

УДК 004.9

МЕТОД ЗАЩИТЫ И КОНТРОЛЯ ПОДЛИННОСТИ ИЗДЕЛИЙ FDM-ПЕЧАТИ ЗА СЧЁТ ФАЗОВОГО СДВИГА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

© П. А. Томашайтис, В. А. Федосеев, В. Е. Быков, Д. А. Шапиро

*Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королёва,
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34
E-mail: vicanfed@gmail.com*

Предложен метод защиты изделий 3D-печати, выполненных при помощи технологии FDM, от несанкционированного копирования. Данный метод основан на управляемом отклонении траектории нанесения филамента на плоском участке поверхностного слоя изделия. Величина отклонения траектории линий определяется встраиваемой защитной меткой, которая играет роль водяного знака. Вносимые таким образом изменения трудно обнаружить визуально, и тем более трудно автоматически считать при сканировании формы 3D-изделия, и впоследствии воспроизвести при создании его копии. При этом проверка подлинности изделия посредством детектирования защитной метки может быть выполнена за счёт съёмки изделия цифровой камерой и специализированной обработки на основе спектрального анализа и узкополосной фильтрации.

Ключевые слова: 3D-печать, защита изделий, цифровой водяной знак, векторная графика, G-code, спектральный анализ.

DOI: 10.15372/AUT20240503

EDN: ZKVPUI

Введение. Технологии 3D-печати в настоящее время получили широкое распространение в промышленности, медицине, дизайне [1, 2] и с каждым годом становятся всё более доступными для массового пользователя. Однако вместе с ростом их использования возросла также значимость проблемы защиты интеллектуальной собственности на изделия 3D-печати [3–6]. Связано это с тем, что технология 3D-печати позволяет владельцам 3D-принтеров достаточно просто копировать и воспроизводить изделия при наличии у них доступа к цифровой модели, что влечёт за собой определённые трудности для производителей. Например, опытный образец изделия, предоставленный производителем для апробации, может быть некачественно скопирован, что впоследствии может дискредитировать производителя изделия. По этой причине крайне важно иметь надёжное и простое в использовании средство проверки подлинности образца изделия, чтобы отличать эталонные экземпляры, изготовленные производителем, от копий. В рамках данной работы разрабатывается и исследуется метод, предназначенный для решения этой задачи и учитывающий особенности технологии FDM-печати (FDM — Fused Deposition Modeling) [7].

Тема защиты изделия 3D-печати от несанкционированного копирования ранее затрагивалась исследователями в различных статьях, однако следует отметить, что предлагаемых методов защиты к текущему времени было предложено немного, и большинство из них достаточно сложны в применении. В настоящее время можно выделить два независимых направления исследований, посвящённых защите авторских прав при 3D-печати. Первое заключается в защите 3D-модели, на основе которой печатается изделие. Типичная схема защиты предполагает небольшое изменение формы 3D-модели, несущее в себе защитную информацию (цифровой водяной знак, ЦВЗ [8–10]). Эта информация должна эффективно извлекаться из векторной модели и при этом сохраняться после 3D-печати и последующего восстановления модели при помощи 3D-сканера. Методы решения такой задачи предложены в [11–16]. Они основаны на различных алгоритмических решениях и принципах:

используют подход spread spectrum watermarking [12], ориентированные гистограммы [11], характеристические точки [13]. Большинство алгоритмов при этом рассматривают модель как совокупность горизонтальных слоёв, в каждый из которых встраивается отдельный фрагмент двоичной последовательности ЦВЗ (чаще всего один бит) [11–14, 16]. Важно отметить, что методы, представляющие это направление, не способны защитить конкретное изделие: они защищают от кражи модель, на основе которой оно напечатано.

Второе направление исследований, посвящённое защите непосредственно изделий 3D-печати от несанкционированного копирования, представлено существенно меньшим числом работ. Так, в [5, 17] описывается метод встраивания ЦВЗ под верхний слой изделия путём формирования на внутреннем слое участков различной толщины размером 2×2 мм. Один из способов извлечения встроенной информации основывается на методе термографии [5]. Изделие 3D-печати нагревается при помощи галогенных ламп, при этом на участках с ЦВЗ из-за тонких областей происходит снижение теплопроводности, которое способен обнаружить тепловизор. Другой способ считывания ЦВЗ, предложенный авторами, основывается на рассеивании света в ИК-диапазоне при его прохождении через изделие [17]. Модель 3D-печати располагается между источником инфракрасного излучения и NIR-камерой, улавливающей его. Инфракрасный свет имеет большую длину волны, а потому почти не рассеивается, проходя через изделие, однако на участках с полостями рассеивание света возрастает, что может быть обнаружено NIR-камерой. К недостаткам описанных подходов стоит отнести сложность нанесения водяного знака на образец 3D-печати, высокую стоимость необходимого оборудования для считывания встроенной информации, а также зависимость качества считанной информации от цвета, размеров и формы изделия.

В работе [4] описывается ещё один способ нанесения и считывания водяного знака, представленного в виде двоичного кода. Каждый бит водяного знака наносится на изделие 3D-печати путём формирования по его краям участков с различной толщиной двух соседних слоёв. При этом толщина каждого слоя подбирается так, чтобы изменялась не общая толщина участка, а только граница перехода между двумя слоями. Считывание записанной информации производится по выровненному через преобразование Радона отсканированному изображению изделия 3D-печати. Данный алгоритм не предполагает использования дорогостоящих 3D-сканеров для извлечения ЦВЗ: оно происходит на основе анализа результата фотосъёмки плоской поверхности изделия. Однако декодер ЦВЗ весьма чувствителен к смещению изделия, а также к разрешению при съёмке.

