

УДК 621.382

В. К. ВОЛОСЮК, А. А. ШМАТКО, В. И. ЗВОРСКИЙ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ДЕКОРРЕЛЯЦИЯ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ОБРАЗОВ
СТАТИСТИЧЕСКИ НЕРОВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Исследована процедура декорреляции спекл-интерференционных образов, сформированных когерентным излучением, рассеянным на статистически неровной поверхности, позволяющая повысить точность оценок ее параметров. Впервые предложена схема устройства оптического декоррелятора. Разработан оптический когерентный декоррелятор и проведены его экспериментальные исследования. Разработан цифровой алгоритм декорреляции спекл-интерференционных изображений в ЭВМ и проведено компьютерное моделирование предложенного алгоритма. Проведен сравнительный анализ величины декорреляции по корреляционным функциям: исходного спекл-изображения, декоррелированного в оптическом декорреляторе и цифровыми методами.

Ключевые слова: лазерное излучение, шероховатая поверхность, спекл-изображение, оптическая обработка сигналов, декорреляция.

Введение

На сегодняшний день все большее внимание уделяется методам и средствам измерения параметров и статистических характеристик шероховатых поверхностей. В работе [1] был получен оптимальный алгоритм, согласно которому параметры $\bar{\lambda}$ шероховатости оцениваются по формуле

$$\sigma^0(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda}) = \frac{\sum_{i=1}^N P_{срi}(\bar{\vartheta}_k)}{P_{\Lambda}}, \quad (1)$$

где $P_{срi}(\bar{\vartheta}_k)$ – оценка средней мощности оптических колебаний, принятых из направления, заданного направляющими косинусами $\bar{\vartheta}_k$ одним элементом МОП, P_{Λ} – мощность, излучаемая лазером.

Из выражения (1) видно, что мощность суммируется по N независимым отсчетам спекл-изображения. Показано, что предельные погрешности, полученные в результате обращения матрицы Фишера [1, 2] равны

$$\sigma_{\lambda}^2 = (\hat{O}_{\lambda\lambda})^{-1} = \frac{2}{N\Delta F} \frac{[\sigma^0(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda})]^2}{\left[\frac{\partial}{\partial \bar{\lambda}} \sigma^0(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda})\right]^2}, \quad (2)$$

т.е. точность зависит от количества независимых отсчетов N , входящих в выражение (2). В практической ситуации число этих отсчетов можно увеличить за счет декорреляции.

В работе рассмотрен вариант реализации оптического декоррелятора, устанавливаемого до фотоприемника, а также компьютерный вариант декорреляции зафиксированных спекл-изображений в ЭВМ.

1. Постановка задачи

С целью повышения точности оценок параметров шероховатой поверхности необходимо разработать и практически реализовать схему оптического когерентного декоррелятора, а также провести его экспериментальные исследования. С этой же целью необходимо разработать второй альтернативный вариант декоррелятора, реализуемый в компьютере или в специализированном микропроцессорном устройстве в виде математического алгоритма декорреляции спекл-изображений, зафиксированных ПЗС-матрицей, и провести его компьютерное моделирование и исследование.

2. Решение задачи

Процедура декорреляции спекл-интерференционных образов шероховатых поверхностей может реализовываться как в виде пространственно-временной предобработки оптических колебаний до их непосредственной регистрации фотоприемником, так и постобработкой принятого сигнала в ЭВМ согласно цифровому аналогу алгоритма декорреляции.

Первой рассмотрим структуру оптического декоррелирующего фильтра. Оптический декоррелятор – это оптическое когерентное устройство вы-

полняющее фильтрацию входного сигнала, в котором в качестве фильтра используется транспарант с пространственной АЧХ, описываемой функцией, квадрат которой близок к обратной зависимости от пространственных частот энергетического спектра $G(\omega_\alpha, \omega_\beta)$ спекл-изображения шероховатой поверхности.

