

Меры искажения на основе энтропийных характеристик для анализа цифровых изображений

В.Н. Горбачев, И. К. Метелев, Е.М. Кайнарова, Е.С. Яковлева
Северо-Западный институт печати

Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна, Санкт-Петербург, Россия
{Елена Кайнарова}helenkainarova@gmail.com

Аннотация

Для характеристики различия двух цифровых изображений известен большой набор мер. Однако из-за отсутствия универсального критерия выбор подходящей меры, описывающей искажения в каждом конкретном случае, превращается в самостоятельную задачу. Для процесса бинаризации, известного в полиграфии как растривание, и процесса встраивания цифровых данных, это область современной стеганографии, оказываются эффективными меры на основе относительной энтропии.

В стеганографии с помощью относительной энтропии сформулирован критерий ϵ -секретности. Секретность является важным свойством, которое отличает любую профессиональную стеганографическую систему. На примере задачи встраивания бинарного изображения в полутонное рассмотрена секретность двух алгоритмов, для которых вычислено значение относительной энтропии, усредненное по 2000 изображений. Аналогично критерию секретности с помощью относительной энтропии может быть введен критерий устойчивости к шумам для алгоритмов бинаризации, которые необходимы для печати полиграфической продукции. На практике уровень ошибок при печати определяется шумами. Поэтому использование более устойчивых к шумам алгоритмов бинаризации позволяет снизить число ошибок в тираже. Целесообразность подхода на основе относительной энтропии обусловлена ее свойствами, благодаря которым, введенный критерий устойчивости оказывается согласованным с оценкой эксперта, определяющего качество изображений. Для примера проведено сравнение ряда алгоритмов бинаризации с целью выявить наиболее устойчивый к шумам.

Keywords:

меры искажения, относительная энтропия, стеганография, алгоритмы бинаризации .

1. ВВЕДЕНИЕ

На практике задача сравнить два изображения встречается часто и играет важную роль. Однако изображение является сложным объектом, предназначенным, как правило, для восприятия человеком, поэтому универсальных решений нет, что является источником постоянных поисков. Чтобы сравнивать цифровые изображения, разработан большой набор объективных мер искажений, которые применяются для конкретных задач [1].

Цель работы рассмотреть возможность практического применения относительной энтропии в качестве меры искажения при обработке цифровых изображений. Для этого были выбраны две задачи: встраивание цифровых данных, этим занимается современная стеганография, и процесс бинаризации (halftoning), который используется при печати.

Относительная энтропия характеризует различие двух

распределений случайной величины, она хорошо известна в теории информации, статистике и стеганографии, где на ее основе сформулирован критерий ϵ -секретности [2].

Для задачи встраивания цифровых данных критерий ϵ -секретности позволяет сравнивать различные стеганографические системы. На практике процесс сравнения оказывается не столь простым. Нерегулярное поведение характеристик цифрового изображения не позволяет построить удовлетворительные статистические модели изображений, поэтому для тестирования требуется большое число цифровых изображений. Обычно используют базы содержащие до 2000 изображений [3].

Аналогично критерию ϵ -секретности с помощью относительной энтропии может быть сформулирован критерий устойчивости к шумам алгоритмов бинаризации в задаче растривания. Это позволяет сравнивать различные алгоритмы, чтобы выбрать те, которые будут наиболее устойчивыми к шумам процесса печати. Шумы процесса печати являются источником ошибок в тираже, они имеют физическую природу, устранить их нельзя, однако путем выбора подходящего алгоритма бинаризации число ошибок можно уменьшить. Универсальных алгоритмов бинаризации, которые одинаково хорошо обрабатывали бы все изображения, нет. Поэтому для сравнения заданных алгоритмов также необходимо тестировать большой набор изображений. В качестве заданных были взяты алгоритмы бинаризации, представленные в [4] и [5], из них был найден наиболее устойчивый к шумам. Критерий устойчивости к шумам относится к объективным мерам искажения. Но благодаря свойствам относительной энтропии он оказывается согласованным с оценкой эксперта, который сравнивает качество изображений, полученных различными алгоритмами бинаризации.

2. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЭНТРОПИЯ

Описывает различие распределений и ошибки при детектировании случайных сигналов.

Чтобы сравнить два распределения случайной величины $p(x)$ и $q(x)$, где x дискретная переменная, используют относительную энтропию

$$Q(p||q) = \sum_x p(x)(\log p(x) - \log q(x)).$$

Можно показать, что $Q(p||q)$ неотрицательна и равна нулю для одинаковых распределений $p(x) = q(x)$. Относительная энтропия не обладает симметрией по аргументам p и q и не удовлетворяет неравенству треугольника, поэтому не является метрикой в математическом смысле. Важным свойством является монотонность, которое означает, что при детерминированном преобразовании $x \rightarrow y = f(x)$, $p(x) \rightarrow p' = p(f(x))$, $q \rightarrow q' = q(f(x))$

$$Q(p||q) \geq Q(p'||q'). \quad (1)$$

Это неравенство означает, что при преобразовании информации относительная энтропия не растёт.

Относительная энтропия связана с проверкой гипотез. Пусть проверка заключается в том, чтобы различить два распределения $p(x)$ и $q(x)$, когда принимается одно из двух решений - данное распределение есть либо $p(x)$, либо $q(x)$. В такой схеме возникают ошибки первого и второго рода, вероятность которых обозначим α и β . Так, в задаче обнаружения, где цель описывается распределением $p(x)$, ошибка первого рода, или ложное срабатывание возникает, когда $q(x)$ принято за $p(x)$. Ошибка второго рода, пропуск цели, возникает, когда $p(x)$ принято за $q(x)$. Поскольку процесс принятия решения является детерминированным преобразованием, то вероятности ошибок и относительная энтропия удовлетворяет неравенству (1)

$$Q(\alpha||\beta) \leq Q(p||q). \quad (2)$$

Отсюда следует, что в силу свойства монотонности относительная энтропия может быть связана с ошибками при различении двух распределений.

Из этого неравенства можно получить следующую оценку. Если относительная энтропия ограничена сверху

$$Q(p||q) \leq \epsilon, \quad (3)$$

и $\alpha = 0$, то

$$\beta \geq 2^{-\epsilon}.$$

Это условие имеет простой смысл, чем ближе между собой распределения $p(x)$ и $q(x)$, тем меньше их относительная энтропия $Q(p||q)$, тем больше будет вероятность ошибки второго рода β , когда $p(x)$ принято за $q(x)$.

Приведенные свойства относительной энтропии позволяют использовать ее в качестве меры искажения.

3. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЭНТРОПИЯ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ СЕКРЕТНОСТИ АЛГОРИТМОВ ВСТРАИВАНИЯ

Одним из факторов, определяющих секретность алгоритмов встраивания цифровых данных в изображения, является мера неразличимости изображений. Это может быть описано с помощью относительной энтропии.

В стеганографической системе сообщение M встраивает в контейнер C в общем случае с помощью секретного ключа K . В результате получается заполненный контейнер S , его называют стегоконтейнером, из которого потом извлекают сообщение. Если E и D алгоритмы встраивания и детектирования, то в общем случае стеганографическая система описывается следующими соотношениями [3, 6]

$$\begin{aligned} E : C \otimes M \otimes K &\rightarrow S, \\ D : C \otimes S \otimes K &\rightarrow M. \end{aligned}$$

Два основных свойства стеганографической системы это неразличимость пустого и заполненного контейнера, когда $C \approx S$, и секретность.

