

## Влияние шума и частоты дискретизации на погрешность дискретного представления изображений

А. Л. Тимофеев<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org / 0000-0003-2137-8030](https://orcid.org/0000-0003-2137-8030), [a\\_l\\_t@inbox.ru](mailto:a_l_t@inbox.ru)

А. Х. Султанов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org / 0000-0002-2830-3498](https://orcid.org/0000-0002-2830-3498)

<sup>а</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Карла Маркса ул., 12, Уфа, 450008, РФ

**Введение:** цифровая регистрация изображений сопровождается не только появлением погрешности, обусловленной конечным пространственным разрешением фотоматрицы, но и воздействием шума, вклад которого в полную погрешность уменьшается при увеличении апертуры фотосенсоров в матрице. Таким образом, изменение частоты дискретизации оказывает противоположное влияние на погрешность дискретизации и погрешность, вызванную шумом. **Цель:** определение оптимальной частоты дискретизации изображений, обеспечивающей минимальную погрешность дискретизации при наличии шума. **Результаты:** исследована зависимость погрешности дискретного представления изображения от частоты дискретизации и уровня шума. Проведено моделирование процесса дискретизации изображения в присутствии шума. Построены зависимости среднеквадратического отклонения погрешности дискретизации, вызванной усечением спектра (уменьшением полосы пропускания фильтра нижних частот), и шумовой составляющей погрешности от частоты дискретизации. Сформулирована теорема о верхней границе теоремы отсчетов: при дискретизации функции конечной длительности при наличии шума существует конечное минимальное значение погрешности дискретизации, определяемое формой спектра функции и уровнем шума. **Практическая значимость:** результаты исследований целесообразно использовать при выборе фотоматрицы по числу пикселей для регистрации изображений в присутствии шума, а также при выборе полосы пропускания фильтра нижних частот для первичной обработки цифрового изображения.

**Ключевые слова** — дискретизация изображений, частота дискретизации, шум, погрешность дискретизации.

**Для цитирования:** Тимофеев А. Л., Султанов А. Х. Влияние шума и частоты дискретизации на погрешность дискретного представления изображений. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 5, с. 33–39. doi:10.31799/1684-8853-2021-5-33-39

**For citation:** Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. Influence of noise and sampling rate on the discrete image representation error. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 5, pp. 33–39 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-5-33-39

### Введение

Преобразование реального «физического» изображения в цифровую форму состоит из двух процедур — дискретизации и квантования, каждая из которых сопровождается появлением специфических погрешностей. Далее рассматривается дискретизация изображений по пространственным координатам и свойственные ей погрешности, определяющие отличие цифрового изображения от исходного аналогового и, соответственно, устанавливающие предел точности последующей цифровой обработки.

Цифровая регистрация изображений всегда сопровождается появлением шума — дефектов изображения, вносимых фотосенсорами и электронным оборудованием, обусловленных несовершенством технологий и фотонной природой света.

Рассмотрим задачу цифровой регистрации изображения как процесс пространственной дискретизации непрерывной функции яркости исходного изображения. Существенным условием

задачи является конечный размер изображения и, соответственно, бесконечный спектр пространственных частот. Восстановление пространственно-дискретного изображения производится с помощью интерполяционных функций конечной длительности, поэтому в восстановленном изображении появляются ошибки — ошибки дискретизации.

Методы минимизации погрешности дискретизации сигналов в цифровой связи рассмотрены, например, в работе [1]. Цифровая регистрация изображений имеет свои особенности [2]. В реальных системах дискретизации изображений в отличие от идеального случая выполняются следующие условия:

- дискретизирующая решетка имеет конечные размеры;
- ширина дискретизирующих импульсов заметно отличается от нуля.

Практически операция дискретизации осуществляется измерением сигнала с помощью датчика, который проводит усреднение по некоторой конечной площадке (апертуре).

Требования к величине погрешности дискретизации определяются областью применения и стоящими задачами. Достаточно широкой областью обработки изображений является цифровая голография. Применение цифровой голографии открывает широкие возможности для качественного и, более того, точного количественного анализа свойств объекта, таких как смещение точек поверхности при анализе деформаций, определение формы объекта, измерение коэффициента преломления в прозрачных средах, изучение траекторий частиц, микроскопия, радиоголография, помехоустойчивое кодирование и многое другое [3–11]. В упомянутых случаях изменение состояния изучаемого объекта приводит к изменению объектной волны и получаемой интерференционной картины, которая записывается цифровым образом. Влияние дискретности на точность воспроизведения цифровых изображений рассмотрено во многих работах, например, в [12–15], но в них основной задачей является выбор периода дискретизации изображения исходя из ширины пространственного спектра и не учитывается наличие шума в изображении.