Схема оптического когерентного декоррелятора спекл-изображений показана на рис. 1. Она состоит из: когерентного в пространстве и во времени источника света 1; исследуемой шероховатой поверхности 2; тонких фокусирующих линз 3, 5, выполняющих двумерное преобразование Фурье; транспаранта в частотной плоскости 4 с АЧХ декоррелирующего фильтра и оптического приемника 6. Линзы 3, 5 устанавливаются с соблюдением фокусных расстояний согласно геометрии изображенной на рис. 1.

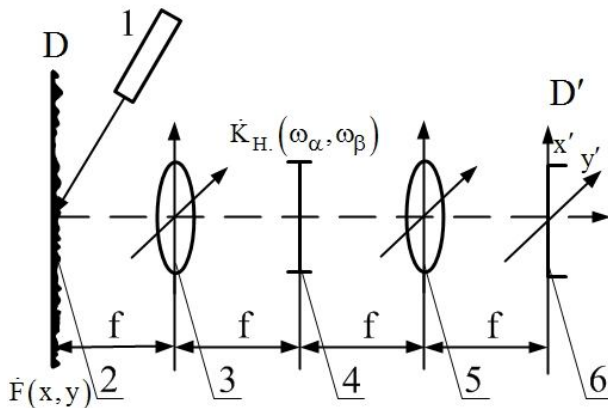


Рис. 1. Схема оптического декоррелятора

Лазер 1 освещает шероховатую поверхность 2 с комплексным коэффициентом рассеяния $\hat{F}(x, y)$, установленной в передней фокальной плоскости линзы 3, осуществляющей двумерное преобразование Фурье входного сигнала. В задней фокальной плоскости 4 линзы 3 формируется пространственный Фурье-образ, рассеянного на неровностях шероховатой поверхности когерентным излучением

$$\begin{aligned} \hat{S}(\omega_\alpha, \omega_\beta) &= \\ &= \iint_{XY} \hat{F}(x, y) \exp\{-j(\omega_\alpha x + \omega_\beta y)\} dx dy. \end{aligned} \quad (3)$$

Как следует из алгоритма, приведенного в работе [1] обработку спекл-изображения можно проводить не только во временной области, но и в пространстве, для этого необходимо ввести операцию согласованной фильтрации и декорреляции оптиче-

ского излучения фильтром, квадрат модуля передаточной характеристики которой равен

$$|\hat{K}(\omega_\alpha, \omega_\beta)|^2 = \frac{G(\omega_\alpha, \omega_\beta)}{\left[G(\omega_\alpha, \omega_\beta) + \frac{N_0}{2}\right]^2}, \quad (4)$$

где $\frac{N_0}{2}$ – небольшая регуляризирующая добавка, исключающая деление на ноль.

Компьютерная реализация фильтра не вызывает трудностей, однако выполнить транспарант с коэффициентом пропускания больше единицы невозможно. Для решения этой задачи в частотной плоскости 4 помещается фильтр с нормированной АЧХ такого вида

$$|\hat{K}_n(\omega_\alpha, \omega_\beta)| = \frac{|\hat{K}(\omega_\alpha, \omega_\beta)|}{\max |\hat{K}(\omega_\alpha, \omega_\beta)|}. \quad (5)$$

Линза 5 восстанавливает декоррелированную спекл-картину. Таким образом, сигнал на выходе оптического декоррелятора представляет собой свертку входного спекл-изображения с импульсной характеристикой декоррелирующего фильтра.

2. Экспериментальные исследования

Схема устройства оптической декорреляции была реализована в виде блока линз и транспаранта, собранных согласно рис. 1 и установленных на входе оптического приемника. Для создания фильтра при помощи ЭВМ был рассчитан пространственный Фурье-образ (рис. 3) зарегистрированной спекл-картины (рис. 2), сформированной рассеянным на шероховатой поверхности когерентным излучением.