Критерий секретности формулируется на основе относительной энтропии $Q(C||S)$, которая описывает различие между пустым и заполненным контейнером. Стеганографическая система называется ϵ -секретной, если [2]

$$Q(C||S) \leq \epsilon. \quad (4)$$

Если $\epsilon = 0$, то система является совершенно секретной. В силу свойства относительной энтропии последнее означает, что пустой и заполненный контейнер оказываются неразличимы.

Далее рассматривается задача встраивания бинарного M изображения с секретным ключом в контейнер C , представленный полутоновым изображением. Использовались два алгоритма. В первом случае бинарное изображение встраивалось в одну из битовых плоскостей путем побитового сложения

$$E_1 : C \rightarrow S = C - (B_V - B_V \oplus M \oplus K)2^{V-1},$$

где B_V одна из битовых плоскостей $V = 1, 2, \dots$ полутонового изображения, K ключ, представленный случайной бинарной матрицей.

Во втором случае использовался алгоритм аддитивного встраивания, когда ключ прибавляется или вычитается в зависимости от значения бита $m = 0, 1$, $m \in M$

$$E_2 : C \rightarrow S = C + b(1 - 2M)K,$$

где b параметр, а ключ может быть представлен не обязательно бинарной матрицей.

Условие ϵ -секретности в данном случае означает, что относительная энтропия

$$Q(p_C||p_S) = \sum_i p_C(i)(\log p_C(i) - p_S(i)) \leq \epsilon,$$

где $p_C(i)$ и $p_S(i)$ гистограммы яркости $i = 0, 1, \dots, 255$ пустого и заполненного контейнера. Из этого условия следует, что чем меньше ϵ , тем меньше различаются яркости полутонового изображения C и стегоизображения S . Из двух алгоритмов большую секретность имеет тот, у которого меньше ϵ .

Результат расчета относительной энтропии для двух алгоритмов встраивания E_1 и E_2 представлен на рис.1. Первый алгоритм побитового сложения, рис. 1 а, для сокрытия бинарного изображения использует битовые плоскости $V = 1, 2, \dots, 8$. Здесь $V = 1$ младшая битовая плоскость, ее вес 1, $V = 8$ старшая битовая плоскость, ее вес 2^7 . Второй алгоритм аддитивного сложения, рис. 1 б, где параметр $b \in [0, 1]$. Оба графика получены усреднением по 2000 изображений. В рабочей области параметров, где $V \in 1, 2, 3$, $b \in [0, 0.5]$, относительная энтропия алгоритма побитового сложения, она лежит в интервале $[0.0148, 0.02]$, на два порядка больше. Это означает, что из этих двух алгоритмов более высокий уровень секретности имеет алгоритм аддитивного встраивания.

4. КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ К ШУМАМ АЛГОРИТМОВ БИНАРИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЭНТРОПИИ

Процесс бинаризации необходим для печати цифрового изображения. Устойчивость алгоритмов бинаризации к шумам процесса печати может быть описана с помощью относительной энтропии.

Бинаризация заключается в преобразовании цифрового полутонового изображения, пиксел которого имеет яркость $i = 0, 1, \dots, 255$, в бинарное G , пиксел которого принимает только два значения черный и белый. Для моделирования процесса печати можно использовать бинарный канал с шумом, который будет описывать разнообразные шумы, возникающие при печати [7]. Если G' бинарное изображение на выходе канала с шумом, то относительная энтропия

