

УДК 621.396

**КОРРЕКЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА, ИСКАЖЕННОГО  
ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ, С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ОПОРНОГО  
ИЗОБРАЖЕНИЯ.**

**ЧАСТЬ 3. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ОПОРНЫЙ СПЕКТР.**

**Ю. В. Гуляев, А. Ю. Зражевский, А. В. Кокошкин, В. А. Коротков, В. А. Черепенин**  
**Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН**

Статья получена 27 ноября 2013 г.

**Аннотация.** Рассмотрено применение универсального опорного спектра в адаптивном методе опорного изображения для улучшения качества радиотепловых изображений ММ диапазона волн, использующий известную аппаратную функцию оптической системы.

**Ключевые слова:** радиоизображения, статистические характеристики спектров, пространственное разрешение.

**Abstract:** The application of multipurpose reference spectrum in adaptive method of reference spectrum is considered. It improves the quality radiothermal images MM wave range, with usage of a known instrument function of the optical system.

**Key words:** radio images, statistical characteristics of the spectra, spatial resolution.

Радиоизображения, получаемые в ММ диапазоне, заметно отличаются по качеству от оптических изображений [1, 3, 4, 6]. Из всех факторов, ухудшающих качество радиоизображений, выделяются те, которые можно свести к аппаратной функции (АФ) оптической системы. В первой части данной работы рассматривался классический метод опорного изображения (МОИ), позволяющий улучшать качество радиоизображений. Во второй части был предложен адаптивный вариант метода опорного изображения (аМОИ), менее зависимый от выбора опорного изображения.

В этой части рассматривается применение обобщенного (универсального) спектра опорного изображения.

Анализ спектров изображений, приведенных в [7, 8] и в первых двух частях данной статьи позволяет сделать вывод о том, что амплитудный спектр изображения можно условно разделить на аксиально-симметричную (изотропную) и анизотропную части. На рис.1 представлены изображения, которые были использованы в 1 и 2 частях данной статьи. На рис.2 представлены амплитудные спектры изображений в линейном и логарифмическом масштабе в виде пар, соответствующих изображениям на рис.1. Для лучшей наглядности спектры были ограничены по вертикали (амплитуде).