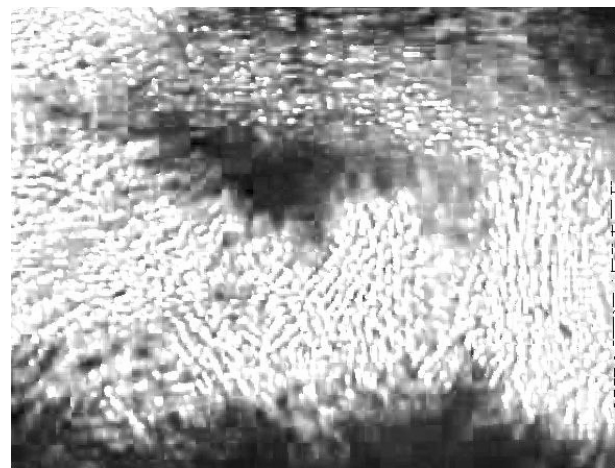


Рис. 2. Спекл-картина

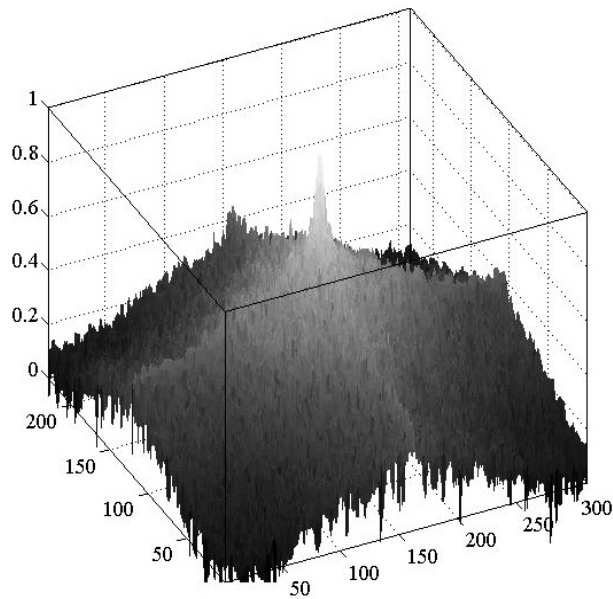


Рис. 3. Сглаженный медианным фильтром, нормированный спектр спекл-картины

Фильтр представляет собой оптически прозрачную пленку с нанесенной передаточной характеристикой системы (рис. 4) в виде областей с различными коэффициентами прозрачности, по осям абсцисс и ординат откладываются пространственные частоты, ось аппликат отображает нормированный коэффициент пропускания пространственного фильтра в виде высоты.

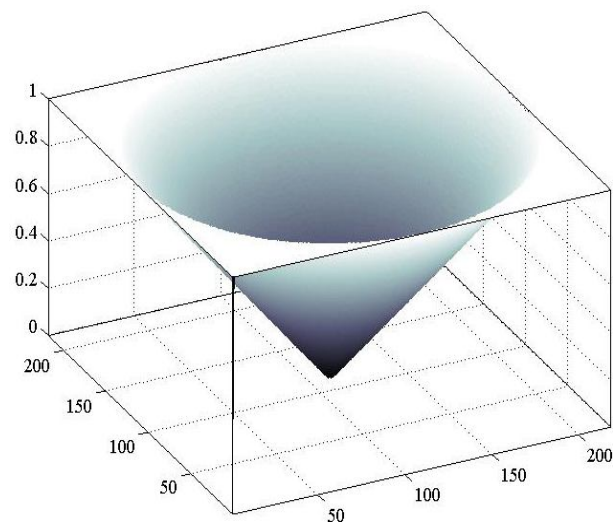


Рис. 4. Передаточная характеристика оптического декоррелятора

Запись обработанных спекл-изображений выполнялась установленным на выходе оптической системы матричным оптическим приемником (ПЗС - матрицей). Декоррелированное спекл-изображение представлено на рис. 5.

