

ИНСТРУМЕНТЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НАВИГАЦИИ МУЛЬТИКОПТЕРА

Р.Р. Рзаев¹, А.Б. Керимов¹, В.Р. Алиев¹

¹Институт Систем Управления Министерства Науки и Образования
Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджан
e-mail: raminrza@yahoo.com

Абстракт. Бортовая система компьютерного (технического) зрения предназначена для автоматического управления беспилотными летательными аппаратами, в частности, мультикоптерами, на основе распознавания изображений поверхности Земли в условиях недоступности сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Система технического зрения представляет собой программно-аппаратный комплекс в составе бортового вычислителя на основе одноплатного компьютера с платой расширения на базе 32-разрядного контроллера, инерционного измерительного блока, позволяющего определить положение беспилотного летательного аппарата в пространстве. В качестве инструментов технического зрения в статье предлагается использовать методы распознавания, основанные на Вейвлет и Фурье преобразованиях одномерных сигналов, а также аддитивную свертку соответствующих критериев оценки. На конкретном примере изображений поверхности Земли в статье проводится сравнительная оценка методов распознавания на базе семейств одномерных сигналов, искусственно созданных путем смещения относительно базового сигнала, формируемого после извлечения признаков распознавания, сегментации и линеаризации заданного изображения.

Ключевые слова: Мультикоптер, изображение поверхности Земли, одномерный сигнал, метод распознавания, аддитивная свертка критериев оценки.

AMS Subject Classification: 94-10.

1. Введение

Высокая уязвимость мультикоптеров перед факторами «рукотворного» воздействия, обусловлена их низкой степенью интеллектуальности, обеспечивающей автономный режим полета. Нерешенность этой проблемы снижает эффективность применения мультикоптеров в условиях активной работы существующих систем электронного противодействия. Одним из способов решения этой задачи лежит в плоскости управления полетом мультикоптера по заданной траектории, которое реализуется при наличии ограничений по времени, скорости, угловой скорости, высоте, а также ограничения в контрольных точках по времени, скорости [9, 11] и пространственной ориентации мультикоптера. Среди перечисленных наиболее серьезными являются пространственные ограничения, нарушение которых становятся фатальными для аппарата. Одной из причин такого нарушения является потеря сигнала со спутников, обслуживающих

приемники GPS. В этом случае навигация осуществляется через инерциальные датчики [3, 8], которые постепенно накапливают ошибки в определении координат местоположения мультикоптера. Актуальной становится задача автоматического ориентирования в пространстве с использованием средств компьютерного (технического) зрения [16] или, более конкретно, с применением методов распознавания.

2. Постановка задачи

Предположим, что мультикоптер, снабженный фотокамерой с высокой разрешающей способностью, в процессе своего полета производит контрольные снимки поверхности Земли и формирует последовательность изображений (см. Рис. 1), характеризуемых признаками распознавания F_1, F_2, \dots , где F_1 – признак распознавания начального изображения. После очередного фотографирования местности и фиксации контрольного признака распознавания изображения F_n мультикоптер, оказавшись в зоне поражения системы противодействия БПЛА и/или средства радиоэлектронной борьбы, отключается от сигнала GPS и, тем самым, дезориентируется в пространстве. В сложившихся условиях необходимо, чтобы навигационная система аппарата обеспечила его автопилотирование посредством распознавания изображений, где отправным является изображение с признаком распознавания F_n . Задача состоит в формировании траектории полета по обратному маршруту, определяемого набором контрольных точек P_n, P_{n-1}, \dots, P_1 в Декартовой системе координат (x, y, z) , где P_n – начальная точка, а P_1 – конечная точка маршрута [1]. В данном случае, траекторией полета будет ломаная, каждая узловая точка которой P_k ($k=1 \div n$) произвольно устанавливается в пространстве над изображением местности с признаком распознавания F_k . При этом, узловые точки ломаной являются контрольными, в которых мультикоптер вынужден будет полностью останавливать свое поступательное движение для поиска следующей контрольной точки. Очевидно, что в отличие от гладких траекторий, формируемых с учетом маневренности мультикоптеров, ломаная траектория не является оптимальной по времени.



Рис. 1. Последовательность контрольных снимков поверхности Земли вдоль траектории полета мультикоптера

Таким образом, решение задачи автоматического ориентирования в пространстве с использованием средств технического зрения предполагает реализацию программного обеспечения по принципам классического распознавания изображений (или двумерных сигналов) на основе адаптации метода, обеспечивающего поиск ключевых точек, выделение границ объектов, сегментацию и геометрическое преобразование. При этом, соответствующий алгоритм распознавания должен предполагать наличие значительно меньшей базы изображений, обусловленной количеством снимков поверхности Земли, производимых фотокамерой мультикоптера вдоль траектории его полета $T_0(v) = \{(x(v), y(v), z(v))\}, v \in [0, 1]$.

3. Формирование семейства искусственных сигналов для адаптации и сравнения методов распознавания

В [12] был предложен подход к адаптации наиболее подходящего метода для распознавания образов из конкретного класса одномерных или двумерных сигналов (изображений). Данный подход основан на формировании соответствующего семейства искусственных сигналов (СИС), что позволило сравнивать классические методы распознавания и на их основе синтезировать новые с применением аддитивной свертки [14]. Суть алгоритма формирования СИС состоит в следующем.

Предположим, что задан некий аналоговый сигнал (см. Рис. 2(a)), который описывается функцией $x(t) = 0.5 \cdot \sin(t) + \sin(2 \cdot t) + 2$. Максимальной частотой для этой функции является $1/\pi = 0.3183$, что для данного случая существенно ниже соответствующей частоты Найквиста. После дискретизации аналогового сигнала $x(t)$ с учетом требований теоремы Найквиста-Котельникова был получен цифровой сигнал s_0 , на базе которого формируется СИС $S = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_6\}$, один из примеров которого проиллюстрирован на Рис. 2(b).

