы двухпараметрического анализа райсовских данных, которые являются эффективным инструментом шумоподавления, легли в основу развиваемого подхода к решению вышеуказанных задач. Так, измеряемый ЭО коэффициент представляет собой случайную райсовскую величину, и тем самым его значение может быть рассчитано посредством данного подхода. В работе дается строгое обоснование развиваемого подхода. Некоторые численные результаты приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Значения ЭО коэффициента k двух образцов кварца, полученные предлагаемым (столбец слева) и традиционным (столбец справа) методами

Образец 1	$k=1.41 \cdot 10^{-6}$	$k=1.42 \cdot 10^{-6}$
Образец 2	$k=5.7 \cdot 10^{-6}$	$k=5.8 \cdot 10^{-6}$

Важное преимущество предлагаемого подхода состоит в повышении точности измерений благодаря возможности компенсации негативного влияния неизбежного гауссовского шума.

3. Заключение

В работе рассматривается новый подход к решению задачи высокоточных измерений в оптике и фотонике, основанный на анализе величины амплитуды оптического сигнала как райсовской случайной величины. Дается теоретическое обоснование и рассматриваются примеры применения нового подхода, в частности, для решения задачи определения электрооптического коэффициента среды. Показано, что анализ райсовских данных позволяет добиться эффективного восстановления полезной, информативной составляющей сигнала на фоне спекл-шума, тем самым обеспечивая более точное оценивание ЭО коэффициента, чем традиционный метод линейной регрессии, основанный на анализе суммарного, т.е. включающего в себя шумовую составляющую, отраженного сигнала. Кроме того, для расчета ЭО коэффициента на основе разработанного подхода достаточно провести измерения отраженной волны лишь при одном значении модулирующего электрического поля, что значительно упрощает экспериментальную установку и уменьшает количество измерений.

Другой пример применения предлагаемого подхода относится к решению задачи высокоточного измерения фазового сдвига между двумя квазигармоническими сигналами. При этом искомый сдвиг фазы определяется в результате лишь амплитудных измерений.

4. Литература

- [1] Rice, S.O. Mathematical analysis of random noise / S.O. Rice // Bell Syst. Technological J. – 1944. – Vol. 23. – P. 282.
- [2] Webster, J.G. Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays / J.G. Webster. – Boca Raton: CRC Press, 2004. – 768 p.
- [3] Kniazkov, A.V. Measuring the induced birefringence of electro-optical materials by the light refraction coefficient modulation / A.V. Kniazkov // Scientific-technical BULLETIN of SPSPU. – 2013. – Vol. 4-1(182). – P. 100-104.

- [4] Yakovleva, T. Nonlinear Filtration of Rician Data as a Tool for the Phase Measurements: Aspects of a Theory / T. Yakovleva // *Journal of Physics: Conf. Series.* – 2018. – Vol. 1096. – P. 012136. DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012136.