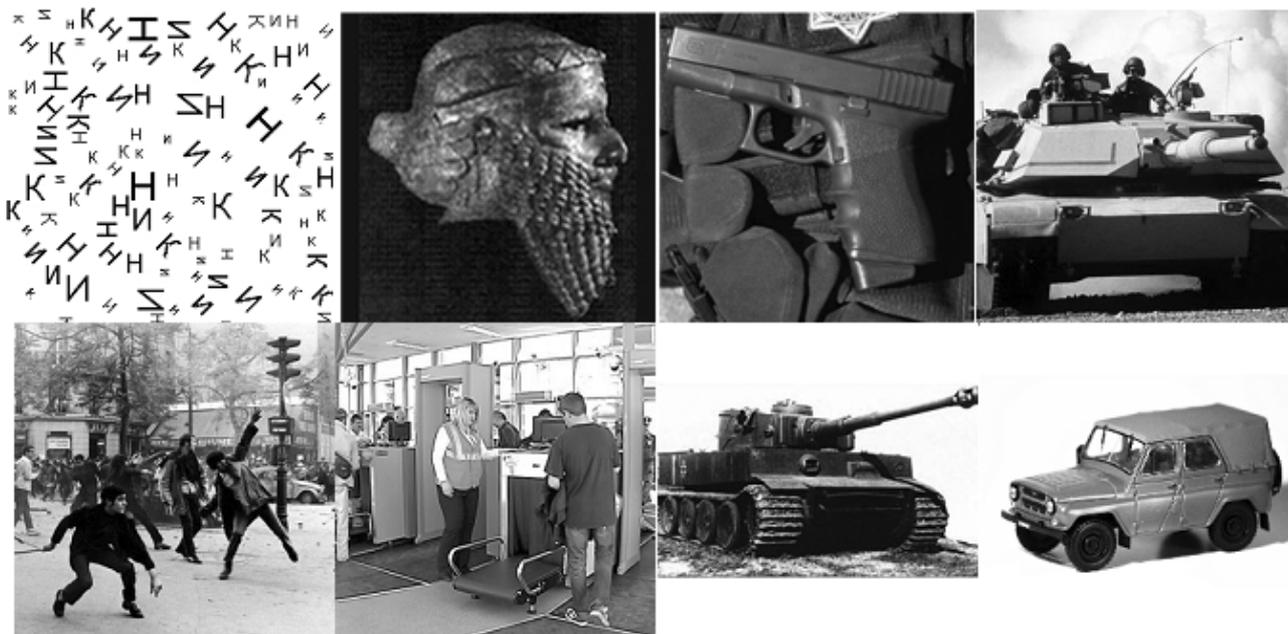
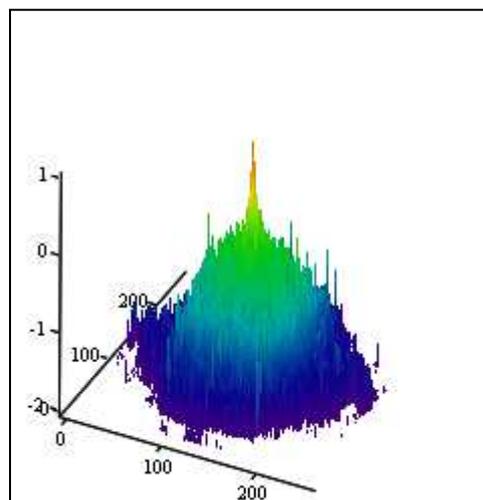
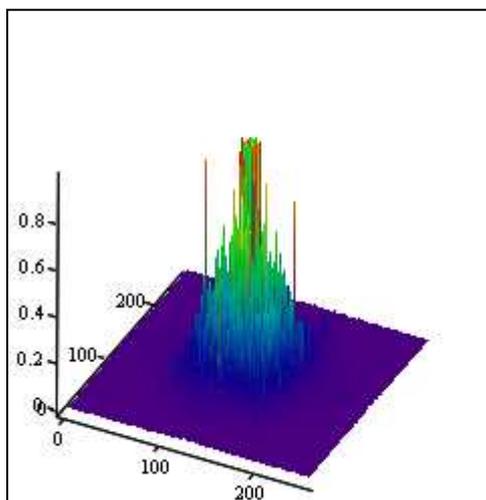
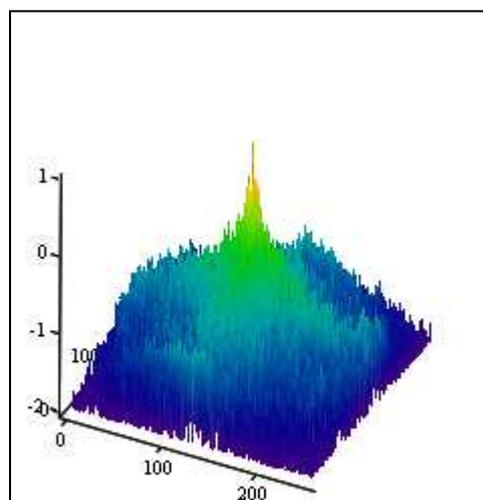
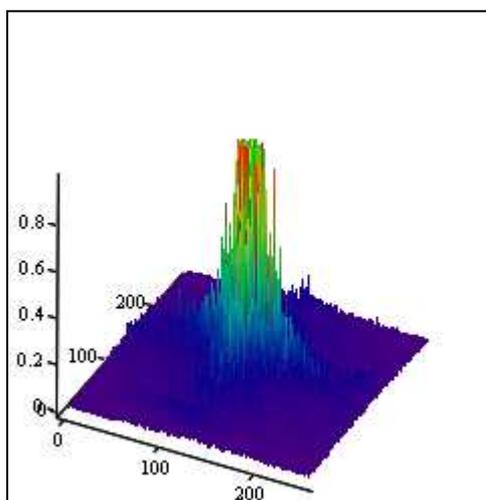
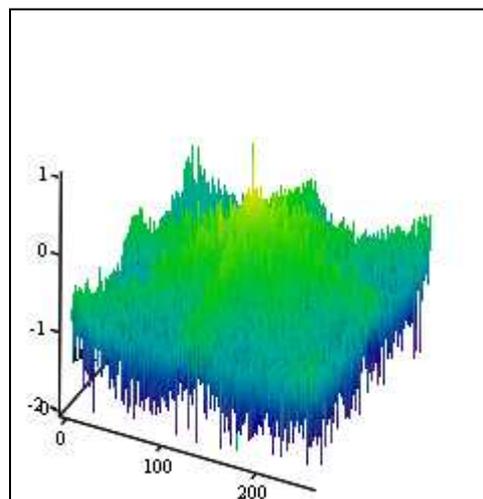
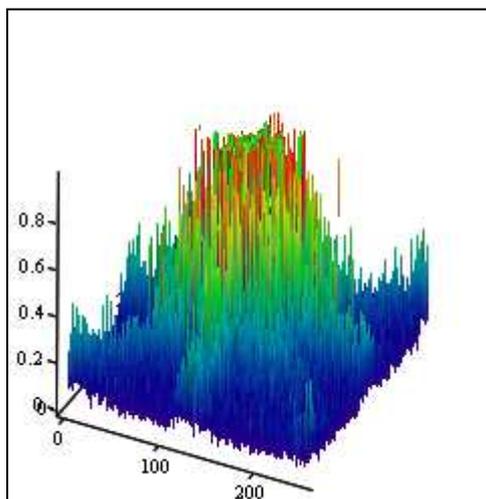