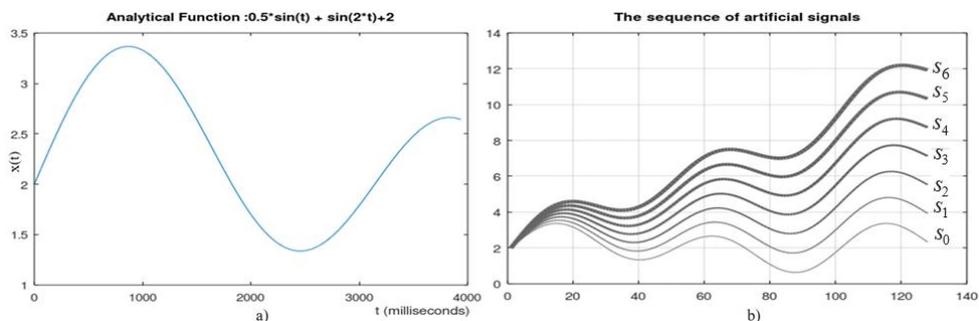


Рис. 2. Аналоговый сигнал (a) и соответствующее ему СИС (b)

4. Классические методы распознавания одномерных сигналов

Распознавание изображений поверхности Земли, производимых фотокамерой мультикоптера вдоль траектории его полета $T_0(v)$, предполагает адаптацию соответствующего метода, обеспечивающего наиболее точное решение. С этой целью, определяются главные признаки распознавания и осуществляется выбор наиболее приемлемой нормы расстояния. Ниже рассматриваются два наиболее распространенные методы распознавания, применяющие Евклидову метрику.

Вейвлет-преобразование (ВП) [15, 17]. Распознавание, основанное на применении ВП, предполагает декомпозицию распознаваемого сигнала на высокочастотные и низкочастотные составляющие, которые характеризуются соответствующими значениями «детализирующих» и «аппроксимирующих» коэффициентов. В частности, для одномерного сигнала, включающего 256 отсчетов (см. Рис. 3(a)), ВП на четырёх уровнях декомпозиции показано на рис. 3(b).

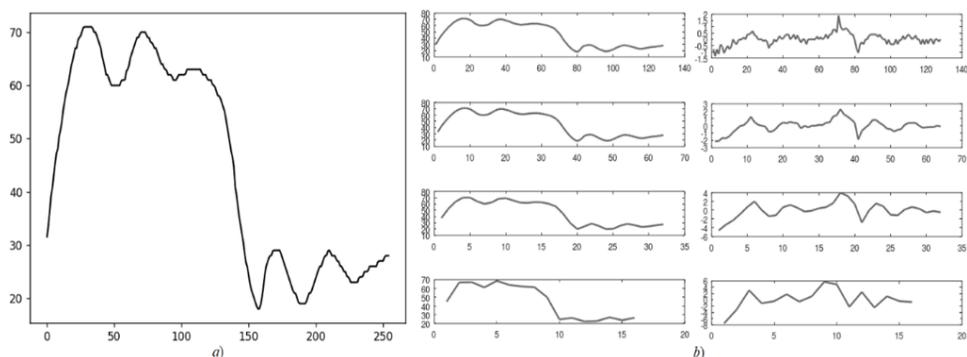


Рис. 3. Одномерный сигнал с 256-ю точками отсчета (a), и его ВП на 4-х уровнях (b)

В данном случае средние величины и стандартные отклонения характеристик (коэффициентов) в каждой полосе фильтрации выбираются в качестве признаков распознавания. В частности, для сигнала, представленного на Рис. 3(a), можно насчитать 16 значений распознаваемых признаков.

Пусть x и y являются два одномерных сигнала. Тогда, обозначая средние значения и стандартные отклонения коэффициентов в высокочастотных и низкочастотных полосах соответственно, как $H_{1i}, L_{1i}, H_{2i}, L_{2i}$, ($i = 0, 1, \dots, N$), где N – число уровней декомпозиции, в качестве нормы расстояния между сигналами x и y также выбирается Евклидова метрика, а именно

$$D_{WT}(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (H_{1i} - H_{2i})^2 + \sum_{i=1}^N (L_{1i} - L_{2i})^2} . \quad (1)$$

Фурье-преобразование (ФП) [10]. Распознавание, основанное на применении ФП, предполагает создание спектрального образа для

распознаваемого одномерного сигнала. Так, для одномерного сигнала, включающего 256 точек отсчета (см. рис. 3(a)), ФП создает характерный амплитудный спектральный образ (см. рис. 4), который включает уже 128 точек отсчета.

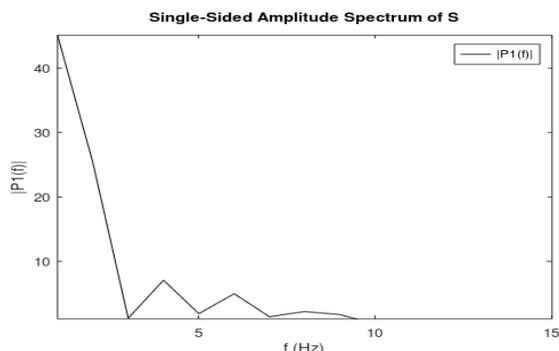


Рис. 4. Амплитудный спектр одномерного сигнала, полученный с применением ФП

Пусть x и y являются два одномерных сигнала, где в качестве признаков распознавания принимаются переменные соответствующих амплитудных спектров этих сигналов: f_{1i} и f_{2i} ($i=0, 1, \dots, N$), где N число переменных. В этом случае, в качестве нормы расстояния между сигналами x и y выбирается Евклидова мера вида

$$D_{FT}(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (f_{1i} - f_{2i})^2} \cdot \quad (2)$$

5. Критерии оценки методов распознавания

Перечисленные выше два критерия оценки (1) и (2), а также аддитивная свертка этих критериев применяются для распознавания изображений, представленных на Рис. 1. Соответствующие алгоритмы распознавания тестируются на базе СИС, каждая из которых формируется относительно одномерного сигнала, в который трансформируется соответствующее изображение из Рис. 1. При этом применяются следующие четыре критерия оценки, в составе которых используются средняя величина (MV – mean value) и стандартное отклонение (SD – standard deviation), а также расстояние между двумя сигналами s_i и s_j ($i, j = 1 \div N_s$) в виде $D_k^h(s_i, s_j)$, где $k = 1, 2, \dots$ порядковый номер метода распознавания; N_s – число сигналов в составе СИС; h – длина, на которую смещаются сигналы при формировании СИС.