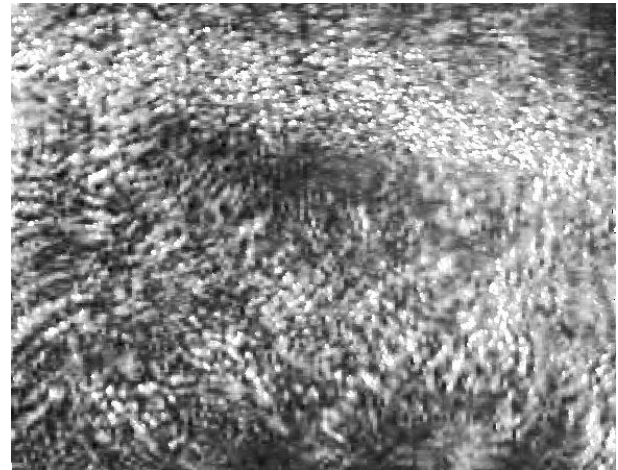


Рис. 5. Спекл-изображение на выходе оптического декоррелятора

Предобработку спекл-картины в оптическом декорреляторе целесообразно выполнять при большом объеме входных данных и (или) необходимости обработки мультиспектральных спекл-картин. В случае реализации измерителя параметров шероховатых поверхностей, в котором не требуется использование фотоприемников с большим разрешением целесообразно использовать цифровой вариант реализации декоррелятора в ЭВМ. Алгоритм состоит из следующих операций [3]: рассчитывается Фурье-образ принятого оптического сигнала (рис. 3), формируется передаточная характеристика декоррелирующего фильтра согласно выражению (4) (рис. 6).

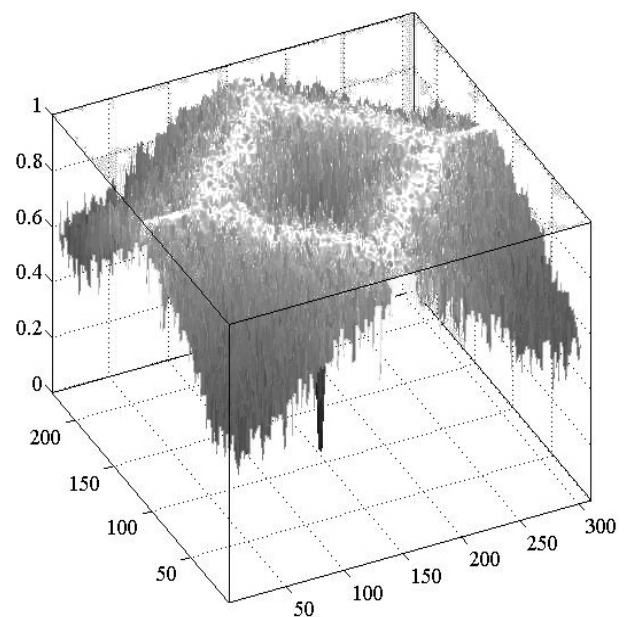


Рис. 6. Передаточная характеристика декоррелирующего фильтра

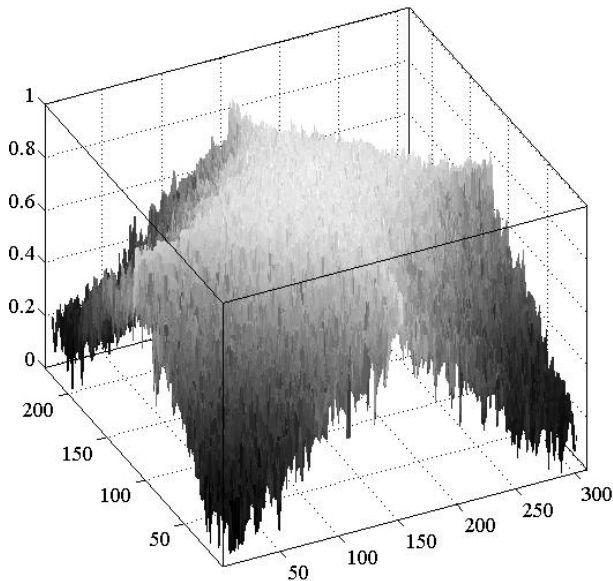


Рис. 7. Фурье-образ декоррелированной спекл-картины

После умножения спектра входного сигнала на АЧХ фильтра выполняется восстановление обработанного спекл-изображения (рис. 8) из его образа (рис. 7) путем обратного преобразования Фурье