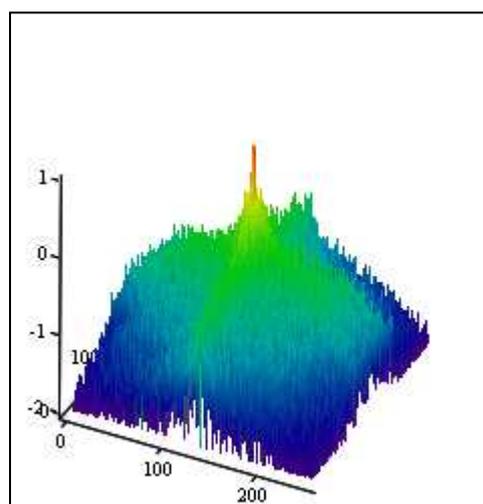
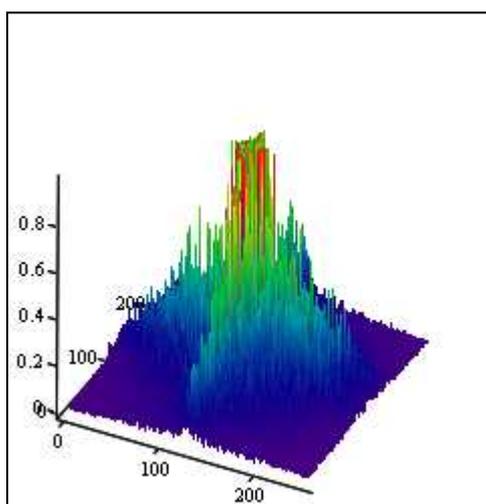
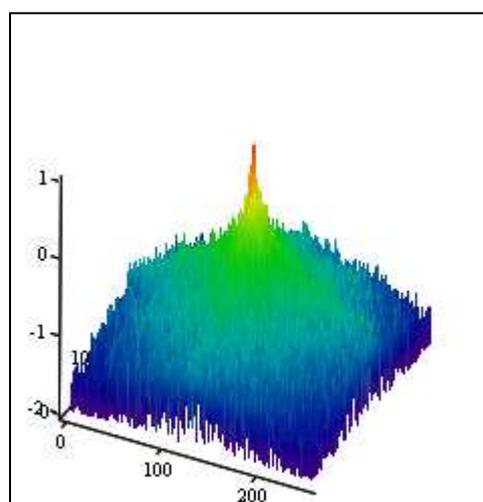
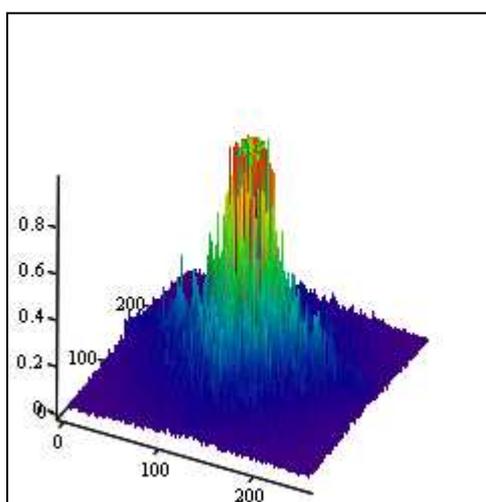
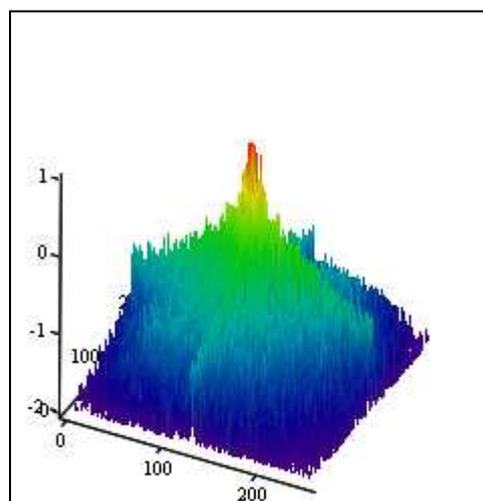
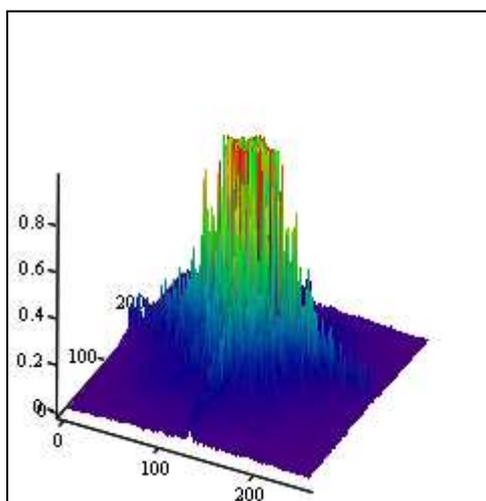


