

ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.396.944

С.Н. Кириллов, С.А. Балюк, С.Н. Кузнецов, А.С. Есенин

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ВОДНОЙ СРЕДЕ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Обоснована модель распространения оптического сигнала в водной среде, учитывающая поглощение и рассеяние. Предложенная модель позволяет рассчитывать мощность сигнала на входе оптического приёмника и вероятность ошибки при передаче информации. Проведено имитационное моделирование распространения оптического сигнала для разных типов вод. Показано, что возможно передавать видеoinформацию при скорости 10 Мбит/с в реальном масштабе времени на расстояние 64 м в чистой, 42 м в прибрежной и 19 м в океанической воде в местах сильной биологической активности с ошибкой, не превышающей 10^{-7} .

Ключевые слова: оптическая система связи, передача информации, подводная связь, поглощение, рассеяние.

Введение. В настоящее время осуществляется интенсивное изучение прибрежных шельфов, связанное с подводным мониторингом климатических, биологических, химических и экологических изменений в океанах, морях, озёрах и реках, а также с освоением подводных месторождений полезных ископаемых. Данные задачи решаются с помощью различных подводных роботизированных комплексов, которые требуют наличия надёжной и эффективной системы передачи информации [1].

Передаваемая информация представляет собой различные характеристики подводной среды и видеоданные с подводных камер. Кроме того, видеoinформация используется в интересах обеспечения ориентации и управления подводными роботизированными комплексами, что требует передачи данной информации в реальном масштабе времени [2]. Таким образом, возникает задача разработки высокоскоростной подводной системы передачи видеoinформации.

В настоящее время для осуществления передачи информации в водной среде используют проводные и беспроводные линии связи [1,2].

Проводные линии подводной связи существенно ограничивают диапазон действия и снижают мобильность подводных комплексов. Кроме того, использование таких линий становится

невозможным при увеличении числа обслуживаемых подводных аппаратов.

Беспроводные акустические линии связи основываются на передаче звуковых волн через водную среду. Однако данные линии связи обеспечивают низкую скорость передачи и помехоустойчивость из-за наличия большого количества акустических помех [3].

Использование электромагнитных волн позволяет существенно повысить скорость передачи информации. Кроме того, распространение электромагнитных волн не зависит от солёности, температуры и давления воды. При этом данный вид волн подвержен сильному затуханию в водной среде вследствие поглощения и рассеяния, что значительно ограничивает дальность связи.

Из анализа работ [1...4] известно, что наименьшее поглощение в водной среде испытывают электромагнитные волны оптического диапазона с длиной волны в пределах 200...900 нм. Беспроводные оптические линии связи позволяют получить высокую скорость передачи информации за счёт использования большой полосы частот, составляющей десятки ГГц [5,6].

Учитывая вышеизложенное, целесообразно использовать беспроводную оптическую систему передачи информации. Однако из-за взаимо-

действия оптического излучения с водной средой при распространении происходит значительное рассеяние и поглощение сигнала, которое достаточно трудно прогнозировать. Для правильного выбора характеристик элементов беспроводной оптической системы связи необходимо разработать модель распространения оптического сигнала в водной среде, которая позволит оценить влияние указанных мешающих факторов.

Цель работы. Разработка модели распространения оптического сигнала в водной среде, позволяющей путём имитационного моделирования определить требования к характеристикам беспроводной оптической системы передачи видеоинформации.

Модель распространения оптического сигнала в водной среде. Из [3,4] известно, что морская вода включает в себя три основные составляющие: чистую воду, растворённые вещества (неорганические и органические) и взвесь (минеральную и органическую). Однако механизм влияния указанных составляющих различен. Поэтому при обосновании модели распространения оптического сигнала предложено разделять содержащиеся в воде вещества по природе их влияния на данный сигнал.

Основными компонентами, учитывающими влияние среды распространения оптического сигнала, являются поглощение и рассеяние.

Способность воды и содержащихся в ней веществ поглощать электромагнитное излучение в широком диапазоне интенсивностей определяется законом Бугера [3,4]. Данный закон связывает передаваемую и принимаемую мощность оптического сигнала с помощью коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$, который зависит от длины волны распространяющегося сигнала λ и характеризует потери электромагнитной энергии в водной среде на нагревание, изменение химического состава вещества, ионизацию, переизлучение на другой длине волны и т.п.