Критерий 1 (C₁ – равномерность): по мере удаленности распознаваемых сигналов их расстояния от эталона должны равномерно увеличиваться, а не скачкообразно варьироваться. Формально этот критерий описывается следующим образом:

$$MCV1_k^h = \max\{[MV(CV1_k^h) - CV1_k^h(i, j)]\} \quad (i, j = 1 \div N_s), \quad (3)$$

где

$$CV1_k^h(j) = \frac{D_k^h(s_0, s_{j+1}) - D_k^h(s_0, s_j)}{\Delta t} \quad (j = 1 \div N_s). \quad (4)$$

$MCV1_k^h$, как максимальное отклонение производных расстояний от среднего значения, количественно отражает адекватность k -го метода по критерию C_1 . В терминах стандартного отклонения этот показатель интерпретируется в следующем виде

$$MCV1_k^h = SD[CV1_k^h]. \quad (5)$$

Критерий 2 (C_2 – симметричность): для конкретного распознаваемого сигнала Евклидовы расстояния от слева стоящего и от справа стоящего сигналов должны быть приблизительно равными, то есть их отношение должно быть приблизительно равно единице. В случае, если слева и справа стоящие сигналы симметричны относительно данного сигнала, то, очевидно, эти расстояния будут абсолютно равными, то есть их попарные отношения будут тождественны единице. Формально этот критерий описывается следующим отношением:

$$CV2_k^h(i) = \frac{D_k^h(s_i, s_{i+1})}{D_k^h(s_{i-1}, s_i)} \quad (i = 1 \div N_s), \quad (6)$$

которое определяет пропорцию между смежными расстояниями, в частности, между расстояниями от справа расположенного $(i+1)$ -го и от слева расположенного $(i-1)$ -го сигналов до i -го сигнала. В данном случае, аналогично имеем:

$$MCV2_k^h = \max\{[MV(CV2_k^h) - CV2_k^h(i)]\} \quad (i, j = 1 \div N_s), \quad (7)$$

что означает максимальное отклонение отношения между соседними расстояниями от среднего значения which means maximum deviation of the ratio between adjacent distances from mean value

$$MCV2_k^h = SD[CV2_k^h]. \quad (8)$$

Критерий 3 (C_3 – быстродействие): по мере «сближения» распознаваемых сигналов к эталону скорость сходимости значений расстояний увеличивается. Здесь под скоростью сходимости значений расстояний понимается разность между текущим и следующим значениями расстояний, поделенная на следующее значение расстояния. Формально этот критерий описывается следующим соотношением:

$$CV3_k^h(i) = \frac{|D_k^h(s_1, s_i) - D_k^h(s_1, s_{i+1})|}{D_k^h(s_1, s_{i+1})} \quad (i, j = 1 \div N_s). \quad (9)$$

В этом случае величина

$$MCV3_k^h = \min\{CV3_k^h(i, j)\} (i, j = 1 \div N_s) \quad (10)$$

определяет скорость сходимости расстояний $D_k^h(s_i, s_j)$ к нулю, а величина

$$MCV1_k^h = SD[CV1_k^h] \quad (11)$$

обозначает стандартное отклонение производных расстояний.

Критерий 4 (C_4 – чувствительность): увеличение шага смещений сигналов не может улучшить удовлетворительность методов распознавания относительно критериев оценки 1, 2 и 3, то есть точность метода распознавания должна оставаться прежней или ухудшаться.

Для этого критерия рассматриваются два семейства одномерных кривых s_i ($i=1 \div N_s$), сформированных путем смещения сигналов на два разных шага: h_1 и h_2 ($h_1 < h_2$). Далее, на базе этих семейств сигналов по каждому из перечисленных критериев, т.е. для каждого $l = 1, 2, 3$ определяется отношение в виде

$$u_{lk} = \begin{cases} \frac{CVl_k^{h_1}}{CVl_k^{h_2}}, & \text{if } CVl_k^{h_2} < CVl_k^{h_1} \\ \frac{CVl_k^{h_2}}{CVl_k^{h_1}}, & \text{if } CVl_k^{h_2} \geq CVl_k^{h_1}, \end{cases} \quad (12)$$

которое отражает так называемую «чувствительность» применяемого метода распознавания на предмет соответствия l -му критерию. В сумме, т.е. в виде

$$u_k = u_{1k} + u_{2k} + u_{3k} \quad (13)$$

эти показатели устанавливают общую «чувствительность» метода распознавания.

Дальнейшее обсуждение связано с оценкой методов распознавания на предмет их соответствия перечисленным критериям в контексте эмпирического анализа адекватности заявленных методов распознавания на базе СИС.

6. Аддитивная свертка методов распознавания, основанных на Вейвлет и Фурье преобразованиях

Метод распознавания, основанный на взвешенной аддитивной свертке нескольких критериев оценки, подробно описан в [13] на примере распознавания одномерных (аналоговых) сигналов. Далее данный подход адаптируется для распознавания изображений поверхности Земли с применением критериев оценки методов распознавания, основанных на Вейвлет и Фурье преобразованиях.

На базе изображения i_{20} , включая три последовательно смещенных относительно друг друга на две единицы вправо ($h_1 = 2$), построено искусственное семейство $I_2 = \{i_{20}, i_{21}, i_{22}, i_{23}\}$, которое представлено на Рис. 5.