Рис. 1. А) Полутоновые изображения слева направо и сверху вниз: буквы (Шаблон); портрет царя Шумера и Аккада Саргона Древнего (конец 24 – начало 23 вв. до н.э.); пистолет на фоне бронезилета; танк «Абрамс» США; волнения в Париже 1968 год; досмотр на вокзале; танк «Тигр»; автомашина «УАЗ».





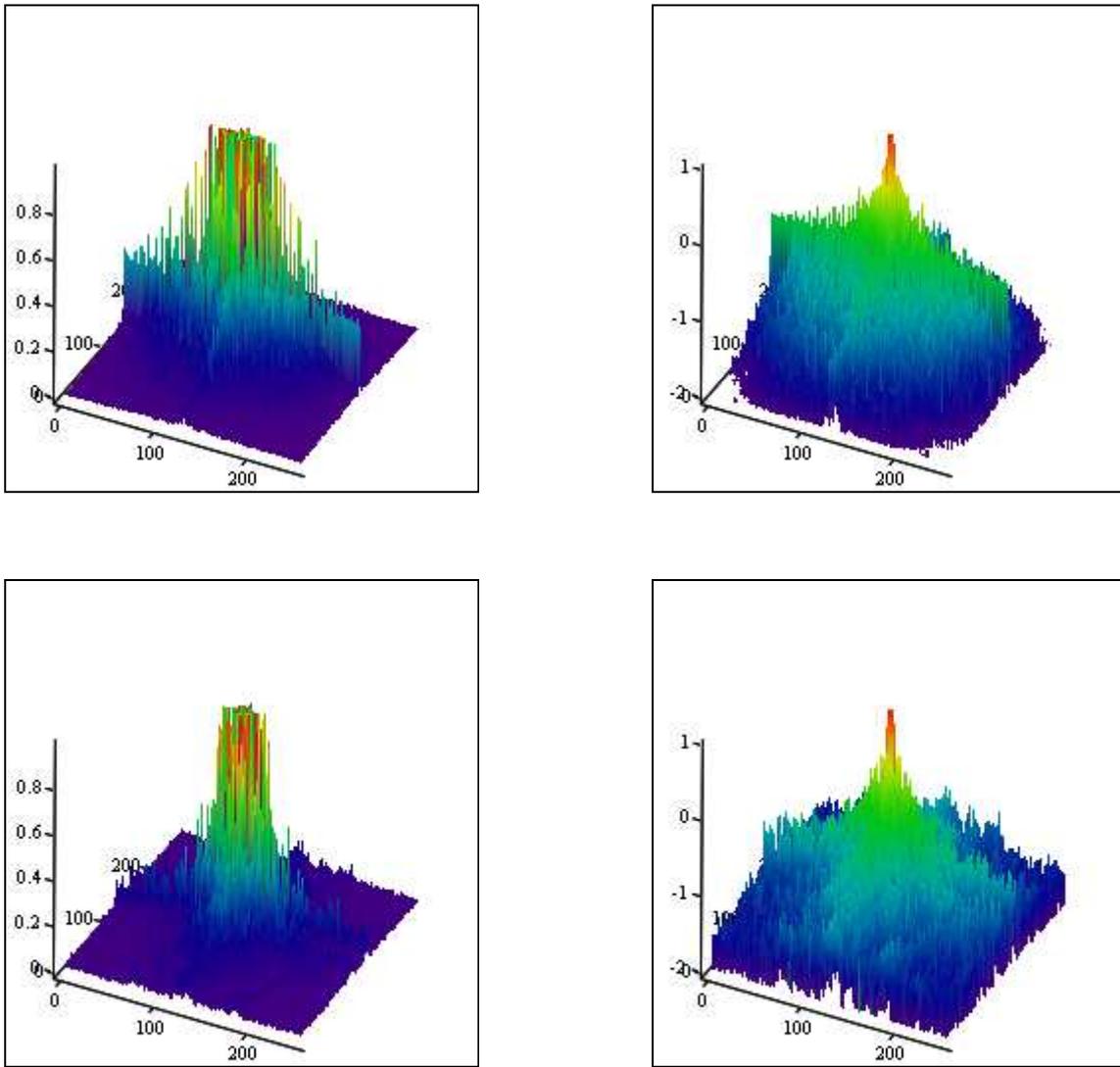


Рис.2. Представлены амплитудные спектры изображений в линейном (слева) и логарифмическом (справа) масштабе в виде пар, соответствующих изображениям на рис.1. для лучшей наглядности спектры были ограничены по вертикали (амплитуде).

Для того, чтобы лучше представлять общие тенденции амплитудных спектров на рис.2, нанесем эти спектры на один общий график в виде диагонального разреза логарифмов амплитудных спектров. Получим график, представленный на рис.3.

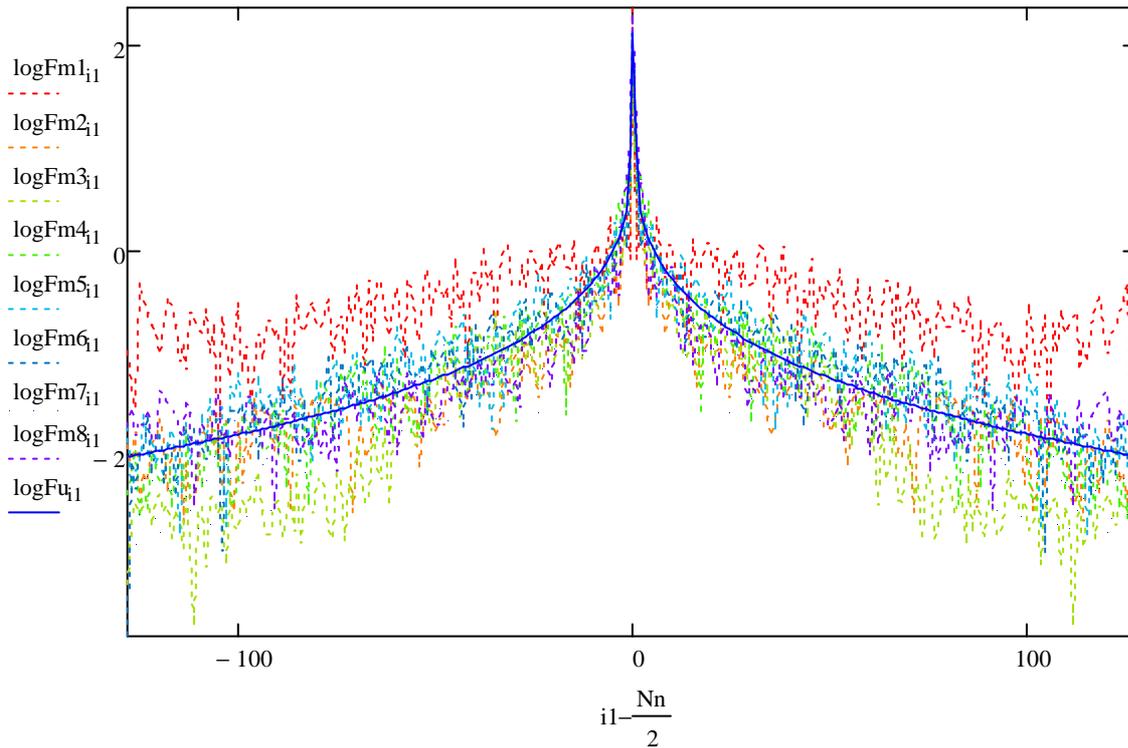


Рис.3. Графики диагональных разрезов логарифмов амплитудных спектров изображений на рис.1 – цветные точки, обобщенный (универсальный) спектр – синяя линия.

Для метода опорного изображения важен не столько сам амплитудный спектр опорного изображения, сколько спектр, усредненный по алгоритму [2]. На рис.4 представлен график усредненных спектров рис.3 в виде набора цветных точек.

На рис.3-4 синей линией показан график, соответствующий (1). На рис.5 представлен универсальный усредненный спектр соответствующий (1) в линейном и логарифмическом масштабе.