Существует широкий круг задач, в которых требуется получение изображений особо высокого пространственного разрешения: медицина [16, 17], астрономия и микроскопия [18], обработка данных дистанционного зондирования Земли [19], компьютерное зрение [20], криминалистика [21] и т. д. В [22] рассмотрен метод оптимального линейного сверхразрешающего восстановления изображений, в котором учтено наличие шума, но не исследована взаимосвязь частоты пространственной дискретизации и уровня шума, фиксируемого в цифровом изображении.

## Результаты моделирования

Главным фактором, определяющим выбор частоты дискретизации, является ширина пространственного спектра регистрируемого изображения. Нижнюю границу частоты дискретизации определяет теорема отсчетов, требующая в идеальном случае частоты дискретизации не менее удвоенной граничной частоты спектра изображения. При невыполнении этого условия возникает алиасинг — эффект наложения соседних по оси частот копий дискретного спектра, приводящий к искажению дискретного изображения, в частности, появлению муара. При дискретизации изображений со спектром, не имеющим четко выраженной граничной частоты, выбор частоты дискретизации часто сводится к максимальному значению, которое доступно в данной ситуации с точки зрения аппаратных возможностей, так как действует однозначное правило:

чем больше частота дискретизации, тем меньше погрешность дискретизации, вызванная потерей части спектра сигнала выше половины частоты дискретизации.

При рассмотрении двумерных изображений используется их описание в матричной форме, соответствующей числу и расположению фотосенсоров в прямоугольной фотоматрице. Частота дискретизации по каждой координате определяется шагом сенсоров по строкам и столбцам матрицы. В большинстве случаев шаг их размещения по обеим координатам одинаков, поэтому для уменьшения объема вычислений при исследовании процесса дискретизации достаточно рассматривать одну строку изображения.

При дискретизации с частотой  $\omega_d$  одномерной функции яркости  $s(t)$  изображения размером  $t_s$ , имеющей бесконечный спектр  $S(j\omega)$ , и последующем восстановлении функции  $s(t)$  с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ) с частотой среза  $\omega_d/2$  происходит подавление спектра выше частоты  $\omega_d/2$ , т. е. восстановленное изображение имеет спектр

$$S_d(j\omega) = \{S(j\omega), -\omega_d/2 < \omega < \omega_d/2; S_d(j\omega) = 0, \omega \leq -\omega_d/2, \omega \geq \omega_d/2\}.$$

Погрешность, обусловленная искажением функции  $s(t)$  вследствие усечения спектра, является методической погрешностью, возникающей при дискретизации любой физически реализуемой функции. Эту погрешность далее будем называть погрешностью дискретизации.

Проведем анализ зависимости погрешности дискретизации от частоты дискретизации для элементарного изображения, содержащего одну узкую полосу на черном фоне, путем моделирования в среде MATLAB. Функция яркости выбранного изображения имеет вид

$$s(nT) = \sin(\pi n/16 + \pi) \text{ при } n_1 < n < n_2; s(nT) = 0 \text{ при } n \leq n_1, n \geq n_2,$$

где  $n = 1, \dots, 2048$ ;  $T = t_s/2048$ ;  $n_1 = 1016$ ;  $n_2 = 1032$ ; частота дискретизации  $\omega_d = 1/T = 2048/t_s$ .