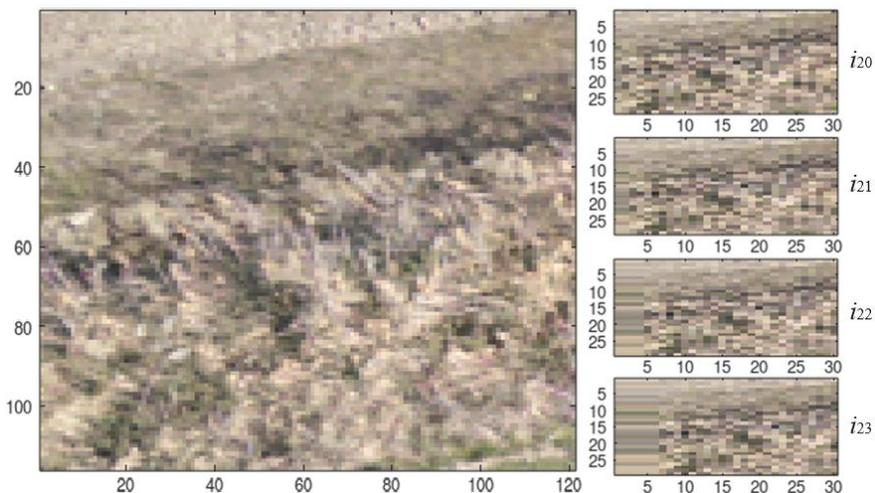


Рис. 5. Искусственное семейство изображений I_2

После извлечения признаков распознавания и сегментации изображений, например, размером 4×4 , I_2 преобразуется в семейство, представленное на Рис. 6.

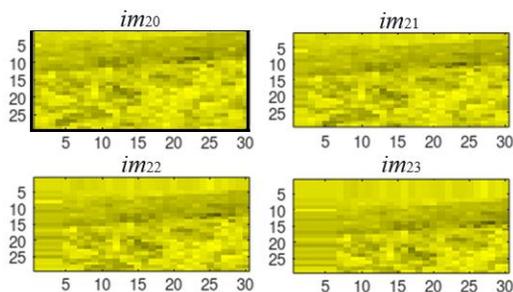


Рис. 6. Семейство изображений $\{im_{20}, im_{21}, im_{22}, im_{23}\}$ после извлечения признаков и сегментации

Рис. 7 демонстрирует следующее семейство соответствующих одномерных (регулярных) сигналов $S = \{s_{20}, s_{21}, s_{22}, s_{23}\}$ с общим числом опорных точек $RP = 870$, сформированный путем линеаризации изображений $im_{20}, im_{21}, im_{22}, im_{23}$.

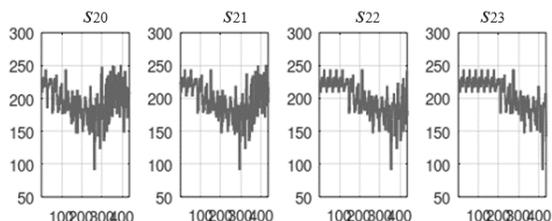


Рис. 7. Семейство одномерных сигналов, в которые трансформировались изображения $im_{20}, im_{21}, im_{22}, im_{23}$

В следующих Таблицах 1 и 2 представлены результаты попарного сравнения одномерных сигналов из рассматриваемого семейства $S_2 = \{s_{20}, s_{21}, s_{22}, s_{23}\}$ с применением метрик (1) и (2) методов распознавания, основанных Вейвлет и Фурье преобразований, соответственно.

Таблица 1. Попарные сравнения сигналов из S_2 с применением (1)

Сигналы	s_{20}	s_{21}	s_{22}	s_{23}
s_{20}	0	2.8328	8.1146	10.865
s_{21}	2.8328	0	7.2905	9.7807
s_{22}	8.1146	7.2905	0	4.7550
s_{23}	10.865	9.7807	4.755	0

Таблица 2. Попарные сравнения сигналов из S_2 с применением (2)

Сигналы	s_{20}	s_{21}	s_{22}	s_{23}
s_{20}	0	7.2076	12.317	16.023
s_{21}	7.2076	0	10.604	14.645
s_{22}	12.317	10.604	0	10.295
s_{23}	16.023	14.645	10.295	0

Результаты, представленные в Таблицах 1 и 2, позволили количественно оценить адекватность методов распознавания сигналов, основанных на Вейвлет и Фурье преобразованиях, на предмет их соответствия первым трем критериям C_l ($l=1\div 3$). Соответствующие оценки в виде максимальных отклонений от единицы (G_k^h) для каждого из рассматриваемых методов ($k = 1, 2$) сведены в Таблицу 3.

Таблица 3. Оценка адекватности методов распознавания на предмет соответствия критериям C_l ($l = 1\div 3$) ($h = 2$)

Метод	Порядковый номер метода (k)	C_1	C_2	C_3
ВП	1	1.26560	0.73568	0.34909
ФП	2	0.70192	0.31201	0.58517

Далее, выбирая шаг смещения вправо по горизонтали как $h = 4$, на базе изображения из Рис. 5 аналогичным образом было построено искусственное семейство изображений $I_4 = \{i_{40}, i_{41}, i_{42}, i_{43}\}$, которое после извлечения признаков распознавания, сегментации и линеаризации трансформировалось в семейство одномерных сигналов $S_4 = \{s_{40}, s_{41}, s_{42}, s_{43}\}$.

В Таблицах 4 и 5 представлены результаты попарного сравнения одномерных сигналов из рассматриваемого семейства S_4 с применением метрик (1) и (2) методов распознавания, основанных Вейвлет и Фурье преобразований, соответственно.