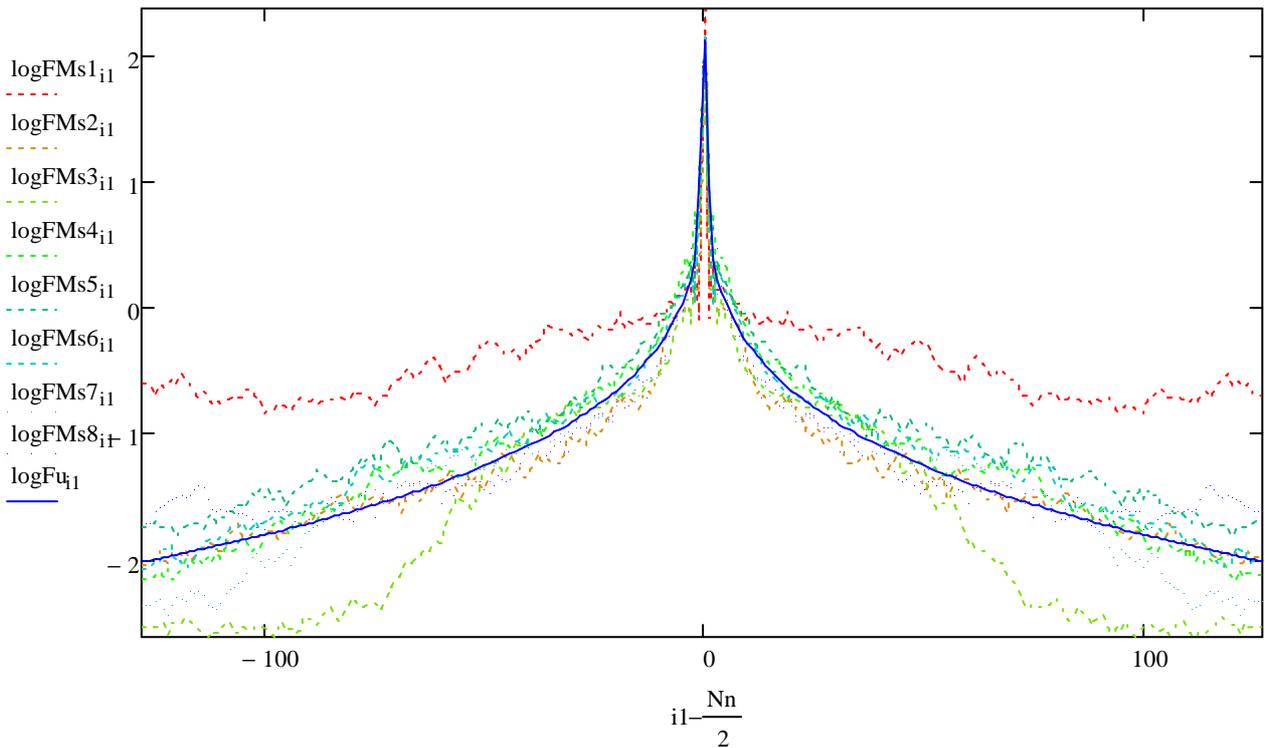


Рис.4. Графики диагональных разрезов логарифмов усредненных амплитудных спектров изображений на рис.1 – цветные точки, обобщенный (универсальный) спектр – синяя линия.

Во второй части статьи показано, что использование адаптивного МОИ вместо классического позволяет значительно ослабить влияние опорного изображения на результаты восстановления. Поэтому можно надеяться, что соответствующий выбор «универсального» усредненного спектра позволит с успехом его использовать для восстановления большого количества видов изображений. В качестве универсального усредненного спектра предлагается использовать следующую формулу:

$$FMo(i, j) = A * [B1 * \exp(-G1 * R^{0.75}) + B2 * \exp(-G2 * R^{0.12})], \quad (1)$$

где  $A = 128$  - половина максимальной яркости,  $B1 = 0.55$ ,  $B2 = 0.45$ ,  $G1 = 2.5$ ,  $G2 = 1.5$ ,  $R = i^2 + j^2$ .

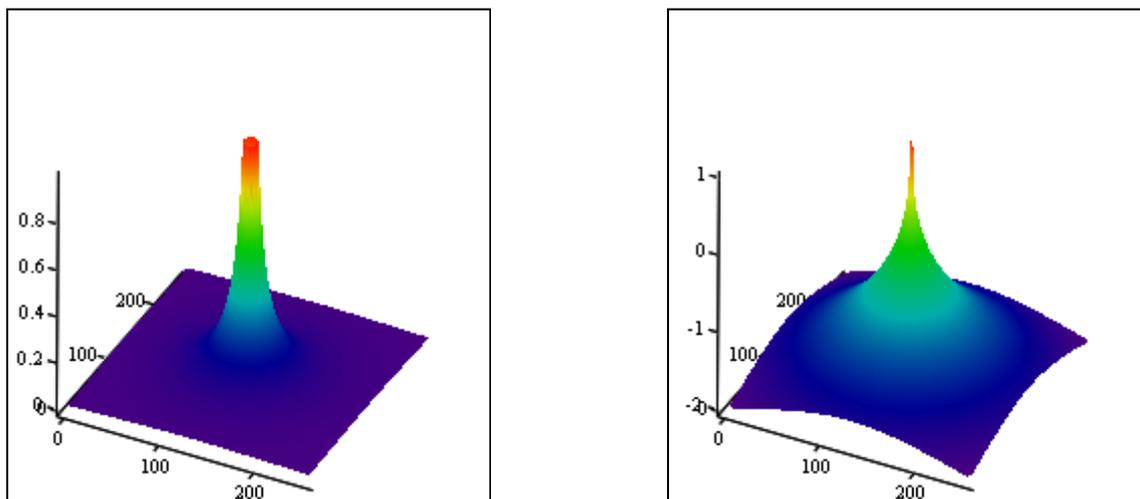


Рис.5. Представлен универсальный амплитудный спектр в линейном (слева) и логарифмическом (справа) масштабе. Для лучшей наглядности спектр был ограничен по вертикали (амплитуде).

Анализ рис.2-5 дает возможность сделать вывод о соответствии универсального усредненного опорного спектра (1) поведению изотропной части спектров изображений рис.1.

Представляется необходимым проверить справедливость (1) для изображений большей размерности. На рис.6 представлены изображения размера 1024x1024, для которых эта проверка была проведена.



Рис.6. Изображения 1024x1024 пикселей.