В представленной работе предлагается простой и надёжный метод нанесения водяного знака на изделие 3D-печати, основанный на особенностях формирования слоёв объекта печати для технологии FDM. Предлагаемый подход позволяет наносить разнообразные трудноразличимые водяные знаки на поверхность изделия. При этом эти водяные знаки не поддаются автоматическому считыванию при помощи 3D-сканеров, поэтому они исчезнут при попытке повторного воспроизведения копии изделия. Для извлечения встроенного водяного знака не требуется дорогостоящего оборудования: производится фотосъёмка локальной области изделия, содержащей водяной знак. Далее полученное изображение подвергается автоматической процедуре обработки на основе спектрального анализа и фильтров Габора. Данная процедура не требует точной локализации границ изделия. Кроме того, не требуется обеспечивать высокое разрешение и чёткость при съёмке.

Метод защиты изделий 3D-печати. Метод струйного напыления основан на нагреве и экструзии пластикового материала через сопло [7]. При изготовлении изделие формируется по слоям. В свою очередь, отдельный слой, как правило, заполняется филаментом посредством экструзии ряда параллельных линий. Таким образом, структура внешней поверхности изделия представляет собой ряд параллельных линий.

Эта особенность позволяет провести параллели со сложными защищёнными полиграфическими документами, которые также на микроуровне часто формируются посредством узора из параллельных линий (например, гильоширных и тангирных сеток) [18]. Учитывая эту общность, мы решили перенести один из методов защиты полиграфических документов на объекты FDM-печати. Данный метод заключается в управляемом отклонении траектории линии в определённой области, форма которой задана бинарным растровым изображением (водяным знаком) [18].

В предлагаемом методе исходная модель обрабатывается слайсером с учётом характеристик 3D-принтера и используемого пластика. Полученная в результате работы слайсера последовательность команд в формате G-code поступает на вход разработанного алгоритма наряду с изображением ЦВЗ. Дальнейшая работа алгоритма нанесения водяного знака на поверхность изделия 3D-печати выполняется в четыре этапа:

1. Преобразование команд в формате G-code.

Язык G-code является стандартным языком для управления процессом 3D-печати. Программа на языке G-code разбивается на отдельные блоки кода, каждый из которых соответствует некоторому слою изделия 3D-печати. Команды языка G-code состоят из двух частей: кода команды и своих параметров. Код команды состоит из типа команды — основных (G) и дополнительных (M) — и своего номера. Параметры команды, в свою очередь, состоят из типа параметра и его числового значения.

Для решения задачи нанесения водяного знака на поверхность изделия 3D-печати выбирается определённый блок команд в формате G-code, соответствующий открытому слою изделия. Для этого слоя осуществляется преобразование команд G-code в векторные линии (полилинии).

Слой изделия 3D-печати представляется в формате G-code путём чередования команд G0 и G1, обозначающих перемещение инструмента к определённым координатам. Команда G1 соответствует перемещению сопла к заданной точке по прямой и поэтому используется для перемещения с выдавливанием материала. В случае команды G0 инструмент не всегда перемещается по прямой, из-за чего её применяют для перемещения без выдавливания материала. Команды G0 и G1 могут принимать несколько параметров: линейная скорость перемещения сопла (F), координаты целевой точки перемещения в определённой системе координат (X, Y, Z), количество выдавливаемого материала при перемещении (E).

Преобразование команд G-code для выбранного слоя в полилинии можно осуществить, если учесть следующие особенности: координаты конечной точки линии всегда задаются в параметрах команды G1, координаты начальной точки могут задаваться как параметрами команды G0, так и параметрами команды G1. Кроме извлечения полилиний из исходного файла G-code, на данном этапе необходимо также выделить несколько других важных параметров, а именно: скорости перемещения для команд G0 и G1, количество выдавливаемого материала на единицу длины линии и абсолютное количество выдавленного материала на предыдущие слои. Эти параметры позволяют в дальнейшем совершить обратное преобразование полилиний в команды G-code.

2. Сопоставление векторной системы координат полилиний и растровой системы координат бинарного изображения с ЦВЗ.

На данном этапе сначала находятся координаты прямоугольника, который ограничивает собой все извлечённые полилинии. Затем начальным и конечным точкам каждой полилинии ставятся в соответствие координаты определённого пикселя на бинарном изображении с ЦВЗ по следующим формулам:

$$x' = \left\lfloor \frac{d'(x - x_0)}{d} \right\rfloor, \quad (1)$$

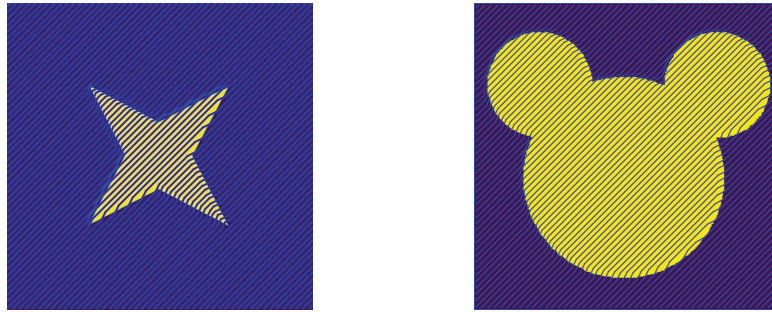


Рис. 1. Промежуточный результат работы алгоритма — смещение полилиний для верхнего слоя изделия 3D-печати