Таблица 4. Попарные сравнения сигналов из S_4 с применением (1)

Сигналы	s_{40}	s_{41}	s_{42}	s_{43}
s_{40}	0	8.1146	13.985	24.046
s_{41}	8.1146	0	12.174	21.411
s_{42}	13.985	12.1740	0	10.382
s_{43}	24.046	21.4110	10.382	0

Таблица 5. Попарные сравнения сигналов из S_4 с применением (2)

Сигналы	s_{40}	s_{41}	s_{42}	s_{43}
s_{40}	0	12.317	18.458	22.348
s_{41}	12.317	0	14.620	19.037
s_{42}	18.458	14.620	0	12.729
s_{43}	22.348	19.037	12.729	0

Количественные оценки, представленные в Таблицах 4 и 5, отражают степени адекватности методов распознавания сигналов, основанных на Вейвлет и Фурье преобразованиях, на предмет их соответствия первым трем критериям C_l ($l = 1 \div 3$). Соответствующие оценки в виде максимальных отклонений от единицы ($G_k^{h_2}$) для каждого из рассматриваемых методов ($k = 1, 2$) сведены в Таблицу 6.

Таблица 6. Оценка адекватности методов распознавания на предмет соответствия критериям C_l ($l = 1 \div 3$) ($h_2 = 4$)

Метод	Порядковый номер метода (k)	C_1	C_2	C_3
ВП	1	2.09510	0.231650	0.58023
ФП	2	1.12530	0.027135	0.66732

Далее, на основе величин максимальных отклонений $G_k^{h_1}$ и $G_k^{h_2}$, где $h_1=2$ и $h_2=4$, для каждого k -го метода распознавания рассчитываются коэффициенты u_k по формуле

$$u_k = \frac{G_k^{h_2}}{G_k^{h_1}}, k = 1, 2. \quad (14)$$

В контексте критерия C_4 эти коэффициенты отражают «ухудшения» от применения метрик (1) и (2) в процессе распознавания сигналов из искусственных семейств S_2 и S_4 . В данном случае, так называемый «коэффициент ухудшения» u_k отражают степень удовлетворительности k -го метода распознавания критерию C_4 .

В следующей Таблице 7 представлены величины коэффициентов «ухудшения» u_k , рассчитанных по формуле (13) для двух семейств одномерных кривых S_2 и S_4 . В последнем столбце этой таблицы согласно (14) приведены окончательные величины u_k , отражающие «чувствительность» метода распознавания.

Таблица 7. Коэффициенты чувствительности метода распознавания

Метод	k	$C_1 (u_{1k})$	$C_2 (u_{2k})$	$C_3 (u_{3k})$	u_k
ВП	1	1.6554	0.31487	1.6621	3.6324
ФП	2	1.6032	0.08697	1.1404	2.8306

Полученные значения коэффициентов u_k используются для идентификации весов w_k ($k=1, 2$) критериев оценки рассматриваемых методов распознавания в контексте решения следующей простейшей системы линейных алгебраических уравнений [13]:

$$\begin{cases} \frac{w_2}{w_1} = \frac{u_1}{u_2}, \\ w_1 + w_2 = 1. \end{cases} \quad (15)$$

Применяя (15) к значениям u_{lk} и (13) к коэффициентам u_k ($l=1\div 3; k=1, 2$), сведенных в Таблицу 7, получены значения удельных весов, отражающих относительную приоритетность методов распознавания, а также значения весов C_l ($l = 1\div 3$) – критериев оценки адекватности самих методов. Полученные данные помещены в Таблицу 8.

Таблица 8. Удельные веса методов распознавания

Критерий	Удельные веса	
	w_1	w_2
C_1	0.50801	0.49199
C_2	0.78358	0.21642
C_3	0.59308	0.40692
C_4 (свертка)	0.56203	0.43797

Таким образом, взвешенная аддитивная свертка критериев оценки (1) и (2) выглядит как

$$D = 0.56203 \cdot D_{WT}(x, y) + 0.43797 \cdot D_{FT}(x, y). \quad (16)$$

откуда видно, что метод распознавания, основанный на Вейвлет преобразовании, имеет заметно большую значимость. Чтобы убедиться в

этом, аналогичным образом были проведены дополнительные эмпирические исследования с привлечением нового семейства искусственных изображений $I_5 = \{i_{50}, i_{51}, i_{52}, i_{53}\}$ (см. Рис. 8), построенного путем смещения изображений относительно базового i_{50} на 5 единиц вправо по горизонтали ($h_3 = 5$).

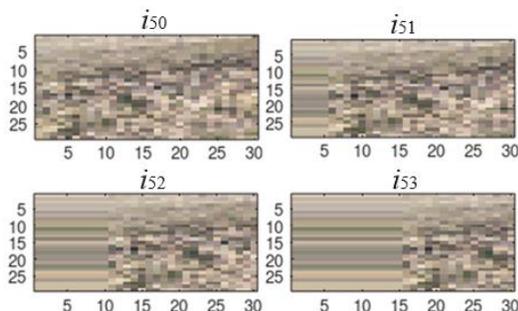


Рис. 8. Искусственное семейство изображений I_5

После извлечения признаков распознавания и сегментации изображений размером 4×4 , I_5 преобразовано в семейство $\{im_{50}, im_{51}, im_{52}, im_{53}\}$, представленное на Рис. 9.

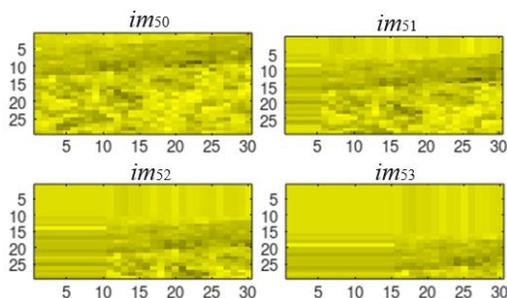


Рис. 9. Семейство изображений $\{im_{50}, im_{51}, im_{52}, im_{53}\}$, полученное после извлечения признаков и сегментации

Рис. 10 демонстрирует семейство одномерных сигналов $S = \{s_{50}, s_{51}, s_{52}, s_{53}\}$ с общим числом опорных точек $RP = 870$, сформированный путем линейризации изображений $im_{50}, im_{51}, im_{52}, im_{53}$.