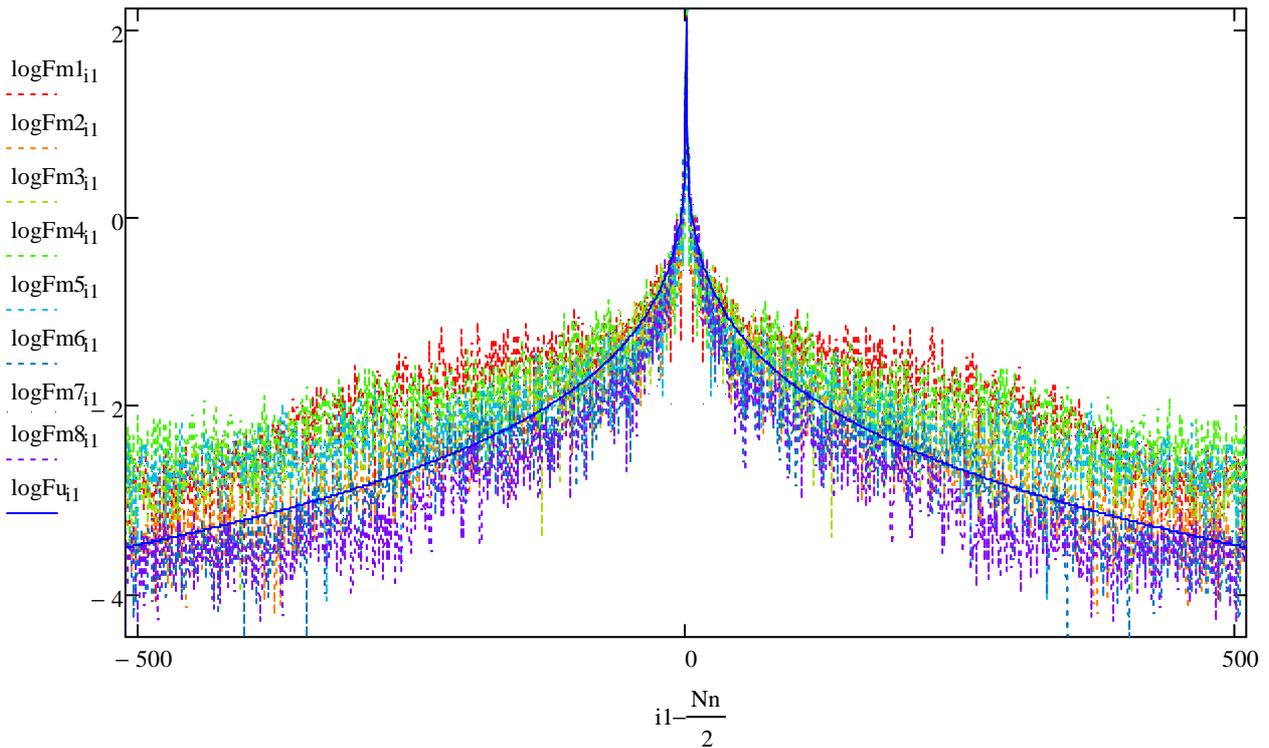


Рис.7. Графики диагональных разрезов логарифмов амплитудных спектров изображений на рис.6 – цветные точки, обобщенный (универсальный) спектр – синяя линия.

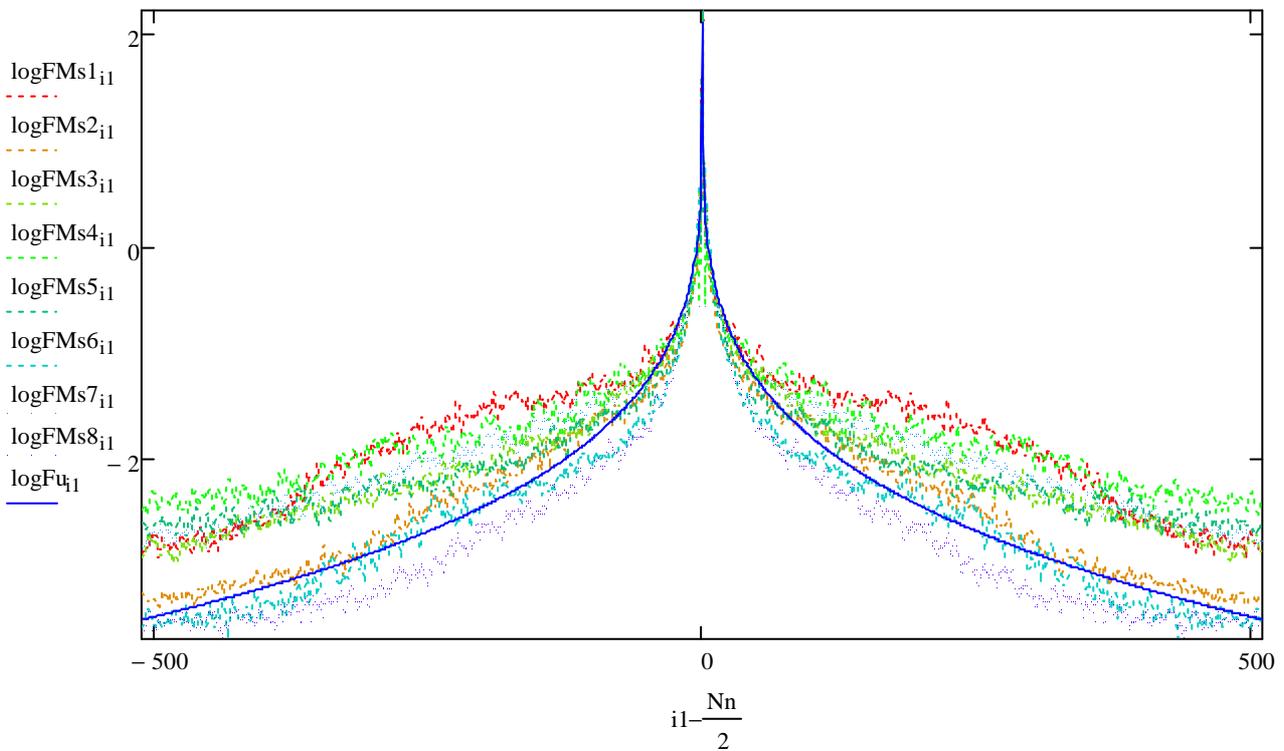


Рис.8. Графики диагональных разрезов логарифмов усредненных амплитудных спектров изображений на рис.6 – цветные точки, обобщенный (универсальный) спектр – синяя линия.