$$y' = \left\lfloor \frac{h'(y - y_0)}{h} \right\rfloor, \quad (2)$$

где $\lfloor$ — символ взятия целой части, d и h — ширина и высота ограничивающего полилинии прямоугольника, x_0 и y_0 — координаты его верхнего левого угла, d' и h' — ширина и высота в пикселях бинарного изображения с ЦВЗ, x и y — координаты точки полилинии в векторной системе координат, x' и y' — координаты точки полилинии в растровой системе координат.

Далее к найденным координатам начальной и конечной точек полилинии в растровой системе координат применяется алгоритм Брезенхема, возвращающий множество координат пикселей, через которые проходит полилиния относительно бинарного изображения.

Данный алгоритм позволяет сопоставить векторную систему координат полилиний и растровую систему координат бинарного изображения с ЦВЗ для всего слоя. Если же водяной знак необходимо нанести только на определённую область слоя, то для этого достаточно ограничить эту область прямоугольником, для каждой полилинии подставить в соотношения (1) и (2) координаты его левого верхнего угла (x_0, y_0) , длину d и высоту h и удалить из множества координат пикселей, полученных в результате применения к полилинии алгоритма Брезенхема, все координаты, которые выходят за границы растрового изображения.

3. Смещение полилиний внутри области с ЦВЗ.

На основе полученного на предыдущем этапе множества координат пикселей, через которые проходит полилиния относительно бинарного изображения, достаточно просто реализовать смещение линий внутри области с ЦВЗ. Для этого необходимо руководствоваться следующим принципом: если текущий рассматриваемый пиксель из этого множества относится к области с ЦВЗ и алгоритм не находится в режиме смещения, выполняется смещение линии, если же этот пиксель не относится к данной области и алгоритм находится в режиме смещения, смещение линии завершается. После завершения обработки полилинии данным алгоритмом она разделяется на несколько составных полилиний, которые соответствуют её смещённым и несмещённым участкам, переходным зонам. На рис. 1 представлен результат смещения полилиний для верхнего слоя изделия 3D-печати.

Смещение полилиний контролируется следующими параметрами:

- 1) LINE_WIDTH — толщина полилинии (диаметр сопла) — задаётся, как правило, пользователем, так как в файле G-code она не указывается;
- 2) SHIFT — величина смещения полилинии перпендикулярно её направлению. Она не может превышать толщину полилинии, так как иначе линии будут накладываться друг на друга;

3) TRANSITION_LENGTH — длина переходной зоны между смещённой и несмещённой частями полилинии по оси, совпадающей с её направлением;

4) TRANSITION_ANGLE — угол наклона полилинии в переходной зоне, соединяющей смещённую и несмещённую части полилинии (опционален);

5) TRANSITION_COEFFICIENT — коэффициент, задающий размер части переходной зоны, которая будет находиться внутри области с ЦВЗ. Чем он больше, тем позднее будет начинаться смещение полилиний относительно начала области с ЦВЗ.

4. Преобразование полилиний в команды в формате G-code и их встраивание в исходный файл.

На данном этапе осуществляется обратное преобразование полилиний в команды в формате G-code по следующему алгоритму: если начальная точка текущей полилинии совпадает с концом предыдущей обработанной линии, то необходимо выполнить команду G1 с перемещением к концу текущей линии, в ином случае следует сначала переместиться на координаты начальной точки полилинии с помощью команды G0, а уже затем выполнять команду G1, перемещаясь к её концу.

Важной частью данного этапа является расчёт количества выдавливаемого филамента на линию относительно её длины для команд G1. Несмотря на то, что существует специальная команда G-code для работы с количеством выдавливаемого материала в относительном формате, в файлах, получаемых после обработки модели слайсером, используется абсолютный формат. Это накладывает определённые трудности для встраивания водяного знака на поверхность изделия 3D-печати, так как необходимо следить за тем, чтобы при встраивании количество выдавленного материала на слой не изменилось. В связи с этой особенностью количество выдавливаемого филамента для переходных зон уменьшается так, чтобы сохранилось неизменным общее количество филамента, выдавливаемого на слой. Такой подход не только не нарушает общую структуру изделия 3D-печати, но и дополнительно позволяет избавиться от наслаивания материала на границе области с ЦВЗ.

Приведём пример преобразования команд в формате G-code, отражающих линию слоя, при встраивании ЦВЗ.

Линия слоя в формате G-code до встраивания ЦВЗ:

$$\begin{aligned} &G0\ F\ f_0\ Xx_0\ Yy_0 \\ &G1\ F\ f_1\ Xx_1\ Yy_1\ Ee_1, \end{aligned}$$

где (x_0, y_0) и (x_1, y_1) — координаты начала и конца линии слоя; e_1 — количество выдавливаемого материала на линию (абсолютный формат); f_0, f_1 — скорости перемещения инструмента для команд G0 и G1 соответственно.