$$D'(x', y') = \left| F^{-1} \left[\left[\dot{K}_H(\omega_\alpha, \omega_\beta) \dot{S}(\omega_\alpha, \omega_\beta) \right] \right] \right|, \quad (6)$$

где $F^{-1}[\cdot]$ – обратное преобразование Фурье.

Спекл-изображение после цифровой декорреляции показано на рис. 7.

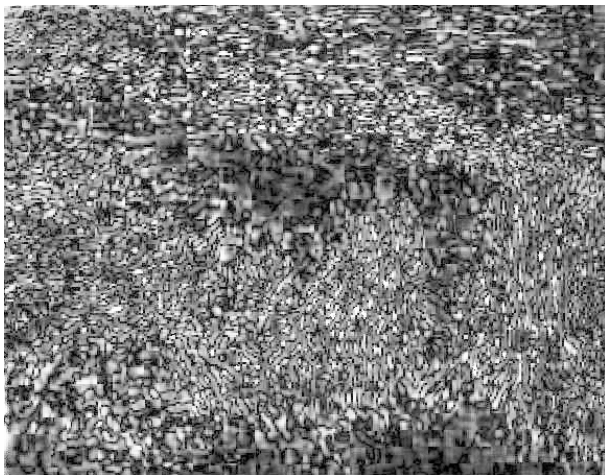
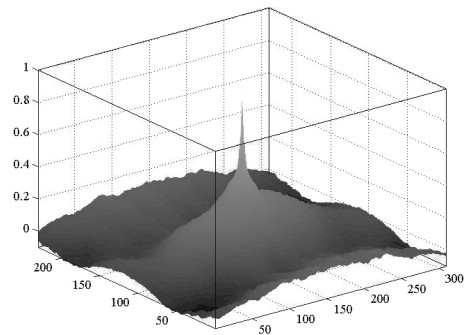


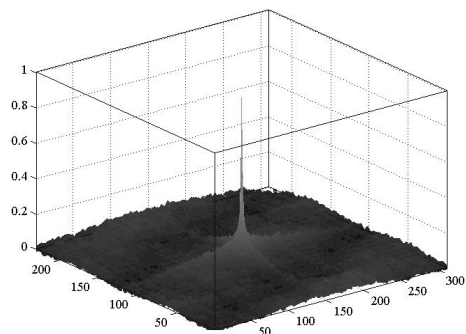
Рис. 8. Спекл-изображение после цифровой декорреляции

Анализируя ширину корреляционной функции исходного спекл-интерференционного изображения, декоррелированного в оптическом диапазоне и циф-

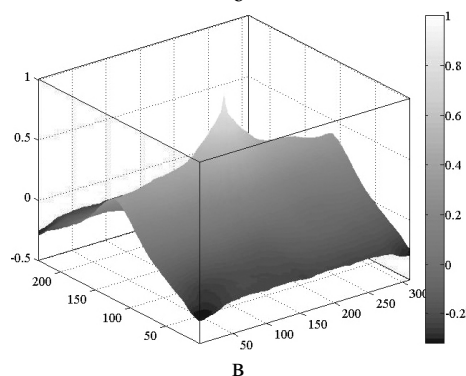
ровыми методами, оценивается степень декорреляции спекл-картин. По результатам экспериментальных исследований и компьютерного моделирования можно сделать вывод, что корреляционные функции декоррелированных при помощи оптической когерентной системы (рис. 9 (а)) и методами цифровой обработки сигналов (рис. 9 (б)) имеют существенно меньший радиус корреляции, в сравнении с исходным, необработанным оптическим изображением (рис. 9 (в)).



