

УДК 004.932

ОБНАРУЖЕНИЕ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ИЗОБРАЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОАГЕНТНОГО ПОДХОДА

Алпатов Б.А., д.т.н., профессор кафедры автоматики и информационных технологий в управлении (АИТУ) Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ), e-mail: aitu@rsreu.ru;
Бабаян П.В., к.т.н., заведующий кафедрой АИТУ, e-mail: aitu@rsreu.ru;
Шубин Н.Ю., к.т.н., доцент кафедры АИТУ, e-mail: aitu@rsreu.ru.

POWER LINE DETECTION ON IMAGES USING MULTI-AGENT APPROACH

Alpatov B.A., Babayan P.V., Shubin N.J.

The problem of power line detection on the images is described in this paper. The algorithm based on Radon transform and multi-agent approach is suggested. The results of experimental research of the proposed algorithm are presented.

Key words: power line detection, wire detection, Radon transform, multi-agent system, pattern recognition.

Ключевые слова: обнаружение линий электропередач, обнаружение проводов, преобразование Радона, многоагентные системы, распознавание образов.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят всё более широкие возможности применения в различных областях человеческой деятельности. Отсутствие на борту экипажа приходится компенсировать высокой степенью автоматизации управления, либо удалённым управлением. Однако, несмотря на очевидное несовершенство современных бортовых систем управления по сравнению с человеком, даже оператор не всегда способен правильно и быстро оценить обстановку и принять решение о манёвре. Возможность столкновения БПЛА с элементами ландшафта, различными постройками или другими воздушными объектами сильно ограничивает области применения БПЛА как в гражданской, так и в военной сфере. Особую опасность в условиях города для БПЛА представляют линии электропередач. Обнаружение проводов и оценка их параметров с целью информирования об их присутствии либо оператора, либо автопилота является актуальной задачей. Предлагаемый в данной работе способ обнаружения линий на изображении может быть полезен и в ряде других областей применения теории обработки изображений, например, в аэрофотосъёмке, картографировании и медицине.

Цель работы – разработка алгоритма обнаружения и оценки параметров протяжённых проводов, наблюдаемых с подвижного носителя, изображения которых могут быть подвержены значительному изменению форм и размеров с течением времени.

Задача обнаружения линий электропередач (ЛЭП) на изображении неразрывно связана с более общей задачей обнаружения прямолинейных границ на изображении. Анализ литературы показывает, что применение преобразований Радона (ПР) [1] и Хафа (ПХ) [2] является

Рассмотрена задача обнаружения линий электропередач на изображении. Предложен алгоритм обработки изображения, решающий поставленную задачу в два этапа: обнаружение отдельных фрагментов линий электропередач с помощью преобразования Радона и объединение этих фрагментов в непрерывные кривые с помощью многоагентного подхода. Представлены результаты экспериментальных исследований разработанного алгоритма.

одним из распространённых способов обнаружения прямолинейных границ. В то же время при решении задачи обнаружения ЛЭП на изображении эти преобразования используются практически повсеместно [3, 4].

Обычно применение ПР или ПХ подразумевает обработку исходного изображения каким-либо детектором границ. Такое изображение подвергается ПР или ПХ, результат которого содержит локальные максимумы, предположительно соответствующие какой-либо прямой на исходном изображении.

Однако применение в задаче обнаружения ЛЭП распространённых методов обнаружения прямолинейных границ с использованием ПР или ПХ мало эффективно по следующим причинам:

- каждый провод ЛЭП содержит две прямолинейные границы, каждая из которых обнаруживается обычными методами как самостоятельная граница;

- в городской местности, где чаще всего можно наблюдать ЛЭП, достаточно много прямолинейных границ от объектов искусственного происхождения (например, зданий), не имеющих к ЛЭП никакого отношения, вследствие чего возникает проблема отличия простых прямолинейных границ, от границ, принадлежащих ЛЭП;

- на фоне объектов естественного происхождения или просто объектов сложной неоднородной текстуры затруднительно детектировать прямолинейные границы обычными способами, использующими информацию о скорости перепада яркости, но практически игнорирующими направление этого перепада при применении детектора границ;

- в случае наблюдения ЛЭП с близкого расстояния

или на их высоте и при определённых ракурсах некоторые провода не будут прямолинейными, вместо этого они будут примерно соответствовать уравнениям цепной линии [5] с поправкой на растяжимость и неабсолютную гибкость проводов, а также эффект перспективы наблюдения.