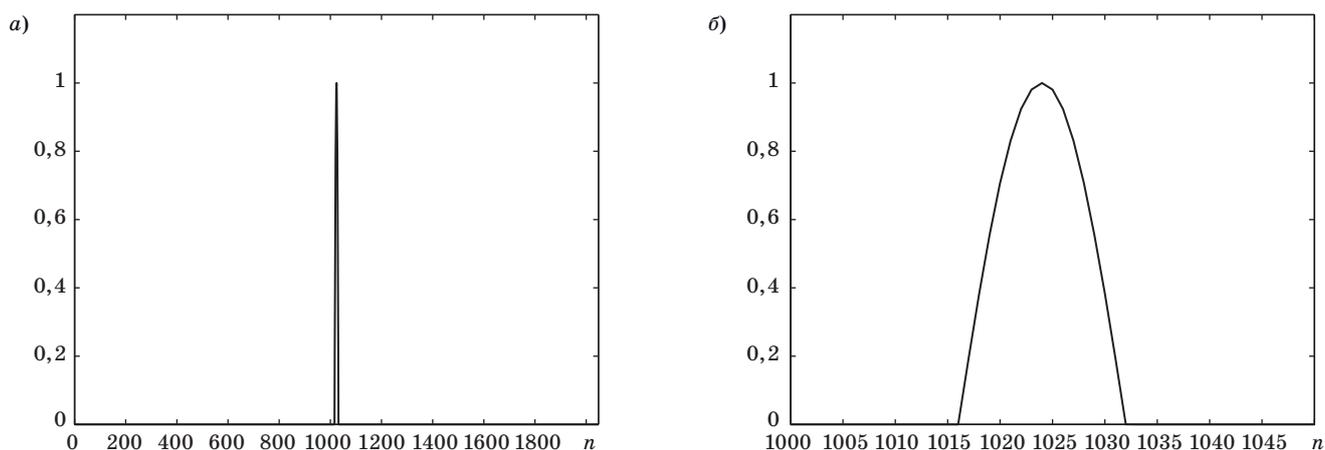
График функции  $s(nT)$  приведен на рис. 1.

Вещественная часть спектра  $S(k)$  функции  $s(nT)$  представлена на рис. 2, а.

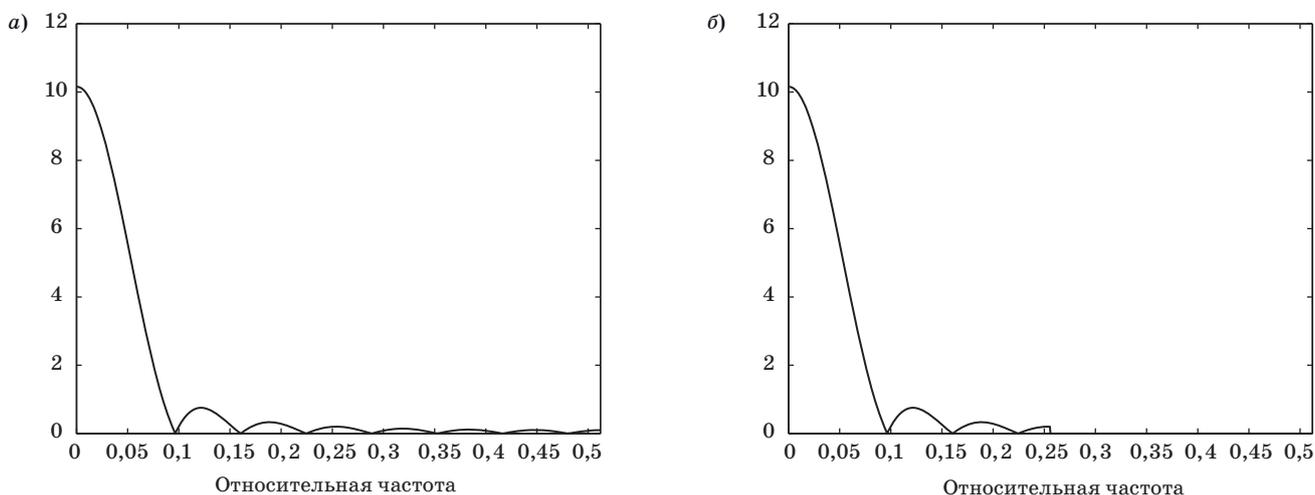
Уменьшим в два раза частоту дискретизации (с соответствующим уменьшением частоты среза ФНЧ), тогда спектр  $S_d(k)$  примет вид, показанный на рис. 2, б.

Фрагмент функции  $s_d(nT)$  демонстрирует искажения, возникающие в результате подавления высокочастотной части спектра (рис. 3).