В общем случае океаническая вода состоит из молекул воды, органических частиц, газов, вирусов, бактерий, фитопланктона и неорганических частиц [3,4]. Концентрация указанных веществ в зависимости от типа водной среды и времени меняется в достаточно широких пределах. Таким образом, в ряде случаев невозможно полностью учесть все составляющие показателя поглощения оптического сигнала в водной среде. Поэтому обычно [2,7] учитываются только основные компоненты, имеющие наибольшую концентрацию. С учётом вышеизложенного коэффициент поглощения будет иметь вид:

$$\alpha(\lambda) = \alpha_B(\lambda) + \alpha_X(\lambda) + \alpha_D(\lambda) + \alpha_G(\lambda), \quad (1)$$

где $\alpha_B(\lambda)$, $\alpha_X(\lambda)$, $\alpha_D(\lambda)$, $\alpha_G(\lambda)$ - коэффициенты поглощения чистой воды, а также поглощения хлорофиллом, детритом, гумусоподобными соединениями соответственно. При этом коэффициент поглощения зависит от длины волны оптического сигнала и состава водной среды. В [3,4] приводятся измеренные зависимости коэффициента поглощения для разных типов вод, по которым осуществляется выбор длины волны оптического сигнала, имеющего наименьшее поглощение. Для чистой воды минимум поглощения находится около 450 нм. При добавлении примесей минимум поглощения немного смещается в область более длинных волн, а его значение зависит от типа примесей и их концентрации.

Интенсивность и направление рассеяния зависят от размеров присутствующих в воде частиц. В связи с этим выделяют [2,3,7] рассеяние света частицами с размерами, соизмеримыми с λ (молекулярное рассеяние Релея), и рассеяние света частицами с размерами большими λ (рассеяние Ми). Рассеяние на атомах и молекулах описывается теорией Релея [1,3,7], которая позволяет полностью учесть рассеяние сигнала в чистой воде.

Рассеяние на частицах с размерами большими λ имеет ярко выраженную направленность, определяемую индикатрисой рассеяния [4,7]. Расчёт данного вида рассеяния проводится с использованием теории Ми, в которой учитываются относительные размеры частиц, их форма, расстояния между частицами, взаимные расположения частиц и показатели преломления. При этом используется допущение о том, что частицы являются сферическими и имеют одинаковые размеры. В результате полное рассеяние оценивается как сумма рассеяний, произведённых каждой частицей.

Большинство используемых моделей водных сред ограничиваются рассеянием чистой воды и рассеянием на частицах, при этом не учитывая другие возможные компоненты рассеяния [1,2,7]. С учётом этого общий коэффициент рассеяния водной среды можно представить в виде:

$$\beta(\lambda) = \beta_B(\lambda) + \beta_C(\lambda), \quad (2)$$

где $\beta_B(\lambda)$, $\beta_C(\lambda)$ - коэффициенты рассеяния оптического сигнала на молекулах чистой воды и частицах соответственно.

Учитывая вышеизложенное, коэффициент передачи водной среды определяется выражением [5]:

$$\tau_{CP}(\lambda) = \exp(-\varepsilon(\lambda)R), \quad (3)$$

где $\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda)$ - коэффициент ослабления света в водной среде, а R - расстояние между источником и приемником оптического сигнала.

При построении модели предполагается, что будет использована оптическая линия связи прямой видимости. При этом мощность сигнала на поверхности фотодетектора P_N описывается уравнением дальности действия системы связи [5]:

$$P_C = \frac{\pi^2 \tau_{ПРД} \tau_{СР} \tau_{ПРМ} d_{ПРД}^2 d_{ПРМ}^2 P_L}{32 R^2 \lambda^2}, \quad (4)$$

где P_L - мощность лазера; $\tau_{ПРД}$, $\tau_{СР}$, $\tau_{ПРМ}$ - коэффициенты передачи оптического передатчика, среды и оптического приёмника, учитывающие потери энергии в передатчике, среде распространения и приёмнике соответственно; $d_{ПРД}$, $d_{ПРМ}$ - диаметры апертуры передатчика и приёмника соответственно.

Уравнение (4) позволяет учесть потери за счёт естественного расхождения луча в среде распространения, ослабление сигнала при прохождении через водную среду, а также характеристики передатчика и приёмника оптической системы связи.