Линия слоя в формате G-code после встраивания ЦВЗ:

$$\begin{aligned} &G0\ F\ f_0\ Xx_0\ Yy_0 \\ &G1\ F\ f_1\ Xx_2\ Yy_2\ Ee_2 \\ &G1\ F\ f_1\ Xx_3\ Yy_3\ Ee_3 \\ &G1\ F\ f_1\ Xx_4\ Yy_4\ Ee_4 \\ &G1\ F\ f_1\ Xx_5\ Yy_5\ Ee_5 \\ &G1\ F\ f_1\ Xx_1\ Yy_1\ Ee_1, \end{aligned}$$

где (x_2, y_2) и (x_5, y_5) — координаты внешних концов линий в переходных зонах; (x_3, y_3) и (x_4, y_4) — координаты внутренних концов линий в переходных зонах; e_1, e_2, e_3, e_4, e_5 — количество выдавливаемого материала на каждый отрезок линии (абсолютный формат).

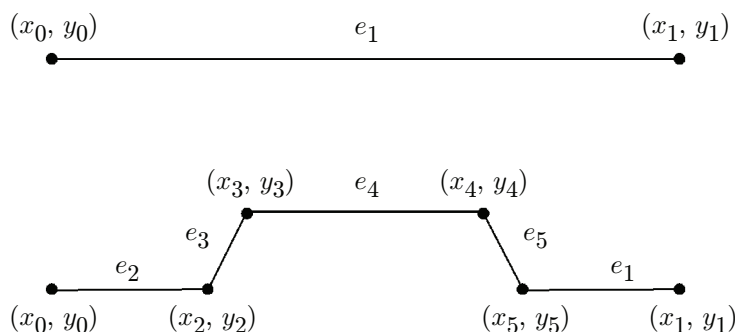


Рис. 2. Пример линии слоя в формате G-code до встраивания ЦВЗ (сверху) и после встраивания ЦВЗ (снизу)

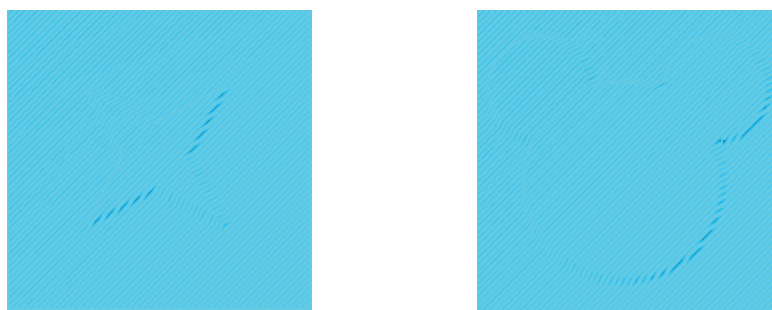


Рис. 3. Конечный результат работы алгоритма — смещение линий слоя на поверхности изделия 3D-печати

На рис. 2 изображён вид линии слоя до и после встраивания ЦВЗ. Как можно заметить, при встраивании водяного знака у линии слоя остаются неизменными её начальные и конечные координаты (x_0, y_0) и (x_1, y_1) , а также количество выдавливаемого на неё материала e_1 за счёт его уменьшения в переходных зонах.

После того как полилинии были преобразованы в команды в формате G-code, осуществляется их встраивание в определённую область исходного файла G-code, соответствующую выбранному слою. Далее выполняется печать по результирующему файлу G-code. На рис. 3 представлен результат нанесения ЦВЗ на поверхность изделия 3D-печати.

Метод обнаружения защитных элементов на изделиях 3D-печати. Для детектирования встроенного водяного знака применяется спектральный метод, также основанный на методе извлечения защитных элементов из изображений полиграфических документов, разработанном при участии одного из соавторов данного исследования [18].

Участок изделия 3D-печати, содержащий встроенный защитный ЦВЗ, фотографируется цифровой камерой при боковом освещении, подчёркивающим линейную структуру, формирующую поверхностный слой. Далее выполняется анализ полученного изображения, который состоит из трёх этапов. Здесь мы приведём только главные особенности каждого из этапов. Подробнее данный метод описан в [18].

1. Спектральный анализ изображения с целью выявления преобладающей гармоник.

Параллельные линии на изображении с участком изделия 3D-печати можно представить как повторяющуюся последовательность. Особенность спектра повторяющихся последовательностей заключается в том, что он обладает выраженной дискретностью, а именно: модули старших гармоник вносят почти незначимый вклад в формирование таких последовательностей по сравнению со вкладом от модулей младших гармоник. Поэтому

наиболее информативной гармоникой в спектре для последовательности из параллельных линий будет преобладающая гармоника. Она лучше всего будет характеризовать период и направление линий пластика, из-за чего и будет использоваться в последующих этапах.

2. Узкополосная фильтрация изображения фильтром Габора.

Двумерный фильтр Габора является эффективным средством выделения конкретных спектральных компонент для оцифрованного изображения. Для входного двумерного вещественного изображения $f(n_1, n_2)$ выходом фильтра Габора будет являться комплекснозначное поле:

$$g(n_1, n_2) = h(n_1, n_2) ** f(n_1, n_2), \quad (3)$$

где n_1 и n_2 — пространственные координаты, $**$ — символ двумерной свёртки, $h(n_1, n_2)$ — импульсная характеристика фильтра Габора (ядро свёртки):

$$h(n_1, n_2) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(i\omega_1^0 n_1 + i\omega_2^0 n_2 - \frac{n_1^2 + n_2^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где σ — коэффициент, задающий ширину радиально симметричной гауссовской весовой функции (окна обработки) фильтра; ω_1^0 и ω_2^0 — параметры модуляции ядра фильтра (опорные частоты).