а



б



в

Рис. 9 Корреляционные функции спекл-изображений:

а – декоррелированного в оптическом диапазоне;

б – декоррелированного в ЭВМ;

в – исходного спекл-изображения

Степень декорреляции зависит от величины, на которую будут подняты высокочастотные составляющие полезного сигнала, но вместе с полезным сигналом увеличивается амплитуда присутствующего шума в спекл-изображении, что накладывает порог, ограничивающий величину декорреляции.

Заключення

Разработан оптический декоррелятор, выполняющий предобработку спекл-изображений до их регистрации фотоприемником, что повышает точность метода оптимального оценивания параметров статистически неровных поверхностей. Предложен алгоритм реализации декоррелирующего фильтра в ЭВМ. Проведены натурные испытания оптического и цифрового декоррелятора. Оптический вариант реализации декоррелятора обладает высоким быстродействием и многоканальностью в сравнении с его цифровым вариантом реализации. Результаты могут быть использованы для решения задач оптимальной оценки параметров ШП.

Поступила в редакцию 10.10.2013, рассмотрена на редколлегии 11.12.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов И. В. Барышев, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДЕКОРЕЛЯЦІЯ СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ОБРАЗІВ СТАТИСТИЧНО НЕРІВНИХ ПОВЕРХОНЬ

В. К. Волосяк, О. О. Шматко, В. І. Зворський

Досліджено процедуру декореляції спекл-інтерференційних образів, сформованих когерентним випромінюванням, розсіяним на статистично нерівній поверхні, яка дозволяє підвищити точність оцінок її параметрів. Вперше запропоновано схему пристрою оптичного декоррелятора. Розроблено оптичний когерентний декоррелятор і проведено його експериментальні дослідження. Розроблено цифровий алгоритм декореляції спекл-зображень в ЕОМ та проведено комп'ютерне моделювання запропонованого алгоритму. Проведено порівняльний аналіз величини декореляції за кореляційними функціями: базового спекл-зображення, декорельованого в оптичному декорреляторі та цифровими методами.

Ключові слова: лазерне випромінювання, шорстка поверхня, спекл-зображення, оптична обробка сигналів, декореляція.

DECORRELATION SPECKLE IMAGES ROUGH SURFACE

O. O. Shmatko, V. K. Volosyuk, V. I. Zvorsky

Investigated procedure decorrelation speckle interferometric images formed ethyl coherent radiation scattered from statistically rough surface, allowing to increase the accuracy of the estimates of its parameters. First, a scheme of the optical decorrelator. An optical coherent decorrelator and held his experimental studies. Decorrelation algorithm developed digital speckle images into a computer and the computer modeling of the proposed algorithm. A comparative analysis of the decorrelation value for the correlation functions: the original speckle image, decorrelated in the optical and digital methods.

Key words: laser light, rough surface, speckle pattern, optical signal processing, decorrelation.

Волосяк Валерій Константинович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: valeriy_volosyuk@mail.ru.

Шматко Александр Александрович – младший научный сотрудник каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: sasha_10@pochta.ru.

Зворський Валентин Іванович – научный сотрудник каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Литература

1. Шматко, А. А. Синтез алгоритмов оптимальных оценок параметров шероховатых поверхностей многоэлементными оптическими приемниками [Текст] / А. А. Шматко // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2013. – № 2. – С. 106 – 112.

2. Волосяк, В. К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации [Текст] / В. К. Волосяк, В. Ф. Кравченко. – М.: Физматлит, 2008. – 704 с.

3. Обработка случайных сигналов и процессов [Текст] : учеб. пособ. / А. Н. Беседин, А. А. Зеленский, Г. П. Кулемин, В. В. Лукин. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 469 с.