С учётом вышеизложенного физическая модель системы связи имеет вид (рисунок 1).



Рисунок 1 – Схема распространения оптического сигнала в водной среде

Особенности процесса рассеяния оптического сигнала в водной среде. Для вычисления коэффициента рассеяния оптического сигнала на частицах среды $\beta_{\chi}(\lambda)$, входящего в выражение (2), предложен следующий механизм.

Рассеяние света выражается в девиации

движущихся фотонов от прямой траектории в среде распространения. На рисунке 2 показано возможное относительное распределение интенсивности I передаваемого импульса во времени t с учётом рассеяния [7].

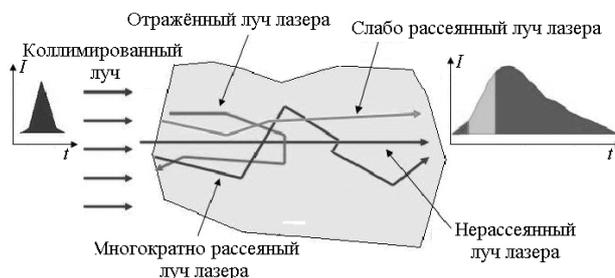


Рисунок 2 – Рассеяние лазерного излучения в водной среде

В работе [7] показано, что большее число фотонов оптического сигнала достигает приёмника посредством многократного рассеяния. Поэтому был предложен следующий механизм учёта процесса рассеяния, представленный на рисунке 3.

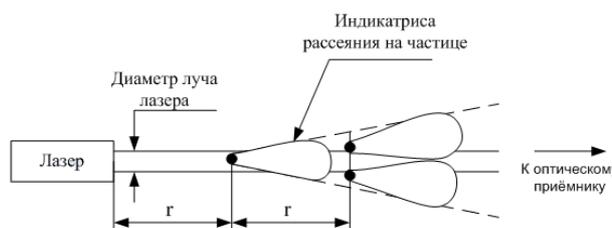


Рисунок 3 – Учёт рассеяния при моделировании

Фотоны света при распространении в водной среде встречаются с частицами вещества, на которых впоследствии происходит рассеяние. Среднее расстояние между частицами r может быть выбрано по данным, представленным в [3,4]. При этом рассеяние излучения описывается индикатрисой рассеяния, которая характеризует вероятность распространения фотонов по угловым направлениям. Учитывая индикатрисы рассеяния отдельных частиц, представленные для разных типов вод в [3,4], была получена общая индикатриса рассеяния среды $\sigma_{ОБЦ}(\theta, \lambda)$. Тогда коэффициент рассеяния на частицах водной среды $\beta(\lambda)$ может быть определён по формуле [3]:

$$\beta_{\chi}(\lambda) = 2\pi \int_0^{\pi} \sigma_{ОБЦ}(\theta, \lambda) \sin \theta d\theta, \quad (5)$$

где θ - угол направления рассеяния.

Таким образом, данный подход позволяет получить коэффициент рассеяния на частицах $\beta_{\chi}(\lambda)$, а также рассчитать распределение

интенсивности оптического сигнала I в плоскости приемника OX (рисунок 4).

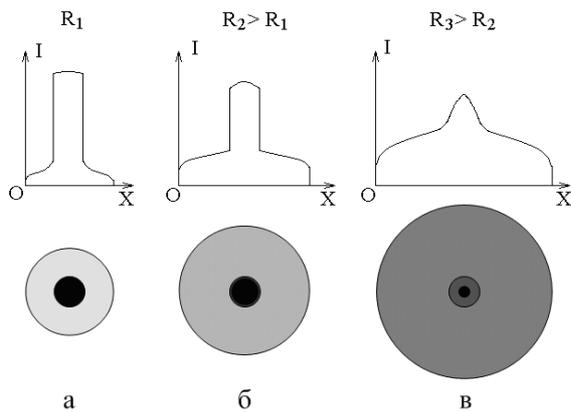


Рисунок 4 – Распределение интенсивности оптического излучения в плоскости приёмника в зависимости от расстояния

Распределение интенсивности излучения при распространении оптического сигнала поясняется на рисунке 4. На малом расстоянии от передатчика R_1 большая часть мощности оптического сигнала сосредоточена внутри лазерного луча (рисунок 4, а). При увеличении расстояния R_2 происходит уменьшение интенсивности внутри лазерного луча, обусловленное увеличением количества рассеяний, и увеличение интенсивности фона (рисунок 4, б). На большом расстоянии от передатчика R_3 интенсивность фона сильно возрастает и становится практически равной интенсивности лазерного луча (рисунок 4, в).