Указав в качестве ω_1^0 и ω_2^0 параметры ранее найденной преобладающей гармоники, мы отфильтруем изображение в интересующей нас узкой полосе частот. В результате фильтрации формируется двумерное поле $g(n_1, n_2)$ (отклик фильтра Габора), которое представляет собой комплексную квазигармоническую функцию. Для дальнейшего анализа сформированного отклика фильтра Габора выделяют две его составляющие — амплитудную и фазовую:

$$A(n_1, n_2) = |g(n_1, n_2)|, \quad (5)$$

$$\varphi(n_1, n_2) = \text{Arg}(g(n_1, n_2)) - \omega_1^0 n_1 - \omega_2^0 n_2. \quad (6)$$

Выполнение данной операции обуславливается необходимостью демодуляции фазовой составляющей.

Здесь следует отметить, что для любой периодической последовательности её сдвиг на некоторую величину никак не отражается на её амплитудно-частотном спектре, однако существенно изменяет её фазочастотный спектр. Это означает, что полученная амплитудная составляющая отклика выделит только границы между сдвинутыми и несдвинутыми областями, так как проявит себя только для переходной зоны. Фазовая составляющая отклика, наоборот, яркостно отделит эти зоны друг от друга, образовав зоны разрыва фаз в области с ЦВЗ (рис. 4, 5).

Для повышения надёжности при извлечении ЦВЗ допустимо использовать не одну преобладающую гармонику, а несколько, получая и анализируя таким образом несколько полей откликов.

3. Восстановление разрывов фаз.

Разрывы фаз для фазовой составляющей отклика позволяют выделить на изображении области с ЦВЗ. Однако не все фазовые разрывы будут являться информативными, так как на отклик фильтра Габора могут влиять различные факторы внешней среды, нарушающие регулярную структуру параллельных линий. К этим факторам могут относиться дефекты изделия 3D-печати, появление теней и бликов при съёмке его поверхности и др. Все они мешают выделить на фазовом изображении чёткое изображение ЦВЗ.



Рис. 4. Пример необработанных линий разрыва (слева) и результата восстановления разрывов для линий разрыва (справа)



Рис. 5. Пример необработанных фазовых разрывов (слева) и результата восстановления разрывов фаз (справа)

Во избежание этого мы предлагаем использовать двухэтапную процедуру восстановления разрывов фаз.

На первом этапе производится замыкание линий разрыва фаз, которые извлекаются из амплитудной составляющей отклика и ограничивают собой области разрыва фаз. Конец линии разрыва может притягиваться к границе изображения, к противоположному концу этой линии или к свободному концу другой линии разрыва. В результате будет получена замкнутая область, ограничивающая разрыв фаз. На втором этапе к значениям фазы внутри полученной замкнутой области осуществляется прибавка величины $2\pi k$, $k \in \mathbb{Z}$. Значение k выбирается исходя из разности значений фаз вблизи линии разрыва так, чтобы в результате данной операции разрыв фаз был восстановлен.

Печать и съёмка изделия. Для проведения экспериментов использовался 3D-принтер VOLGOBOT A4 2.4. Печать моделей производилась с помощью серого пластика типа PETG. Формирование G-code выполнялось с помощью слайсера Ultimaker Cura 5.5.0. В рамках проведения экспериментов рассматривались сопла диаметрами 0,3; 0,4 и 0,5 мм. Поскольку предложенный метод защиты изделий FDM-печати использует одну плоскость для нанесения водяного знака, то для проверки работоспособности нашего метода в качестве тестового изделия достаточно использовать плоскую пластину квадратной формы с размером стороны от 3 до 5 см.

Для выявления приемлемых условий для съёмки образцов необходимо обеспечить возможность фиксации параметров съёмки и освещения (расстояние съёмки, расстояние и направление до источника освещения), а также иметь возможность устанавливать желаемые параметры при повторной съёмке. Для этого была собрана статичная установка, показанная на рис. 6. Она состоит из штатива с фотокамерой, а также кольцевого светодиодного источника света, закреплённого на втором штативе. Объектив камеры расположен строго над центром анализируемого изделия, фокальная плоскость параллельна плоскости



Рис. 6. Установка для фотографирования изделий при проведении экспериментов

анализируемой пластины. Источник света имеет форму кольца, что на практике позволило производить более равномерную подсветку разных частей пластины и снизить число бликов. Другие источники света во время съёмки отсутствуют. Благодаря штативам можно регулировать расстояние от пластины до камеры, а также местоположение и угол поворота источника света.

Отметим, что обеспечение таких условий съёмки не является необходимым требованием на практике: качественные результаты можно получить и при съёмке мобильной камерой с рук.

Экспериментальная апробация.

Определение параметров и условий применения предложенного метода. Экспериментальная апробация осуществлялась в два этапа. Целью первого этапа было определение параметров алгоритма, печати и условий съёмки, при которых ЦВЗ визуально приемлемо встраивается и извлекается.