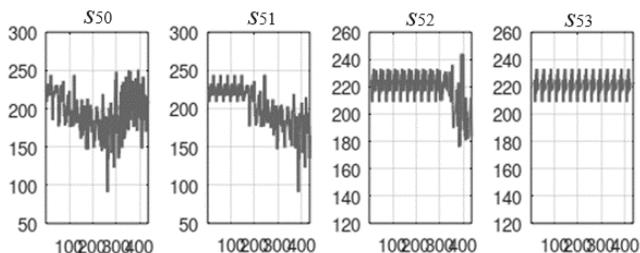


Рис. 10. Семейство одномерных сигналов, в которые трансформировались изображения $im_{50}, im_{51}, im_{52}, im_{53}$

Путем аналогичных рассуждений получены значения удельных весов, отражающих относительную приоритетность методов распознавания, а также значения весов C_l ($l = 1 \div 3$) – критериев оценки адекватности методов. Полученные данные помещены в Таблицу 9.

Таблица 9. Удельные веса методов распознавания

Критерий	Удельные веса	
	w_1	w_2
C_1	0.78224	0.21776
C_2	0.96417	0.03583
C_3	0.58836	0.41164
C_4 (свертка)	0.72394	0.27606

Как не трудно заметить, в этом случае метод распознавания, основанный на Вейвлет преобразовании, имеет еще большую значимость, выраженную в виде удельного веса $w_1=0.72394$ в составе аддитивной свертки. Это, как не странно, подтверждает доминирование метода распознавания с применением Вейвлет-преобразования.

7. Комбинированный подход к распознаванию изображений поверхности Земли

В качестве примера выбрано изображение ландшафта Земли L_0 , которое представлено на Рис. 11. Распознавание осуществляется путем фрагментарного сопоставления его с изображениями на снимках, которые фиксировала фотокамера мультикоптера в процессе его полета. Для наглядности попарного сопоставления с выбраны три изображения, которые представлены на Рис. 1.

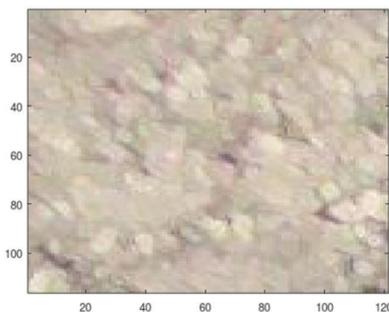


Рис. 11. Изображение ландшафта L_0 , как объекта распознавания

Таким образом, совокупность изображений, представленная на Рис. 12, выбрана базовой для описания процедуры распознавания с применением Вейвлет и Фурье преобразований, а также их аддитивной свертки.

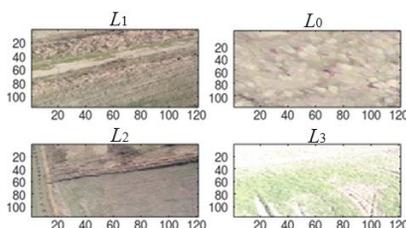


Рис. 12. Совокупность изображений для попарного фрагментарного сопоставления

После извлечения признаков распознавания и сегментации изображений, данная совокупность изображений преобразовано в совокупность, представленное на Рис. 13.

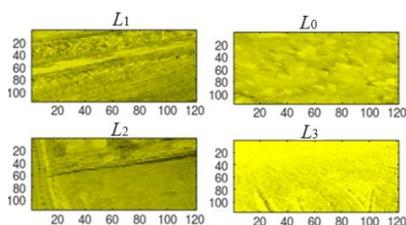


Рис. 13. Совокупность изображений, сформированное после извлечения признаков и сегментации

Рис. 14 демонстрирует совокупность одномерных сигналов, сформированная после линейаризации соответствующих изображений.

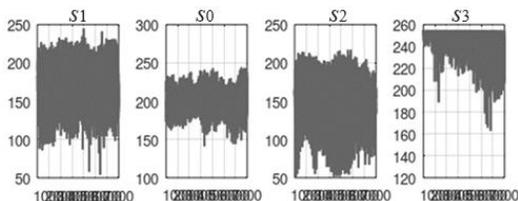


Рис. 14. Совокупность одномерных сигналов, в которые трансформировались соответствующие изображения

В соответствии с описанной выше процедурой, проведены аналогичные вычисления сравнения для сопоставимых фрагментов с различными размерами. Полученные результаты сведены в Таблицы 10, 11, 12, 13 и 14.

Таблица 10. Оценка близости изображений L_k ($k=1\div 3$) к L_0 путем попарного сравнения соответствующих фрагментов размером от 15 до 250 пикселей по высоте и ширине

Метод распознавания	Оценка близости к изображению (в у/е):		
	L_1	L_2	L_3
VT	26.286	137.53	214.24
FT	18.861	45.234	56.916
Аддитивная свертка	24.236	112.05	170.81

Таблица 11. Оценка близости изображений L_k ($k=1\div 3$) к L_0 путем попарного сравнения соответствующих фрагментов размером от 15 до 500 пикселей по высоте и ширине

Метод распознавания	Оценка близости к изображению (в у/е):		
	L_1	L_2	L_3
VT	65.232	165.87	213.91
FT	28.478	48.327	57.041
Аддитивная свертка	55.086	133.42	170.60

Таблица 12. Оценка близости изображений L_k ($k=1\div 3$) к L_0 путем попарного сравнения соответствующих фрагментов размером от 15 до 1000 пикселей по высоте и ширине

Метод распознавания	Оценка близости к изображению (в у/е):		
	L_1	L_2	L_3
VT	111.68	145.68	208.87
FT	42.394	43.419	55.063
Аддитивная свертка	92.551	117.45	166.41

Таблица 13. Оценка близости изображений L_k ($k=1\div 3$) к L_0 путем попарного сравнения соответствующих фрагментов размером от 15 до 2000 пикселей по высоте и ширине

Метод распознавания	Оценка близости к изображению (в у/е):		
	L_1	L_2	L_3
VT	106.81	171.44	169.44
FT	39.941	49.102	45.499
Аддитивная свертка	88.352	137.67	135.22