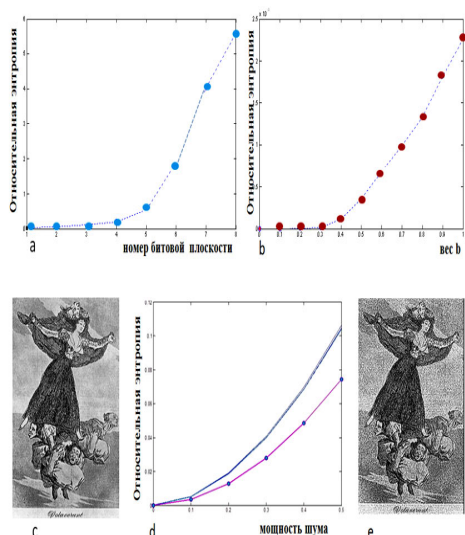


Рисунок 1: Относительная энтропия для задачи встраивания цифровых данных и процесса бинаризации полутонового изображения. а) алгоритм побитового сложения; б) алгоритм аддитивного встраивания. Каждая точка получена усреднением по 2000 картинок. с) исходное полутоновое изображение; е) бинарное изображение, полученное D-алгоритмом; д) сравнение устойчивости к шумам алгоритмов бинаризации. График получен путем усреднения по 80 изображениям из коллекции рисунков Caprichos.

$Q(G||G')$ характеризует соответствие между исходным и зашумленным изображением.

Критерий устойчивости алгоритма бинаризации к шумам можно сформулировать аналогично (4)

$$Q(G||G') \leq \epsilon.$$

Смысл этого условия простой. При заданном уровне шума чем меньше ϵ , тем устойчивость выше. Если $\epsilon \approx 0$, то алгоритм бинаризации, с помощью которого получено бинарное изображение G , нечувствителен к действию шума.

Разумеется критерий можно сформулировать на основе других мер искажения, взяв например, евклидово расстояние между G и G' . Использование однако относительной энтропии обусловлено следующим наблюдением. Относительная энтропия может описывать экспертную оценку качества изображений.

Справедливость этого наблюдения следует из свойства монотонности (2), если считать, что процесс принятия решения экспертом является детерминированным. Пусть эксперт, который оценивает качество, должен ответить на вопрос является ли представленное ему изображение исходным изображением G или зашумленным G' . В данном примере мы используем простейшую оценку. Если ϵ мало, эксперт может совершить ошибку первого или второго рода. Так, он может решить, что ему предъявлено изображение G в то время как оно было G' и наоборот. Пусть вероятность ошибок α и β . Если эксперту предъявляется только G или только G' , относительная энтропия между решениями будет $Q(\alpha||\beta)$. Тогда в силу (2)

$$Q(\alpha||\beta) \leq Q(G||G') \leq \epsilon.$$

Отсюда следует, что ϵ – устойчивость алгоритма к шумам согласуется с оценкой эксперта.

Приведенный критерий может служить для сравнения работы разных алгоритмов бинаризации $A_k, k = 1, 2, \dots$. Если G'_k зашумленное изображение, то можно вычислить значение относительной энтропии $q_k = Q(G_k||G'_k)$. Тогда алгоритм A_k будет более устойчивым, чем A_m , если $q_k < q_m$. Однако на практике такое неравенство может выполняться лишь в некоторой области параметров и для некоторого набора изображений, поскольку не существует идеального алгоритма бинаризации. В результате для оценки устойчивости возникает сложная задача с большим числом параметров.

Пример решения такой задачи показан на рис. 1. Здесь, на рис. 1 d, представлена относительная энтропия для семи алгоритмов бинаризации DOTDIF, ERRDIF, LAU, ULICHNEY, CDOD1, CDOD2, BAYER из [4] и D-алгоритма, введенного в [5]. Для зашумления бинарных изображений использовался бинарный шум с мощностью $T \in [0, 0.5]$, которая равна вероятности ошибки. Каждая точка была усреднена по 80 изображениям, выбранным из серии Caprichos Франциско Де-Гойи. Семь алгоритмов из [4] демонстрируют очень близкий результат, они показаны синей линией. Относительная энтропия для D-алгоритма, красная линия, отличается, она является наименьшей. Полученные монотонные зависимости означают, что устойчивость к шумам у D-алгоритма выше. Вместе с тем бинарные изображения D-алгоритма, одно из них показано на рис. 1 e, имеет высокое визуальное качество. Из найденного результата, например, следует, что для печати рисунков великого испанца D-алгоритм бинаризации является более предпочтительным.