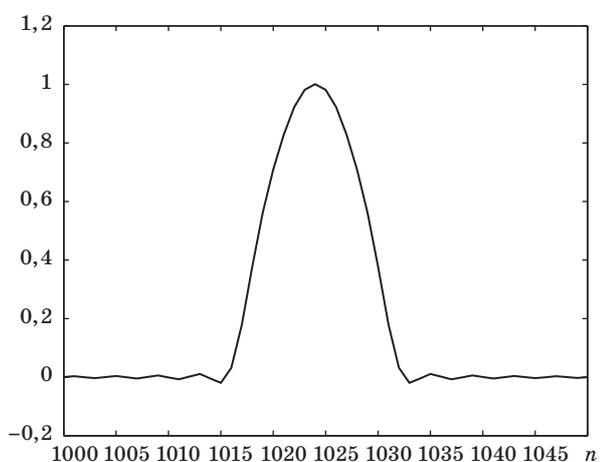
Оценим погрешность дискретизации с помощью среднеквадратического отклонения функции  $s_d(nT)$  от  $s(nT)$ .



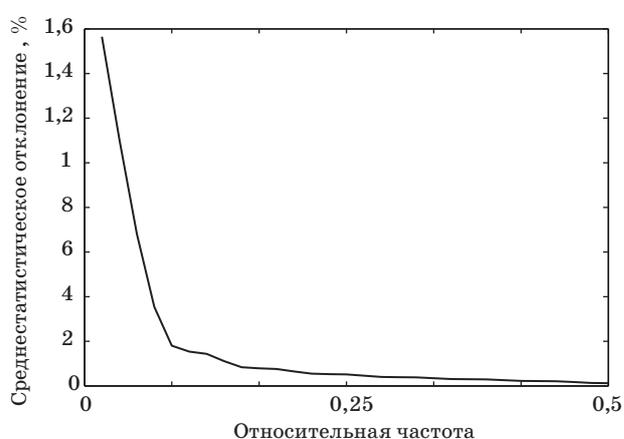
■ **Рис. 1.** Функция яркости изображения: *a* — полный вид функции  $s(nT)$ ; *б* — увеличенный фрагмент  
 ■ **Fig. 1.** Image brightness function: *a* — full view of the function  $s(nT)$ ; *б* — enlarged fragment



■ **Рис. 2.** Спектр изображения: *a* — исходный; *б* — после фильтрации  
 ■ **Fig. 2.** Image spectrum: *a* — original; *б* — after filtering



■ **Рис. 3.** Функция яркости восстановленного изображения  
 ■ **Fig. 3.** Brightness function of the reconstructed image

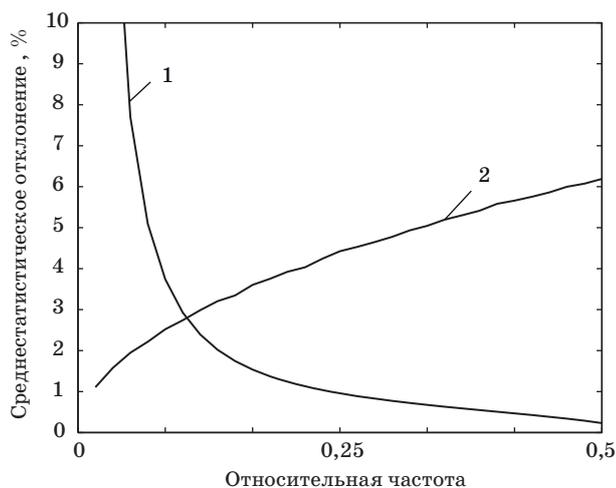


■ **Рис. 4.** Зависимость погрешности дискретизации от частоты дискретизации  
 ■ **Fig. 4.** Dependence of the sampling error on the sampling frequency

Зависимость погрешности дискретизации от частоты дискретизации  $\omega_d$  показана на рис. 4.

Кроме физической нереализуемости изображений с ограниченным спектром, в условие теоремы отсчетов входит и другая нереализуемая идеализация, которая обычно в этой связи не упоминается, — отсутствие шума. В реальных изображениях всегда присутствует шум, но его вклад в полную погрешность цифрового изображения зависит от плотности размещения фотосенсоров в матрице и их апертуры [2]. Увеличение размера фотосенсоров и, соответственно, уменьшение шага их размещения приводит к сглаживанию дискретного изображения и уменьшению шума. Таким образом, изменение частоты дискретизации оказывает противоположное влияние на погрешность дискретизации и погрешность, вызванную шумом. Для исследования этого явления было проведено моделирование в среде MATLAB процесса дискретизации функции  $s(nT)$ , приведенной на рис. 1, в присутствии шума и последующего восстановления — формирования функции  $s_d(nT)$  (см. рис. 3). В качестве источника шума использовался генератор белого шума `awgn` — встроенная функция MATLAB. Рассчитывалось отдельно среднеквадратическое отклонение погрешности дискретизации, вызванной усечением спектра (уменьшением полосы пропускания ФНЧ), и шумовая составляющая погрешности — среднеквадратическое отклонение шума после прохождения ФНЧ.