В [6] предлагается отличать провода от обычных границ по признаку направления градиента. Показано, что использование информации о направлении градиента позволяет повысить точность обнаружения прямых в условиях шума или сложного неоднородного фона. Таким образом, использование векторного поля градиента для обнаружения ЛЭП на изображении представляется обоснованным. Основываясь на этом принципе, в [7] вводится так называемое интегральное векторное преобразование Радона (ИВПР), вычисляемое на основе обычного:

$$S(s, \alpha) = \cos \alpha \cdot \Phi \left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right] + \sin \alpha \cdot \Phi \left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right];$$

$$T(s, \alpha) = \int_{\rho=s_{\min}}^s S(\rho, \alpha) d\rho, \quad s \in [s_{\min}, s_{\max}]. \quad (1)$$

где $S(s, \alpha)$ – результат ВПР; (s, α) – параметры прямой; $\Phi[f]$ – ПР; $f(x, y)$ – исходное изображение.

С помощью ИВПР можно обнаружить прямые линии проводов, в том числе на неоднородном фоне, а также оценить их толщину в пикселях. В отличие от ПР данное преобразование может иметь как положительные, так и отрицательные значения. В то же время ИВПР обладает и привычным для ПР свойствами – его локальные экстремумы (минимумы и максимумы) косвенно могут указывать на наличие прямолинейной границы. Таким образом, ИВПР представляется наиболее подходящим преобразованием для использования при решении задачи обнаружения ЛЭП.

В соответствии с разработанным на основе ИВПР алгоритмом обнаружения ЛЭП на изображении (рис. 1) выполняются следующие действия:

1) обрабатываемое изображение разбивается на квадратные блоки фиксированного размера, при этом каждый соседний блок сдвинут относительно текущего на половину ширины блоков;

2) фрагменты изображения, принадлежащие каждому из блоков, подвергаются ИВПР, результаты которых подвергаются процедуре поиска локальных экстремумов;

3) полученные списки локальных экстремумов для каждого из блоков подвергаются отбраковке сначала в пределах одного блока (внутриблоковой фильтрации), а затем между блоками (межблоковой фильтрации).

Остановимся подробнее на каждом из пунктов. Исходными данными для ИВПР является векторное поле анализируемого изображения. Так как этому преобразованию подвергаются части изображения, то расчёт градиентного поля выполняется предварительно для всего изображения, а затем для каждого отдельного блока выделяется свой фрагмент этого поля, на основе которого рассчитывается ИВПР.

При обычном разбиении области изображения на квадратные блоки, при котором отсутствует наложение,

возможен случай, когда провод попадает на место стыка двух рядов блоков. В таком случае разные границы одного кабеля попадут на разные блоки, что не позволит распознать этот объект как ЛЭП. Также при слишком малой длине попавшего в блок фрагмента кабеля (по отношению к размерам этого блока) локальный экстремум окажется слабо выражен и может быть проигнорирован. Для компенсации подобных нежелательных эффектов блоковой обработки, в соответствии с предлагаемым алгоритмом, соседние блоки сдвинуты друг от друга не на размер блока, а на его половину. Таким образом, практически любая часть кабеля, так или иначе, попадет в достаточном для обнаружения объёме в какой-либо блок.

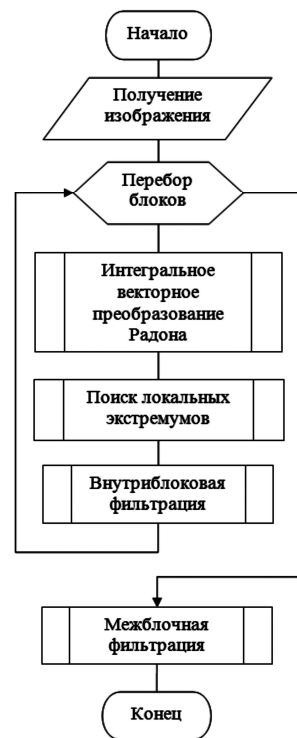


Рис. 1. Блок-схема алгоритма обнаружения линий электропередач

На следующем после разбиения шаге выполняется ИВПР от каждого из блоков. Изображение, содержащее результат этого преобразования, подвергается размытию для уменьшения числа ложных обнаружений. Результат последней операции подвергается поиску локальных экстремумов. Каждый найденный экстремум может соответствовать кабелю на исходном изображении, либо является результатом ложного обнаружения. Для снижения числа ложных тревог на следующем этапе применяется внутриблоковая фильтрация: строится гистограмма контрастности найденных локальных экстремумов, по которой эвристическим критерием выбирается порог фильтрации. В списке найденных локальных максимумов каждого отдельно взятого блока остаются лишь те из них, чья контрастность не ниже пороговой для этого блока.