В результате исследования определены следующие сведения о параметрах алгоритма:

- `LINE_WIDTH` должен быть равен диаметру сопла и не должен отклоняться от него;
- `SHIFT` — смещение должно быть не очень существенным, но при этом достаточным, чтобы его обнаружить. Приемлемые значения — $\text{LINE_WIDTH}/3$ или $\text{LINE_WIDTH}/4$;
- `TRANSITION_LENGTH` — переход не должен быть слишком резким. Но при этом граница всё же не должна быть совсем размытой. Приемлемое значение — $\text{LINE_WIDTH} \cdot 2$;
- `TRANSITION_COEFFICIENT` — зависит от ЦВЗ и желаемого эффекта. На качество непосредственно извлечения влияния не оказывает.

Также определено влияние параметров печати и слайсинга на результат встраивания и извлечения ЦВЗ:

- диаметр сопла существенно не влияет на качество;
- ширина линии не должна быть меньше высоты слоя, при этом и высота слоя не должна быть более чем в два раза меньше ширины линии;
- ширина линии должна устанавливаться равной диаметру сопла.

При невыполнении этих условий в результате печати формируется неоднородная поверхность, съёмка которой приводит к бликам, вследствие чего ЦВЗ извлекается некорректно. На рис. 7 даны примеры фотографий изделий, напечатанных с неподходящими параметрами, а также маски некорректно извлечённых ЦВЗ. Для сравнения на рис. 8

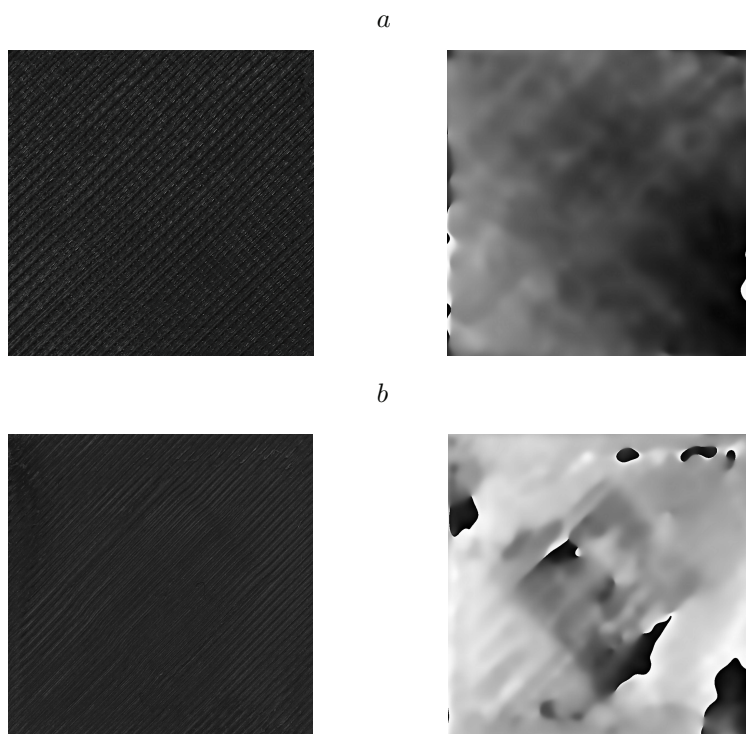


Рис. 7. Примеры неудачного выбора параметров печати: *a* — сопло 0,4 мм, высота слоя 0,2 мм, ширина линии 0,4 мм; *b* — сопло 0,4 мм, высота слоя 0,4 мм, ширина линии 0,3 мм (слева — фото изделия, справа — фазовое поле — результат извлечения ЦВЗ)

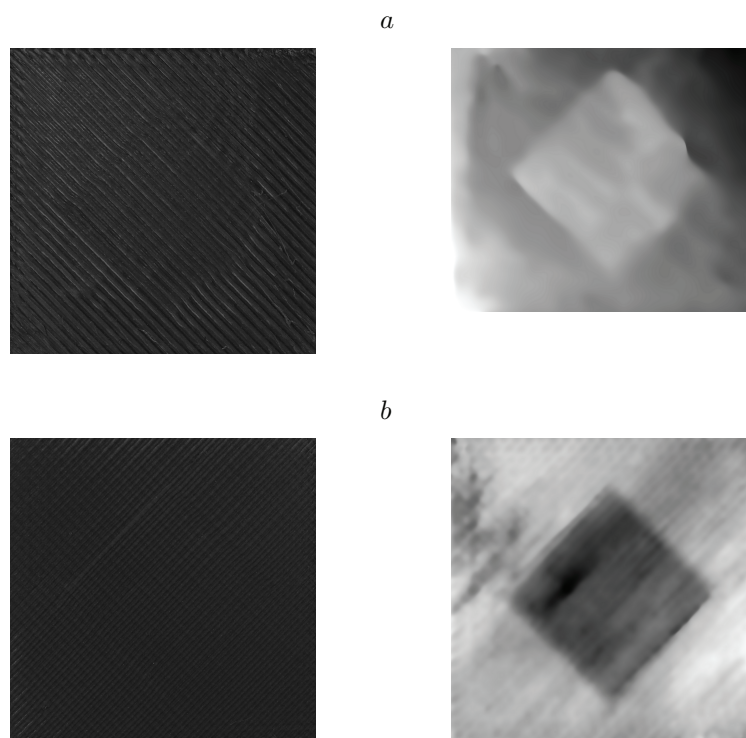


Рис. 8. Примеры удачного выбора параметров печати: *a* — сопло 0,4 мм, высота слоя 0,4 мм, ширина линии 0,4 мм; *b* — сопло 0,5 мм, высота слоя 0,25 мм, ширина линии 0,5 мм (слева — фото изделия, справа — фазовое поле — результат извлечения ЦВЗ)