Таблица 14. Оценка близости изображений L_k ($k=1\div 3$) к L_0 путем попарного сравнения соответствующих фрагментов размером от 15 до 3000 пикселей по высоте и ширине

Метод	Оценка близости к изображению (в у/е):
-------	--

распознавания	L_1	L_2	L_3
VT	130.28	172.92	146.91
FT	40.878	49.24	40.663
Аддитивная свертка	105.60	138.78	117.58

Приведенные в Таблицах 10, 11, 12, 13 и 14 результаты попарного сравнения изображений показывают, что распознавание с применением аддитивной свертки выгодно отличается от методов распознавания с применением Вейвлет и Фурье преобразований сигналов. В частности, как видно из результатов в Таблице 14, в случае применения аддитивной свертки отношение количественной оценки близости изображения L_2 относительно фрагмента L_0 к соответствующей количественной оценке близости изображения L_1 является наибольшим среди подобных отношений с применением других методов.

8. Заключение

Для преодоления систем противодействия БПЛА предлагается использовать систему автопилотирования мультикоптера на новых принципах, подразумевающих размещение на борту дополнительных средств технического зрения и обеспечение полёта по обратной траектории на основе распознавания изображений, запечатленных фотокамерой мультикоптера вдоль всего маршрута его полета. Процедура распознавания изображений поверхности Земли подразумевает стабилизацию [6, 7] мультикоптера на определенной высоте, которую в классическом понимании осуществляет управляющий микроконтроллер, работающий по принципу конечного автомата: системный таймер платы управления, например, раз в 40 мс выдает команду на измерение расстояния до поверхности Земли, после чего осуществляется управление двигателями посредством ПИД-регулятора [2, 4, 5]. После каждого замера текущей высоты относительно поверхности происходит коррекция скорости вращения винтов мультикоптера. Далее, осуществляется замер расстояния по направлению движения к искомой контрольной точке P_k , и в течение некоторого интервала времени в один из каналов регулирования углов подаётся сигнал, вынуждающий плату стабилизации изменить скорости вращения несущих пропеллеров. Осуществив линейное перемещение к искомой контрольной точке пространства, мультикоптер снова занимает горизонтальное положение.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Науки Азербайджана – Грант №АЕФ-МСГ-2023-1(43)-13/03/1-М-03.

Литература

1. Тумуров Э.Г., Шелехов В.И. Требования к системе управления квадрокоптером, Системная информатика, №5, (2015), ИСИ СО РАН, Новосибирск, сс.39-54.
<http://persons.iis.nsk.su/files/persons/pages/QuadReq.pdf>
2. Abbasov A.M., Aliev F.A., Hajiyeva N.S. Sweep method for solution of linear quadratic optimization problem with constraint in the form of equalities on control, Informatics and Control Problems, V.44, N.1, (2024), pp.3-8.
3. Aliev F.A., Maharramov R.R. The detection of small unmanned aerial vehicles (UAV) by the radar stations, Proceedings of the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications, V.II, (2022), pp.72-74.
4. Aliev F.A., Mutallimov M.M., Tunik A.A., Velieva N.I., Rasulova U.Z., Mirsaabov S.M. Constructing an optimal controller for maneuver of quadrotor in 3-D space, TWMS Journal of Pure and Applied Mathematics, V.13, N.2, (2022), pp. 211-221.
5. Aliev F.A., Mutallimov M.M., Velieva N.I., Huseynova N.Sh. Mathematical modeling and control of quadcopter motion, Proceedings of the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications, V.I, (2022), pp.81-83.
6. Aliev F.A., Mutallimov M.M., Velieva N.I., Safarova N.A., Jafarov A.G. Algorithms for solving the stabilization problems of the quadcopter motion by GPS data, Applied and Computational Mathematics, V.22, N.4, (2023), pp. 520-527.
7. Aliev F.A., Sushchenko O.A., Mutallimov M.M., Javadov N.G., Mammadov F. F., Maharramov R.R. Algorithm for quadcopter motion stabilization taking into account data of inertial navigation system, TWMS Journal of Pure and Applied Mathematics, V.14, N.2, (2023), pp. 278-289.
8. Beard Randal. Quadrotor dynamics and control Rev 0.1. Faculty Publications, 1325 (2008). <https://scholarsarchive.byu.edu/facpub/1325>.
9. Hajiyeva N.S., Mutallimov M.M. Construction of optimal program trajectories and controls for vertical motion of a quadcopter, Proceedings of IAM, V.12, N.2, (2023), pp. 166-180.
10. Hindarto H., Anshory I., Efiyanti A. Feature extraction of heart signals using fast Fourier transform, UNEJ e-Proceeding, (2017), pp.165-167.
<https://jurnal.unej.ac.id/index.php/prosiding/article/view/4187>
11. Hoffman G.M., Waslander S.L., Tomlin C.J. Quadrotor helicopter trajectory tracking control, In: AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Published Online, 15 Jun, (2012), pp.1-14. <https://doi.org/10.2514/6.2008-74102008>.
12. Kerimov A.B. Accuracy comparison of signal recognition methods on the example of a family of successively horizontally displaced curves, Informatics and Control Problems, V.42, N.2, (2022), pp.80–91.

13. Rzayev R.R., Kerimov A.B. Comparison of signal recognition methods by combined use of appropriate evaluation criteria within the additive convolution, *Problems of Information Society*, V.14, N.2, (2023), pp.24-31.
14. Rzayev R.R., Kerimov A.B. Signal recognition using weighted additive convolution of evaluation criteria, *The Springer Series "Lecture Notes in Networks and Systems"*, V.758, N.2, (2023), pp.407–416.
15. Saraswat S., Srivastava G., Sachchidanand N. Wavelet transform based feature extraction and classification of atrial fibrillation arrhythmia, *Biomed Pharmacoi Journal*, V.10, N.4, (2017), <http://biomedpharmajournal.org/?p=17470>.
16. Shen S., Mulgaonkar Y., Michael N., Kumar V. Vision-based state estimation and trajectory control towards high-speed flight with a quadrotor. In: *Conference Robotics: Science and Systems*, (2013). DOI:10.15607/RSS.2013.IX.032
17. Zhao M., Chai Q., Zhang Sh. A method of image feature extraction using wavelet. In *PROCEEDINGS, International Conference on Intelligent Computing, ICIC, Emerging Intelligent Computing Technology and Applications*, (2009), pp.187–192.