Экспериментальные исследования показали, что применение к обнаруженным фрагментам проводов пороговой фильтрации по степени выраженности экстремума (контрасту между проводом и фоном, умноженно-му на длину фрагмента) не достаточно для достижения

приемлемой точности. Более детальный анализ выявил, что распределение плотностей вероятностей контрастности экстремумов для ложных и правильных обнаружений слабо отличимы. Из этого следует, что проблему полностью не решит даже оптимальная пороговая фильтрация.

Ложно обнаруженные сегменты проводов отличает произвольность их положения и ориентации, в то время как сегменты, принадлежащие проводам, с высокой вероятностью имеют своё продолжение в соседних блоках по обеим сторонам в виде других сегментов со схожей ориентацией и расположенных так, что вместе они образуют цепь сегментов с малой кривизной. Подобные цепи в дальнейшем будем называть группами. Для выделения подобных групп применяется **межблочная фильтрация**.

Так как перебор всех возможных соединений различных сегментов друг с другом в поиске наиболее длинной и гладкой цепи является неэффективным, то в данной работе для построения группы сегментов применяется многоагентный подход. В соответствии с одним из вариантов этого подхода [8] каждый сегмент должен быть представлен агентом потребности, а каждая допустимая связь между двумя сегментами – агентом возможности. Связь оценивается как допустимая, если:

- 1) соответствующие сегменты принадлежат разным блокам;
- 2) сдвиг одного блока относительно другого не превышает ширины блока по каждой из осей;
- 3) два сегмента имеют схожую ориентацию и с достаточной точностью могут быть аппроксимированы прямой.

Последний пункт выполняется при условии:

$$\begin{cases} \min(|\alpha_1 - \alpha_2|, |\alpha_1 + \alpha_2 - 180^\circ|) < \Delta_\alpha, \\ |\rho_2 - \rho_1 + \Delta x \cos(\alpha_1) + \Delta y \sin(\alpha_1)| < \Delta_\rho, \\ |\rho_2 - \rho_1 + \Delta x \cos(\alpha_2) + \Delta y \sin(\alpha_2)| < \Delta_\rho, \end{cases} \quad (2)$$

где α_1 и α_2 – углы поворота обоих сегментов; Δ_α – порог несовпадения углов α_1 и α_2 ; ρ_1 и ρ_2 – сдвиги обоих сегментов относительно центров их блоков; Δx и Δy – координаты сдвига второго блока относительно первого в пикселях; Δ_ρ – порог несовпадения сдвига сегментов. Величины Δ_α и Δ_ρ задаются заранее.

Если какой-то из сегментов не находит для себя ни одной допустимой связи на начальном этапе, то агент потребности для него не создаётся.

Основная идея многоагентного подхода с агентами потребности и возможности заключается в том, что каждый агент потребности ищет такой агент возможности, связь с которым обеспечила бы ему наиболее выгодное состояние. В данной работе предлагаются следующие правила по построению сети возможности-потребности (ПВ-сети):

- 1) выгода для некоторой группы связанных в цепь сегментов определяется одинаково для каждого из её членов;
- 2) эта выгода определяется критерием k , который увеличивается с ростом размера группы n (число входящих в группу сегментов) и уменьшается с ростом σ – СКО расстояний концов отрезков до аппроксимирующей их кривой (таким образом, находится некий баланс между размером группы и правильностью её формы);