На рис.7-8 представлены цветными точками графики разрезов в логарифмическом масштабе соответственно амплитудных спектров и усредненных амплитудных спектров изображений на рис.6. Синей линией показан график, соответствующий (1).

Таким образом, из вышеприведенных рисунков следует, что (1) удовлетворительно описывает поведение изотропной части амплитудных спектров в достаточно широком диапазоне размеров изображений. Рассмотрим теперь использование этого универсального опорного спектра при использовании адаптивного метода опорного изображения (аМОИ).

В качестве первого тестового изображения используем изображение группы людей на рис.1. На рис.9 представлено это изображение до и после применения аппаратной функции Гаусса, описанной в части 1-2:

$$A(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{S^2}\right). \quad (2)$$



А



Б

Рис.9. Изображения людей до и после применения аппаратной функции (2) при  $S=6$ , соответственно А и Б.

Изображение, восстановленное с помощью аМОИ с применением универсального опорного спектра (1), представлено на рис.10.



А

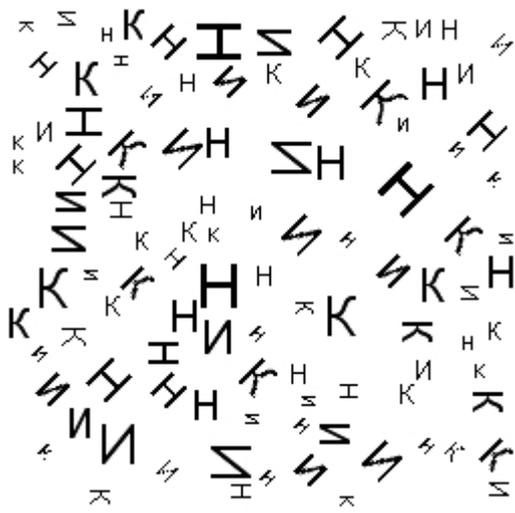


Б

Рис.10. Восстановленные аМОИ изображения людей после применения аппаратной функции (2) при  $S=0$  и  $S=6$ , соответственно А и Б.  $s_A=s_B=4$ .

Сравнение рис.9 и рис.10 позволяет сделать вывод, что, при выбранных границах допустимых отклонений спектра от опорного  $s_A=s_B=4$ , искажения, вносимые аМОИ малы (рис.9А и рис.10А). Потеря информации на высоких частотах при применении АФ с  $S=6$  приводит к появлению небольших артефактов при восстановлении – рис.10Б.

Рассмотрим результаты применения аМОИ с универсальным опорным спектром к восстановлению изображения букв – рис.11, представленных на рис.12.

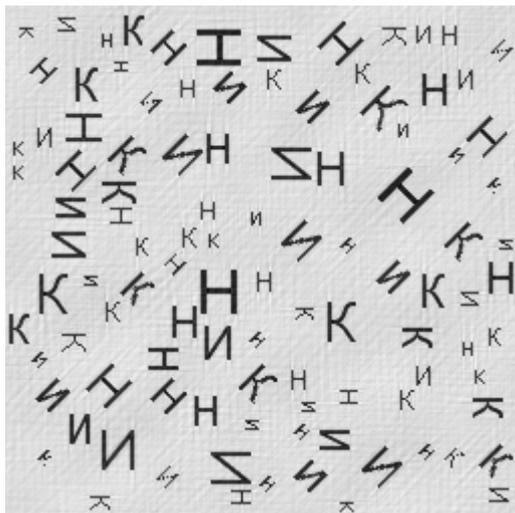


А

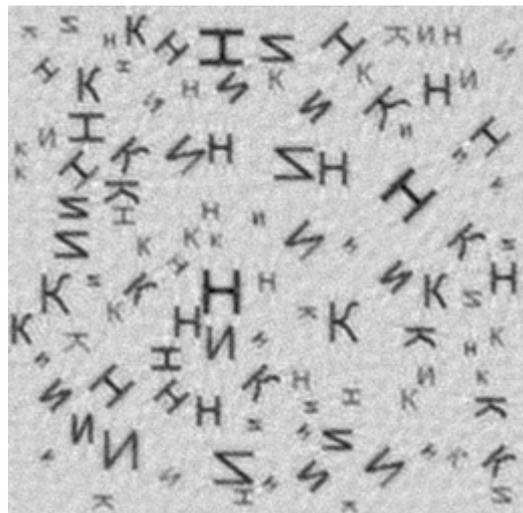


Б

Рис.11. Изображения букв до и после применения аппаратной функции (2) при  $S=6$ , соответственно А и Б.



А



Б

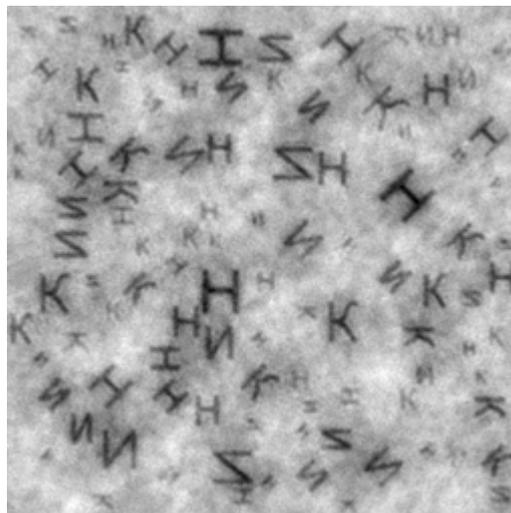
Рис.12. Восстановленные аМОИ изображения букв после применения аппаратной функции (2) при  $S=0$  и  $S=6$ , соответственно А и Б.  $s_A=s_B=4$ .