Зависимости этих погрешностей от частоты дискретизации при отношении сигнал/шум 40 дБм показаны на графиках (рис. 5).



■ Рис. 5. Зависимость среднеквадратических погрешностей от частоты дискретизации: 1 — погрешность дискретизации; 2 — шумовая составляющая

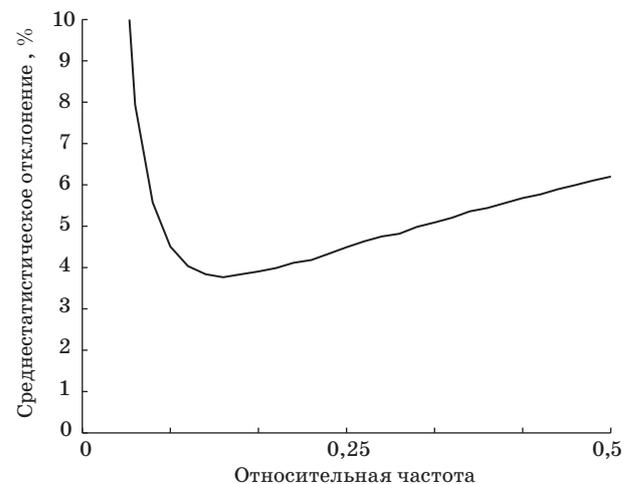
■ Fig. 5. Dependence of the root mean square errors on the sampling frequency: 1 — sampling error; 2 — noise component

Зависимость среднеквадратического значения полной погрешности (дискретизации и шумовой составляющей) от частоты дискретизации приведена на рис. 6.

Из графика видно, что полная погрешность дискретизации имеет выраженный минимум при некоторой частоте дискретизации, зависящей от формы функции яркости изображения и, соответственно, скорости убывания ее спектра и интенсивности шума. Отсюда следует, что при выборе периода дискретизации изображения (выборе шага расположения элементов фотоматрицы) надо учитывать не только характеристики фиксируемого изображения, но и уровень шума. Таким образом, можно сформулировать теорему о верхней границе теоремы отсчетов для функций ограниченной длительности при наличии шума: при дискретизации функции конечной длительности при наличии шума существует конечное минимальное значение погрешности дискретизации, определяемое формой спектра функции и уровнем шума.

Варианты практического применения полученных результатов зависят от области применения и условий получения изображений:

1. Регистрация однотипных изображений в схожих шумовых условиях, например аэрофотосъемка. В этом случае параметры изображения и шума учитываются при выборе фотоматрицы по числу пикселей. Второй способ: при использовании матрицы с большим числом пикселей выбирается ФНЧ для первичной обработки цифрового изображения с полосой пропускания, равной половине оптимальной частоты дискретизации, обеспечивающей минимальную суммарную погрешность.



■ Рис. 6. Зависимость полной погрешности от частоты дискретизации

■ Fig. 6. Dependence of the total error on the sampling frequency

2. Фотоматрица универсального применения. Для минимизации погрешности дискретизации возможна оценка уровня шума и характера изображения путем цифровой предобработки изображения, фиксируемого фотоматрицей, и настройка адаптивного ФНЧ, который формирует выходное изображение при оптимальной граничной частоте.

## Заключение

В работе проведено исследование полной погрешности дискретизации изображений в присутствии шума. Показано, что изменение частоты дискретизации оказывает противоположное влияние на погрешность дискретизации и погрешность, вызванную шумом. В результате моделирования процесса дискретизации изображения в присутствии белого шума установлено,

что существует оптимальное значение частоты дискретизации, зависящее от формы пространственного спектра изображения и уровня шума. Полученные результаты изменяют подход к выбору фотоматрицы по количеству пикселей и дают возможность минимизировать погрешность дискретизации.