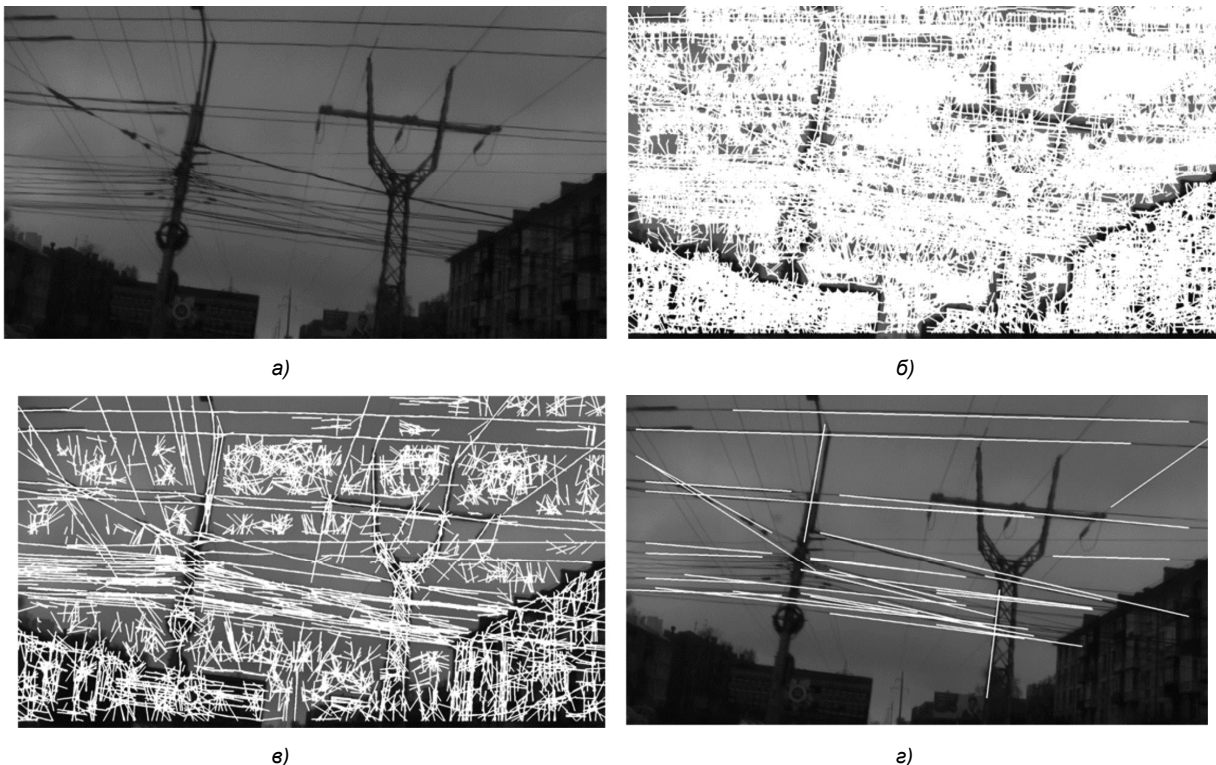


Рис. 2. Примеры результатов основных этапов работы алгоритма: а) – исходное изображение, б) – найденные с помощью ИВПР сегменты, в) – результат внутриблоковой фильтрации, г) – результат межблоковой фильтрации

3) каждый агент возможности обозначает возможную связь двух агентов потребностей в не зависимости от того, представляют ли они отдельные сегменты, или же объединяются две группы в ещё большую группу;

4) каждый агент потребности принимает решение об объединении или не объединении с другим на основе максимизации критерия (т.е. он выступает за объединение с таким агентом, в группе с которым он достигает максимального значения критерия);

5) если два агента потребности выступили за объединение друг с другом посредством голосования за соответствующий агент возможности, оба агента потребности и агент возможности исчезают, и появляется новый агент потребности, включающий в себя новую объединённую группу с соответствующим критерием;

6) объединение в новый агент потребностей необратимо и сопровождается исключением ряда агентов возможности, связанных с участниками объединения, т.к. эти возможности теперь нереализуемы;

7) если на каком-то этапе агент потребности оказывается без единой возможности, то он считается прошедшим фильтрацию, если размер его группы превышает некоторое пороговое значение (в противном случае он исключается).

Критерий k определяется по выражению:

$$k = \begin{cases} k_0, & \text{если } n = 1; \\ k_1 n - \frac{k_2 \sqrt{2}}{a} \sigma, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (3)$$

где a – размер стороны блока в пикселях; k_0 , k_1 и k_2 – коэффициенты, подбираемые эмпирически.

Процесс выстраивания соединений является итеративным. В самом начале (на первой итерации) каждый агент потребности представляет один единственный сегмент, стремящийся стать частью группы с максимальным значением критерия. Вступающие во взаимодействие по указанным правилам агенты потребности и возможности в итоге выстраивают законченную ПВ-сеть, содержащую найденные цепи сегментов, принад-

лежащие проводам на исходном изображении.

Пример результатов выполнения каждого из этапов алгоритма приведён на рис. 2.

Для условий наблюдения с низким отношением сигнал/шум для повышения точности работы алгоритма после окончания обработки текущего кадра также применяется временная фильтрация, учитывающая результаты работы алгоритма на предыдущих кадрах.