5. ВЫВОДЫ

Используемые для сравнения изображений меры искажения обычно разделяются на объективные и субъективные. Меры искажения на основе относительной энтропии являются объективными. Однако монотонность относительной энтропии позволяет связать ее с ошибками в схемах детектирования весьма общего вида. Благодаря такой общности, эти схемы допускают описание ошибок, которые могут возникнуть, когда качество изображения оценивает эксперт.

Применение общей концепции относительной энтропии рассмотрено для двух задач. Первая из них - встраивание бинарного изображения в полутоновое, вторая - процесс бинаризации.

В задаче встраивания исследована секретность двух алгоритмов на основе известного критерия, сформулированного с помощью относительной энтропии. Чтобы получить надежный результат, было протестировано 2000 изображений. Мы получили монотонные зависимости от рабочих параметров, которые свидетельствуют в пользу одного из рассматриваемых алгоритмов. Отсюда следует, что критерий может быть использован на практике для сравнения секретности различных методов.

Для процесса бинаризации, которая используется для печати изображений, мы ввели критерий устойчивости к шумам алгоритмов бинаризации. Этот критерий, сформулированный на основе относительной энтропии, позволяет выбрать такие алгоритмы, которые при печати дают меньше ошибок в тираже. Мы сравнили набор базовых алгоритмов, для чего было вычислена относительная энтропия, усредненная по базе из 80 изображений. Поскольку универсального алгоритма бинаризации, который одинаково хорошо обрабатывает любые изображения нет, выбор базы оказался критичным. Полученные монотонные зависимости свидетельствуют в пользу выбранного критерия и позволяют выбрать один алгоритм. С практической точки зрения найден-

ные результаты означают следующее. Путем вычисления относительной энтропии для заданного набора изображений, можно подобрать алгоритм бинаризации, который позволит снизить уровень ошибок при печати.

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] B.W. Keelan, "Handbook of Image Quality", 2002.
S. Wincler, "Digital Video Quality. Vision Models and Metrics", John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
Д. Ватолин, А. Паршин, "Сравнение кодеков стандарта MPEG-4 AVC/H.264 с использованием объективных метрик", Conference Paper, GraphiCon, с. 447-454, 2006.
- [2] C. Cachin. "An information-theoretic model for steganography". In D. Aucsmith, editor, Information Hiding, 2nd International Workshop, volume 1525 of LNCS, pp 306 - 318. Springer-Verlag, New York, 1998.
- [3] I.J. Cox, M.L. Miller, J.F. Bloom, J. Fridrich, T. Kaler, "Digital Watermarking and Steganography", ELSEVIER, Morgan Kaufmann Publishers, 2008.
- [4] D.L. Lau, G.R. Arce, "Modern Digital Halftoning", Second Edition, CRC Press, 2008.
- [5] В.Н. Горбачев, В.Н. Дроздов, Е.С. Яковлева, "Об одном алгоритме бинаризации полутоновых изображений с выделением слабоконтрастных структур", Вестник МГУП, 3, с. 65, 2009.
- [6] J. Fridrich, "Steganography in Digital Media. Principles, Algorithms, and Application", Cambridge University Press, New York, 2010.
- [7] V.N. Gorbachev, E.S. Yakovleva, "A binary noisy channel to model errors in printing process", E-print, arXiv: submission/0329792 [cs.OH] 2 Okt 2011.

АВТОРЫ

Валерий Николаевич Горбачев, преподаватель Северо-Западного института печати Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна (СЗИП СПб ГУТД).

Иван Кириллович Метелев, аспирант СЗИП СПб ГУТД, ivan.metelev@yandex.ru.

Елена Михайловна Кайнарова, преподаватель СЗИП СПб ГУТД, helenkainarova@gmail.com.

Елена Сергеевна Яковлева, преподаватель СЗИП СПб ГУТД, 2305lena@mail.ru.