## Финансовая поддержка

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-29-00041, а также Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФГБОУ ВО УГАТУ # FEUE-2020-0007 по теме «Теоретические основы моделирования и семантического анализа процессов преобразования вихревых электромагнитных полей в инфокоммуникационных системах».

## Литература

1. Feher D. *Wireless Digital Communication: Modulation and Spread Spectrum Applications*. Prentice Hall PTR, New Jersey, 1995. 520 p.
2. Гужов В. И., Марченко И. О., Хайдуков Д. С., Ильных С. П. Дискретизация изображений в реальных системах с помощью обобщенных функций. *Автоматика и программная инженерия*, 2016, № 4 (18), с. 45–52.
3. Корешев С. Н., Смородинов Д. С., Никаноров О. В. Влияние дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изображающие свойства. *Компьютерная оптика*, 2016, т. 40, № 6, с. 793–801. doi:10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801
4. Шойдин С. А. Синтез голограмм на приемном конце канала связи с объектом голографирования. *Компьютерная оптика*, 2020, т. 44, № 4, с. 547–551. doi:10.18287/2412-6179-CO-694
5. Тимофеев А. Л., Султанов А. Х. Построение помехоустойчивого кода на базе голографического представления произвольной цифровой информации. *Компьютерная оптика*, 2020, т. 44, № 6, с. 978–984. doi:10.18287/2412-6179-CO-739
6. Корешев С. Н., Никаноров О. В., Смородинов Д. С. Изображающие свойства дискретных голограмм. I. Влияние дискретности голограммы на восстановленное изображение. *Оптический журнал*, 2014, т. 81, № 3, с. 14–19.
7. Корешев С. Н., Никаноров О. В., Смородинов Д. С. Изображающие свойства дискретных голограмм. II. Влияние модификации структуры голограммы и высокой, превышающей частоту Найквиста, несущей пространственной частоты голограммной структуры на восстановленное изображение. *Оптический журнал*, 2014, т. 81, № 4, с. 48–53.
8. Тимофеев А. Л. Использование голографического кодирования для повышения помехоустойчивости каналов связи. *ИТпортал*, 2018, т. 18, № 2. <http://itportal.ru/science/tech/ispolzovanie-golograficheskogo-kodi/> (дата обращения: 25.05.2019).
9. Пат. 2450439 РФ. Способ кодирования и декодирования цифровых данных, основанный на принципах цифровой голографии/ С. Л. Френкель (РФ), Ш. Долев (IL). № 2010145892/08; заявл. 11.11.2010; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13. 11 с.
10. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. Holographic method of error-correcting coding. *Proc. SPIE 11146 "Optical Technologies for Telecommunications 2018", Proceedings Volume 11146, 111461A*, 2019. doi:10.1117/12.2526922
11. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Filatov P. E. Holographic method for storage of digital information. *Proc. SPIE 11516 "Optical Technologies for Telecommunications 2019", 1151604*, 2020. doi:10.1117/12.2566329
12. Чапурский В. В. Получение радиоголографических изображений объектов на основе разреженных антенных решеток типа ММО с одночастотным и многочастотным излучением. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2011, № 4, с. 72–91.
13. Семенчик В. Г., Пахомов В. А. Радиоголографическая система формирования многочастотных изображений. *Электроника*. 2004, № 1, с. 50–51.
14. Pahomov V., Semenchik V. G., Kurilo S. Reconstructing reflecting object images using born approximation. *Proc. of 35<sup>th</sup> European Microwave Conference*, 2005, CNIT la Defense, Paris, France, pp. 1375–1378.
15. Голунов В. А., Коротков В. А., Коротков К. В. Обоснование возможности получения радиоизображе-