Экспериментальные исследования

Для оценки работоспособности алгоритма была использована видеопоследовательность формата Full HD (1920x1080 пикселей), содержащая 7774 кадра, на 4521 из которых ЛЭП присутствует, а на остальных 3253 – отсутствует. Оценка отношения сигнал/шум проводилась на основе наугад взятого типичного кадра из этой видеопоследовательности. На нём присутствовали как алгоритма ЛЭП, так и стволы деревьев, которые, являясь частью фона, могут оказаться основной причиной ложных обнаружений для исследуемого.

Для оценки отношения сигнал/шум в расчёт берутся модули градиентов изображений провода, ствола дерева и всего изображения. Фрагменты изображений, соответствующие первым двум пунктам этого ряда, отмечены на рис. 3. Оценка этих параметров составляет: для провода – 23,09 (3623 пикселя); для ствола дерева – 44,87 (1102 пикселя); для всего изображения – 11,84 (129600 пикселей). Таким образом, отношение средних модулей градиента для провода и ствола дерева составляет 0,5146, а для провода и всего изображения – 1,95, что в обоих случаях говорит о достаточно низком отношении сигнал/шум для данной видеопоследовательности.

По итогам проведённых экспериментальных исследований на данной видеопоследовательности (рис. 4) получены следующие результаты:

– частота правильного обнаружения составляет 89,96 %;

– частота ложного обнаружения составляет 0,09 %.



Рис. 3. Случайный кадр видеопоследовательности, взятый для оценки отношения сигнал/шум, с отмеченными на нём фрагментами, соответствующими изображению провода (чёрная рамка) и ствола дерева (белая рамка)



Рис. 4. Результат обработки одного из кадров алгоритмом обнаружения ЛЭП (тёмными линиями обозначены обнаруженные провода)

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет с высокой точностью обнаруживать ЛЭП на видеопоследовательности. Однако ценность данной работы представляется не столько её настоящими результатами, сколько перспективами дальнейшего развития, такими как: учёт модели более сложной формой провода, чем прямая (при вычислении критерия k) введение возможности разрушения созданных групп агентов в случае, если одна из составных частей видит большую выгоду в присоединении к другой группе. Многоагентный подход, используемый в данной работе, может быть использован и в задачах распознавания более сложных образов. В этом случае геометрические примитивы должны быть способны собираться не только в кривые, но и в более сложные геометрические объекты, для чего необходимо усложнить правила взаимодействия агентов.

Исследования выполнены при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских учёных МК-5331.2016.9.

Литература

1. Toft P.A., «The Radon Transform: Theory and Implementation, PhD Thesis», Technical University of Denmark, 1996.
2. Волегов Д.Б., Гусев В.В., Юрин Д.В. «Обнаружение прямых линий на изображениях на основе преобразования Хартли. Быстрое преобразование Хафа» // Труды

конференции Графикон 2006, 16-я международная конференция по компьютерной графике и ее приложениям, Россия, Новосибирск, Академгородок, 1-5 июля 2006. – С. 182-191.

3. Candamo J., Kasturi R., Goldgof D. and S. Sarkar, «Detection of Thin Lines Using Low Quality Video from Low Altitude Aircraft in Urban Settings», IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, vol. 45, No. 3 July 2009.

4. Li, Zhengrong, Liu, Yuee, Walker, Rodney A., Hayward, Ross F., & Zhang, Jinglan (2009) Towards automatic power line detection for a UAV surveillance system using pulse coupled neural filter and an improved Hough transform. Machine Vision and Applications, 21(5), pp. 677-686.

5. Меркин Д.П. Введение в механику гибкой нити. – М.: Наука, 1980. – 240 с.

6. Sanders-Reed J.N., Yelton D.J., Witt C.C., Galetti R.R. «Passive Obstacle Detection System (PODS) for Wire Detection», Proc of the SPIE, 7328, April, 2009.

7. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Шубин Н.Ю. Преобразование Радона в задачах обнаружения линий электропередач // Техническое зрение в системах управления-2016: Сб. тезисов науч.-техн. конф. – М., 2016. – С. 64-65. [Электронный ресурс] <http://tvcs2016.technicalvision.ru/file/tezis.pdf> (дата обращения: 20.06.2016).

8. Виттих В.А., Скобелев П.О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и Телемеханика. – 2003. – №1. – С. 162-169.