Рис. 9. Маски ЦВЗ, использовавшиеся в эксперименте (diamond, circle, heart и arrow)

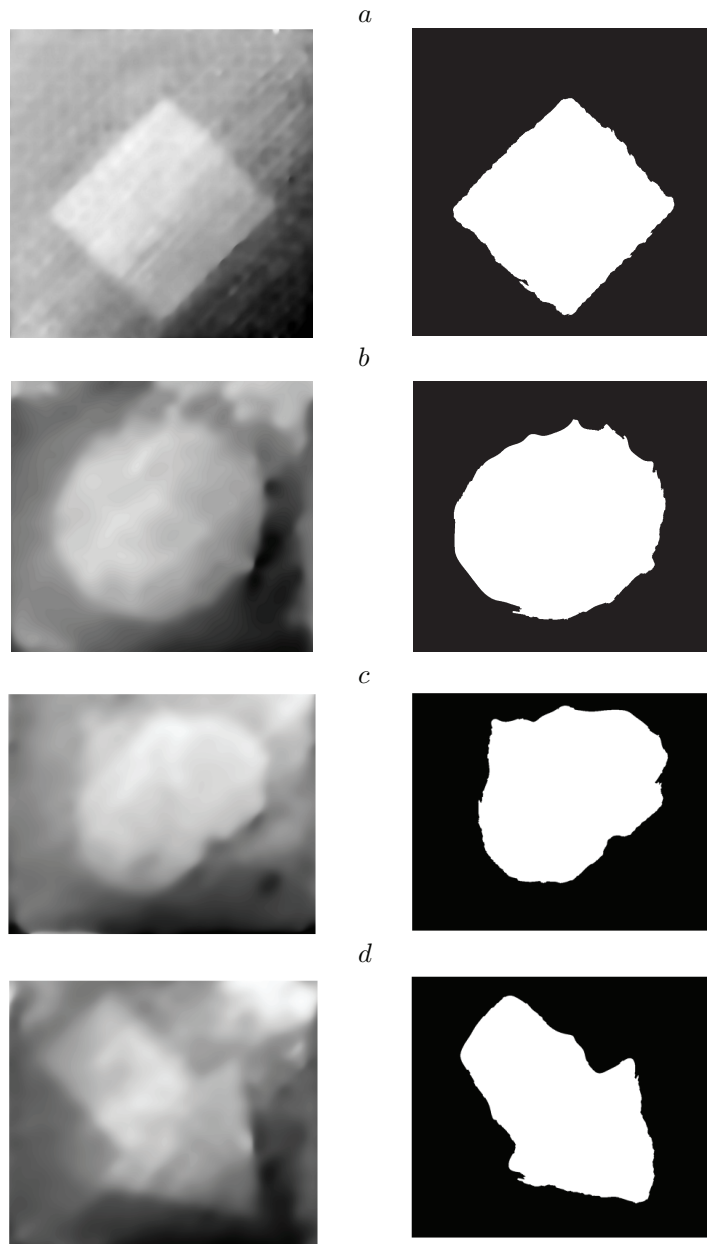


Рис. 10. Примеры извлечения различных ЦВЗ: фазовые поля и соответствующие им бинарные маски (a — d). Обозначения: a — diamond, b — circle, c — heart, d — arrow

Таблица

Показатели качества извлечения

ЦВЗ	Высота слоя	Ширина слоя	SSIM	СС
Diamond	0,5	0,5	0,9519	0,9026
Circle	0,4	0,4	0,9185	0,8932
Heart	0,5	0,4	0,9162	0,8817
Arrow	0,4	0,4	0,9115	0,8753

представлены аналогичные примеры для корректно выбранных параметров печати. В качестве ЦВЗ использовалось изображение квадрата, повернутого под углом 45° .

Оценка количественных характеристик качества извлечения ЦВЗ. На втором этапе производилась печать с использованием выбранных параметров нескольких изделий, содержащих различные изображения ЦВЗ, с последующей численной оценкой качества извлечения. Для численного оценивания производились следующие действия:

- 1) геометрическое согласование фазового поля и маски встроенного ЦВЗ;
- 2) формирование бинарной маски ЦВЗ при помощи алгоритма сегментации Graph cut [19] по заданной пользователем затравке;
- 3) расчёт коэффициента корреляции двух масок (СС);
- 4) расчёт меры близости SSIM [20] двух масок.

На рис. 9 изображены четыре бинарные маски, использовавшиеся в данном эксперименте (diamond, circle, heart и arrow). На рис. 10 представлены два результата извлечения ЦВЗ: фазовые поля и соответствующие им бинарные маски. Все данные изображения корректно интерпретируются с точки зрения формы объектов, изображённых на масках ЦВЗ. В таблице отражены измеренные показатели качества.

Представленные результаты свидетельствуют о практической применимости предложенного алгоритма.