- ний объектов методом одномерных голограмм. *Радиотехника и электроника*, 2019, т. 64, № 1, с. 38–43. doi:10.1134/S0033849419010066
16. Isaac J. S., Kulkarni R. Super resolution techniques for medical image processing. *2015 International Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD)*, 2015, 7095900. doi:10.1109/ICTSD.2015.7095900
  17. Sano Y., Mori T., Goto T., Hirano S., Funahashi K. Super-resolution method and its application to medical image processing. *2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, 2017, pp. 1–2. doi:10.1109/GCCE.2017.8229301
  18. Chainais P., Pfennig P., Leray A. Quantitative control of the error bounds of a fast super-resolution technique for microscopy and astronomy. *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2014, pp. 2853–2857. doi:10.1109/ICASSP.2014.6854121
  19. Shen H., Ng M. K., Li P., Zhang L. Super-resolution reconstruction algorithm to MODIS remote sensing images. *Computer Journal*, 2009, vol. 52, iss. 1, pp. 90–100. doi:10.1093/comjnl/bxm028
  20. Shi F., Yuan J., Zhu X. Fast super-resolution reconstruction for video-based pattern recognition. *2008 Fourth International Conference on Natural Computation*, 2008, vol. 4, pp. 135–139. doi:10.1109/ICNC.2008.553
  21. Zamani N. A., Darus M. Z. A., Abdullah S. N. H., Nordin M. J. Multiple-frames super-resolution for closed circuit television forensics. *2011 International Conference on Pattern Analysis and Intelligence Robotics*, 2011, vol. 1, pp. 36–40. doi:10.1109/ICPAIR.2011.5976908
  22. Максимов А. И., Сергеев В. В. Метод оптимального линейного сверхразрешающего восстановления изображений. *Компьютерная оптика*, 2021, т. 45, № 5, с. 692–701. doi:10.18287/2412-6179-CO-909

UDC 621.391

doi:10.31799/1684-8853-2021-5-33-39

**Influence of noise and sampling rate on the discrete image representation error**A. L. Timofeev<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org / 0000-0003-2137-8030, a\_l\_t@inbox.ruA. Kh. Sultanov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org / 0000-0002-2830-3498<sup>a</sup>Ufa State Aviation Technical University, 12, Karl Marks St., 450008, Ufa, Russian Federation

**Introduction:** Digital registration of images is accompanied not only by an error caused by finite spatial resolution of the photo matrix, but also by the effect of noise whose contribution to the total error decreases with an increase in the aperture of the photosensors in the matrix. Thus, changing the sampling rate has the opposite effect on the sampling error and on the error caused by the noise. **Purpose:** Finding the optimal image sampling rate which would provide the minimum sampling error in the presence of noise. **Results:** We have studied how an image discrete representation error depends on the sampling frequency and noise level. The image sampling process in the presence of noise was simulated in the MATLAB environment. The dependencies of the root-mean-square deviation of the sampling error caused by spectrum truncation (decrease in the passband of the low-pass filter) and the noise component of the error on the sampling frequency were plotted. A theorem is formulated on the upper bound of the sampling theorem: when sampling a function of finite duration in the presence of noise, there is a finite minimum value of the sampling error which is determined by the shape of the spectrum of the function and the noise level. **Practical relevance:** It is advisable to use the research results when choosing a photomatrix by the number of pixels for recording images in the presence of noise, as well as when choosing a low-pass filter passband for primary processing of a digital image.

**Keywords** — image sampling, sampling rate, noise, sampling error.

**For citation:** Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. Influence of noise and sampling rate on the discrete image representation error. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 5, pp. 33–39 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-5-33-39

**Financial support**

This work was partially supported by Russian Science Foundation (project No. 22-29-00041) and by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for research under the State Assignment of FSBEI HE USATU No. FEUE-2020-0007 on the topic “Theoretical foundations of modeling and semantic analysis of the processes of transformation of vortex electromagnetic fields in infocommunication systems”.

**References**

1. Feher D. *Wireless Digital Communication: Modulation and Spread Spectrum Applications*. Prentice Hall PTR, New Jersey, 1995. 520 p.
2. Guzhov V. I., Marchenko I. O., Hajdukov D. S., Ilynikh S. P. Sampling the image in real systems using generalized functions. *Automatics & Software Engineering*, 2016, no. 4 (18), pp. 45–52 (In Russian).
3. Koreshev S. N., Smorodinov D. S., Nikanorov O. V. Influence of the discreteness of synthesized and digital holograms on their imaging properties. *Computer Optics*, 2016, vol. 40, no. 6, pp. 793–801. doi:10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801 (In Russian).
4. Shoidin S. A. Synthesis of holograms at the receiving end of the communication channel with the holographic object. *Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 4, pp. 547–551. doi:10.18287/2412-6179-CO-694 (In Russian).
5. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. Building a noise-tolerant code based on a holographic representation of arbitrary digital information. *Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 6, pp. 978–984. doi:10.18287/2412-6179-CO-739 (In Russian).
6. Koreshev S. N., Nikanorov O. V., Smorodinov D. S. Imaging properties of discrete holograms. I. Influence of the discreteness of the hologram on the reconstructed image. *Optical Journal*, 2014, vol. 81, no. 3, pp. 14–19 (In Russian).