Рис.10 и рис.12 показывают, что применение аМОИ с универсальным опорным спектром дает результаты аналогичные результатам, приведенным во 2 части этой статьи при использовании спектра реального опорного изображения.

Если выбрать в качестве границ допустимых отклонений спектра от опорного  $sA=sB=1$ , то есть амплитудный спектр восстановленного изображения равен универсальному опорному спектру. Результаты восстановления аМОИ в этом случае представлены на рис.13.



А



Б

Рис.13. Восстановленные аМОИ изображения людей (рис.9) и букв (рис.11) после применения аппаратной функции (2) при  $S=6$ , соответственно А и Б.

$$sA=sB=1.$$

Несмотря на то, что амплитудные спектры изображений рис.12 одинаковы и равны универсальному опорному спектру (рис.5), сами изображения вполне узнаваемы. Это подтверждает сделанный ранее вывод во второй части этой статьи, о том, что наиболее значимая информация об изображении содержится не в амплитудной, а в фазовой части спектра изображения.

Таким образом, в данной части этой статьи продемонстрирована возможность использования универсального опорного спектра (2) для восстановления изображений различного размера и содержания.

## Выводы

В заключении ко всем трём частям работы «Коррекция пространственного спектра, искаженного оптической системой, с помощью метода опорного изображения» необходимо отметить, что за прошедший период времени мы углубили своё понимание работы метода опорного изображения, предложенного в [2], ответили на ряд вопросов, естественным образом возникающих при применении и обсуждении МОИ, и более детально стали представлять как преимущества этого метода, так и его ограничения. МОИ (в том числе и его адаптивный вариант) может использоваться не только применительно к задачам радиовидения, но и во многих других прикладных исследованиях, требующих повышения качества изображений.

Основные достижения:

1. В ходе сравнительного анализа выяснилось, что пространственные амплитудные спектры реальных изображений обладают общими закономерностями – быстрое уменьшение амплитуды с увеличением частоты вблизи 0, затем относительно медленное уменьшение.
2. Нарушение этих закономерностей приводит к появлению на изображении помех (артефактов). Возможна полная невозможность восстановления изображения из такого спектра.
3. Ограничение амплитудного спектра восстанавливаемого изображения сверху с помощью специально подготовленного «усредненного» амплитудного спектра «опорного» изображения является сутью разработанного метода опорного изображения (МОИ). Этот метод позволяет восстанавливать изображения в случае наличия помех и шумов, в том числе неизвестной природы.
4. Амплитудный спектр реального изображения можно условно разделить на аксиально-симметричную (изотропную) и анизотропную части. Анизотропная часть носит индивидуальные черты, присущие данному изображению. Изотропная часть обладает общими для всех изображений закономерностями, изменяется в меньшей мере при замене одного

изображения другим. Предлагается использовать в качестве спектра «опорного» именно эту часть спектра опорного изображения.

5. Разработан адаптивный вариант МОИ, менее зависимый от выбора «опорного» изображения. Сутью метода является то, что путем несложных манипуляций с амплитудным спектром восстанавливаемого изображения деформируют его так, чтобы он находился в заданной окрестности от выбранного спектра «опорного» изображения.
6. Использование адаптивного МОИ позволяет восстанавливать изображения, полученные с помощью оптической системы с неизвестными параметрами при условии неотрицательности спектра аппаратной функции этой оптической системы.
7. Разработана математическая модель «универсального» спектра опорного изображения.
8. Показано, что определяющая роль в формировании изображения принадлежит не амплитудной, а фазовой части пространственного спектра изображения. Именно это обстоятельство позволяет восстанавливать изображения при значительных искажениях амплитудного спектра фактически путем подмены одного амплитудного спектра другим – «опорным».

### **Литература**

1. Р. Гонсалес, Р. Вудс. Цифровая обработка изображений. М. «Техносфера», 2005, 1071 стр.
2. Зражевский А.Ю., Кокошкин А.В., Новичихин Е.П., Титов С.В., «Повышение качества радиоизображений». «Нелинейный Мир», № 9, 2010г., с. 582-590.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. - Методы решения некорректных задач. М.Наука, 1979.

4. Зражевский А.Ю., Голунов В.А, Смирнов М.Т., Новичихин Е.П., Лоскутов В.С., Ермаков Д.М. *Поляризационные радиотепловые портреты.*
5. А.Ю. Зражевский, А.В. Кокошкин, Влияние уровня боковых лепестков аппаратной функции на качество восстановленного изображения. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2013. №4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr13/8/text.html>
6. В.А. Голунов, Г.К.Загорин, А.Ю. Зражевский, Б.А. Розанов, А.В. Соколов, Л.Ф. Черная. Пассивная радиолокация на миллиметровых волнах. В кн. Вопросы перспективной радиолокации. М., Изд. «Радиотехника», 2003, с. 393-463.
7. Зражевский А. Ю., Коротков В.А. Особенности восстановления искаженного оптической системой радиоизображения с помощью метода опорного изображения. «Журнал радиоэлектроники» [электронный журнал]. 2013. №4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr13/3/text.html>
8. Зражевский А. Ю., Коротков В.А. Восстановление искаженного оптической системой с неизвестными параметрами радиоизображения с помощью метода опорного изображения. «Журнал радиоэлектроники» [электронный журнал]. 2013. №9.  
URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep13/9/text.html>