Заключение. В данной работе предложен метод защиты изделий 3D-печати, выполненных при помощи технологии FDM, от несанкционированного копирования. Данный метод основан на управляемом отклонении траектории нанесения филамента на плоском участке поверхностного слоя изделия. Проведённая экспериментальная апробация позволила определить допустимые условия съёмки, параметры печати и параметры предложенного метода, позволяющие применить его на практике.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-71-10097, <https://rscf.ru/project/22-71-10097/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессмельцев В. П., Павленко А. Н., Жуков В. И. Разработка технологии создания структурированных капиллярно-пористых покрытий методом 3D-печати для интенсификации теплообмена при кипении // Автометрия. 2019. **55**, № 6. С. 25–35. DOI: 10.15372/AUT20190604.
2. Chen Z. Research on the Impact of 3D Printing on the International Supply Chain // Adv. Mater. Sci. and Eng. 2016. **2016**, Iss. 1. DOI: 10.1155/2016/4173873.
3. Mouhamed M. R., Soliman M. M., Darwish A., Hassanien A. E. Watermarking 3D Printing Data Based on Coyote Optimization Algorithm // Studies in Big Data / Eds. by A. E. Hassanien, A. Darwish. Vol. 77: Machine Learning and Big Data Analytics Paradigms: Analysis, Applications and Challenges. Cham: Springer Nature, 2021. P. 603–624.
4. Gao Y., Wang W., Jin Y. et al. ThermoTag: A Hidden ID of 3D Printers for Fingerprinting and Watermarking // IEEE Trans. Information Forensics and Security. 2021. **16**. P. 2805–2820. DOI: 10.1109/TIFS.2021.3065225.

5. **Uehira K., Suzuki M., Silapasuphakornwong P. et al.** Copyright Protection for 3D Printing by Embedding Information Inside 3D-Printed Objects // Digital Forensics and Watermarking / Eds. by Y. Q. Shi, H. J. Kim, F. Perez-Gonzalez, F. Liu. Lecture Notes in Computer Science. 2017. Cham: Springer International Publishing AG. P. 370–378.
6. **Abidin Z. Z., Zakaria N. A., Abas Z. A. et al.** Enhanced Physical Document Management using NFC with Verification for Security and Privacy // Int. Journ. Adv. Comput. Sci. and Appl. 2019. **10**, Iss. 3. DOI: 10.14569/IJACSA.2019.0100322.
7. **Dudek P.** FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements // Archives of Metallurgy and Mater. 2013. **58**, Iss. 4. P. 1415–1418.
8. **Barni M., Bartolini F.** Watermarking Systems Engineering: Enabling Digital Assets Security and Other Applications. N. Y.: Marcel Dekker, Inc., 2004. 485 p.
9. **Evsutin O. O., Melman A. S., Podbolotov D. I., Stankevich A. G.** An improved video watermarking algorithm with extraction using a mobile device camera // Comput. Opt. 2023. **47**, Iss. 6. P. 972–979.
10. **Сергеев В. В., Федосеев В. А., Шапиро Д. А.** Фазовые цифровые водяные знаки для защиты видеосигналов // Автометрия. 2022. **58**, № 5. С. 3–13. DOI: 10.15372/AUT20220501.
11. **Hou J.-U., Kim D.-G., Choi S., Lee H.-K.** 3D Print-Scan Resilient Watermarking Using a Histogram-Based Circular Shift Coding Structure // Proc. of the 3rd ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security. New York, USA, 17–19 June, 2015. P. 115–121.
12. **Hou J.-U., Kim D.-G., Lee H.-K.** Blind 3D Mesh Watermarking for 3D Printed Model by Analyzing Layering Artifact // IEEE Trans. Information Forensics and Security. 2017. **12**, Iss. 11. P. 2712–2725.
13. **Pham G. N., Lee S.-H., Kwon O.-H., Kwon K.-R.** A 3D Printing Model Watermarking Algorithm Based on 3D Slicing and Feature Points // Electronics. 2018. **7**, Iss. 2. DOI: 10.3390/electronics7020023.
14. **Pham G. N., Lee S.-H., Kwon O.-H., Kwon K.-R.** A Watermarking Method for 3D Printing Based on Menger Curvature and K-Mean Clustering // Symmetry. 2018. **10**, Iss. 4. DOI: 10.3390/sym10040097.
15. **Delmotte A., Tanaka K., Kubo H. et al.** Blind 3D-Printing Watermarking Using Moment Alignment and Surface Norm Distribution // IEEE Trans. Multimedia. 2020. **23**. P. 3467–3482.
16. **Tran T. V., Pham G. N., Nguyen B. A. et al.** 3D Printing Watermarking Algorithm Based on 2D Slice Mean Distance // Int. Journ. Adv. Trends in Comput. Sci. and Eng. 2020. **9**, N 1. P. 57–64.
17. **Suzuki M., Silapasuphakornwong P., Uehira K. et al.** Copyright Protection for 3D Printing by Embedding Information Inside Real Fabricated Objects // Proc. of the 10th Int. Conf. Computer Vision Theory and Applications. Berlin, Germany, 11–14 March, 2015. Vol. 1. P. 180–185. DOI: 10.5220/0005342401800185.
18. **Сергеев В. В., Федосеев В. А.** Метод извлечения водяных знаков из текстурированных полиграфических документов // Компьютерная оптика. 2014. **38**, вып. 4. С. 825–832.
19. **Vicente S., Kolmogorov V., Rother C.** Graph cut based image segmentation with connectivity priors // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, USA, 23–28 June, 2008. DOI: 10.1109/CVPR.2008.4587440.
20. **Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R. et al.** Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity // IEEE Trans. Image Processing. 2004. **13**, N 4. P. 600–612.

Поступила в редакцию 05.07.2024

После доработки 22.07.2024

Принята к публикации 24.07.2024