TECHNICAL VISION TOOLS FOR SOLVING MULTICOPTER NAVIGATION PROBLEMS

R.R. Rzayev¹, A.B. Kerimov¹, V.R. Aliyev¹

¹Institute of Control Systems of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan
e-mail: raminrza@yahoo.com

Abstract. The onboard computer (technical) vision system is designed for automatic control of unmanned aerial vehicles, in particular, multicopters, based on the recognition of images of the Earth's surface under unavailability of signals from global navigation satellite systems. The technical vision system is a software and hardware complex consisting of an onboard computer based on a single-board computer with an expansion board based on a 32-bit controller, an inertial measuring unit that allows determining the position of the multicopter in space. As technical vision tools, the article proposes to use recognition methods based on Wavelet and Fourier transforms of one-dimensional signals, as well as an additive convolution of the corresponding evaluation criteria. Using a specific example of images of the Earth's surface, the article provides a comparative assessment of recognition methods based on families of one-dimensional signals artificially created by shifting relative to the base signal formed after extracting recognition features, segmenting and linearizing a given image.

Keywords: multicopter, Earth surface image, one-dimensional signal, recognition method, additive convolution of evaluation criteria.

References

1. Tumurov Je.G., Shelekhov V.I. Trebovaniya k sisteme upravleniya kvadrokopterom, Sistemnaya informatika, №5, (2015), ISI SO RAN, Novosibirsk, cc.39-54 (Tumurov E., Shelekhov V. Requirements for the quadcopter control system, System Informatics, N.5, (2015), pp.39-54.) (in Russian) <http://persons.iis.nsk.su/files/persons/pages/QuadReq.pdf>
2. Abbasov A.M., Aliev F.A., Hajiyeva N.S. Sweep method for solution of linear quadratic optimization problem with constraint in the form of equalities on control, Informatics and Control Problems, V.44, N.1, (2024), pp.3-8.
3. Aliev F.A., Maharramov R.R. The detection of small unmanned aerial vehicles (UAV) by the radar stations, Proceedings of the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications, V.II, (2022), pp.72-74.
4. Aliev F.A., Mutallimov M.M., Tunik A.A., Velieva N.I., Rasulova U.Z., Mirsaabov S.M. Constructing an optimal controller for maneuver of quadrotor in 3-D space, TWMS Journal of Pure and Applied Mathematics, V.13, N.2, (2022), pp. 211-221.
5. Aliev F.A., Mutallimov M.M., Velieva N.I., Huseynova N.Sh. Mathematical modeling and control of quadcopter motion, Proceedings of the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications, V.I, (2022), pp.81-83.
6. Aliev F.A., Mutallimov M.M., Velieva N.I., Safarova N.A., Jafarov A.G. Algorithms for solving the stabilization problems of the quadcopter motion by GPS data, Applied and Computational Mathematics, V.22, N.4, (2023), pp. 520-527.
7. Aliev F.A., Sushchenko O.A., Mutallimov M.M., Javadov N.G., Mammadov F. F., Maharramov R.R. Algorithm for quadcopter motion stabilization taking into account data of inertial navigation system, TWMS Journal of Pure and Applied Mathematics, V.14, N.2, (2023), pp. 278-289.
8. Beard Randal. Quadrotor dynamics and control Rev 0.1. Faculty Publications, 1325, (2008). <https://scholarsarchive.byu.edu/facpub/1325>
9. Hajiyeva N.S., Mutallimov M.M. Construction of optimal program trajectories and controls for vertical motion of a quadcopter, Proceedings of IAM, V.12, N.2, (2023), pp. 166-180.
10. Hindarto H., Anshory I., Efiyanti A. Feature extraction of heart signals using fast Fourier transform, UNEJ e-Proceeding, (2017), pp.165-167. <https://jurnal.unej.ac.id/index.php/prosiding/article/view/4187>
11. Hoffman G.M., Waslander S.L., Tomlin C.J. Quadrotor helicopter trajectory tracking control, In: AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Published Online, 15 Jun, (2012), pp.1-14. <https://doi.org/10.2514/6.2008-74102008>

12. Kerimov A.B. Accuracy comparison of signal recognition methods on the example of a family of successively horizontally displaced curves. *Informatics and Control Problems*, V.42, N.2, (2022), pp.80-91.
13. Rzayev R.R., Kerimov A.B. Comparison of signal recognition methods by combined use of appropriate evaluation criteria within the additive convolution , *Problems of Information Society*, V.14, N.2, (2023), pp.24-31.
14. Rzayev R.R., Kerimov A.B. Signal recognition using weighted additive convolution of evaluation criteria. The Springer Series “Lecture Notes in Networks and Systems”, V.758, N.2, (2023), pp.407-416.
15. Saraswat S., Srivastava G., Sachchidanand N. Wavelet transform based feature extraction and classification of atrial fibrillation arrhythmia, *Biomed Pharmacoi Journal*, V.10, N.4, (2017). <http://biomedpharmajournal.org/?p=17470>.
16. Shen S., Mulgaonkar Y., Michael N., Kumar V. Vision-based state estimation and trajectory control towards high-speed flight with a quadrotor, In: *Conference Robotics: Science and Systems*, (2013). DOI:10.15607/RSS.2013.IX.032.
17. Zhao M., Chai Q., Zhang Sh. A method of image feature extraction using wavelet. In *PROCEEDINGS, International Conference on Intelligent Computing, ICIC, Emerging Intelligent Computing Technology and Applications*, (2009), pp.187-192.