7. Koreshev S. N., Nikanorov O. V., Smorodinov D. S. Imaging properties of discrete holograms. II. Influence of the modification of the structure of the hologram and the high, exceeding the Nyquist frequency, carrier of the spatial frequency of the hologram structure on the reconstructed image. *Optical Journal*, 2014, vol. 81, no. 4, pp. 48–53 (In Russian).
8. Timofeev A. L. The use of holographic coding to increase noise immunity of communication channels. *ITportal*, 2018, vol. 18, no. 2. Available at: <http://itportal.ru/science/tech/ispolzovanie-golograficheskogo-kodi/> (accessed 25 May 2019) (In Russian).
9. Frenkel S. L., Dolev S. *Sposob kodirovaniya I dekodirivaniya cifrovyyh dannyh, osnovannyyi na principah cifrovoi golografii*. [A method for encoding and decoding digital data based on the principles of digital holography]. Patent RU, no. 2450439, 2010.
10. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. Holographic method of error-correcting coding. *Proc. SPIE 11146 "Optical Technologies for Telecommunications 2018", Proceedings Volume 11146, 111461A*, 2019. doi:10.1117/12.2526922
11. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Filatov P. E. Holographic method for storage of digital information. *Proc. SPIE 11516 "Optical Technologies for Telecommunications 2019", 1151604*, 2020. doi:10.1117/12.2566329
12. Chapurskii V. V. Receiving the radio-holographic images of objects on the basis of disperse MIMO-type antenna arrays with the single-frequency and multi-frequency radiations. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2011, no. 4, pp. 72–91 (In Russian).
13. Semenchik V. G., Pahomov V. A. Radio holographic multi-frequency imaging system. *Electronics*, 2004, no. 1, pp. 50–51 (In Russian).
14. Pahomov V. A., Semenchik V. G., Kurilo S. Reconstructing reflecting object images using born approximation. *Proc. of 35<sup>th</sup> European Microwave Conference*, 2005, CNIT la Defense, Paris, France, pp. 1375–1378.
15. Golunov V. A., Korotkov V. A., Korotkov K. V. Substantiation of the possibility of obtaining radio images of objects by the method of one-dimensional holograms. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2019, vol. 64, no. 1, pp. 38–43. doi:10.1134/S0033849419010066 (In Russian).
16. Isaac J. S., Kulkarni R. Super resolution techniques for medical image processing. *2015 International Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD)*, 2015, 7095900. doi:10.1109/ICTSD.2015.7095900
17. Sano Y., Mori T., Goto T., Hirano S., Funahashi K. Super-resolution method and its application to medical image processing. *2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, 2017, pp. 1–2. doi:10.1109/GCCE.2017.8229301
18. Chainais P., Pfennig P., Leray A. Quantitative control of the error bounds of a fast super-resolution technique for microscopy and astronomy. *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2014, pp. 2853–2857. doi:10.1109/ICASSP.2014.6854121
19. Shen H., Ng M. K., Li P., Zhang L. Super-resolution reconstruction algorithm to MODIS remote sensing images. *Computer Journal*, 2009, vol. 52, iss. 1, pp. 90–100. doi:10.1093/comjnl/bxm028
20. Shi F., Yuan J., Zhu X. Fast super-resolution reconstruction for video-based pattern recognition. *2008 Fourth International Conference on Natural Computation*, 2008, vol. 4, pp. 135–139. doi:10.1109/ICNC.2008.553
21. Zamani N. A., Darus M. Z. A., Abdullah S. N. H., Nordin M. J. Multiple-frames super-resolution for closed circuit television forensics. *2011 International Conference on Pattern Analysis and Intelligence Robotics*, 2011, vol. 1, pp. 36–40. doi:10.1109/ICPAIR.2011.5976908
22. Maksimov A. I., Sergeev V. V. Optimal super-resolution linear image recovery method. *Computer Optics*, 2021, vol. 45, no. 5, pp. 692–701. doi:10.18287 / 2412-6179-CO-909

#### ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail ([ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*