Представленное распределение интенсивности оптического излучения было учтено при моделировании и соответствует экспериментальным измерениям интенсивности оптического сигнала в плоскости приёмника, проведённым в [2,7].

Статистическая модель оптической системы связи. Структура обобщенной статистической модели оптической системы передачи информации представлена на рисунке 5.

В представленной модели предполагается, что источник информации генерирует последовательность дискретных символов, выбираемых из конечного ансамбля. Входные сигналы затем должны быть преобразованы в соответствующую последовательность с использованием комбинированных операций кодирования и модуляции для передачи по каналу. Мультипликативные возмущения, включающие ослабление и случайные фазовые задержки, искажают оптический сигнал при прохождении в канале [6]. На выходе канала в приёмном устройстве

сигналы выделяются на фоне шума и декодируются. Фоновое излучение, обусловленное солнечным светом и излучением других источников, является внешним шумом. Этот вид шумов комбинируется в детекторе с внутренним шумом, обусловленным случайными эмиссиями.



Рисунок 5 - Статистическая модель оптической системы передачи информации

В общем случае представленная модель математически описывается следующим образом:

$$Y(t, z) = X(t, z) \cdot \exp[-(\alpha(\lambda, z)) + \beta(\lambda, z) \cdot z] + n_\phi + n_c, \quad (6)$$

где $Y(t, z)$ - сигнал на входе приёмника; $X(t, z)$ - сигнал на выходе передатчика; $\alpha(\lambda, z)$ и $\beta(\lambda, z)$ - коэффициенты поглощения и рассеяния, учитывающие неоднородность среды распространения оптического сигнала вдоль оси z ; n_ϕ и n_c - аддитивные составляющие фоновых и собственных шумов приёмника соответственно; z - координата, изменяющаяся в направлении распространения лазерного луча.

Коэффициенты $\alpha(\lambda, z)$ и $\beta(\lambda, z)$ являются случайными, поскольку водная среда в направлении распространения луча является неоднородной, и имеют нормальное распределение, т.к. водная среда находится в постоянном движении.

Введение в модель аддитивной составляющей n_c обусловлено наличием внутренних шумов оптического приёмника, которые также являются случайными. Мощность внутренних шумов приёмника $P_{ш}$ определяется выражением [5,6]:

$$P_{ш} = kT_{ПРМ} \Delta F, \quad (7)$$

где k - постоянная Больцмана; $T_{ПРМ}$ - температура оптического приёмника; ΔF - полоса пропускания оптического приёмника.

Так как в воде происходит интенсивное поглощение электромагнитных волн практически во всём частотном диапазоне, то мощность шумов, создаваемая фоновым излучением, оказывается существенно меньше, чем мощность внутренних шумов приёмника (фотодетектора). Поэтому внешним шумом n_ϕ можно пренебречь, упростив тем самым модель оптической системы связи.

Элементы оптической системы передачи информации. К оборудованию оптической системы передачи информации, устанавливаемому на борту подводных мобильных роботизированных комплексов, предъявляется ряд специфических требований:

1) необходимо минимизировать массогабаритные показатели и энергопотребление;

2) требуется обеспечить работоспособность оптической линии связи в условиях наличия значительных ошибок визирования, вследствие невозможности обеспечения точного позиционирования в подвижной водной среде;

3) поскольку доступ к подводным роботизированным комплексам затруднен, оборудование связи должно быть работоспособным в течение длительного времени без технического обслуживания, а также иметь высокую степень надежности;

4) для передачи видеоданных в режиме реального времени необходимо поддерживать скорость передачи не ниже 10 Мбит/с при разрешении изображения 830x480 пикселей и частоте 25 кадров/с.

При проектировании оптической линии связи первоначально требуется осуществить выбор светового источника, поскольку конструкция передающей и приёмной частей системы связи определяется типом излучающего элемента. В настоящее время для построения подводных линий связи с мобильными роботизированными комплексами могут использоваться светодиоды и лазерные диоды [1,2,7].

Светодиоды излучают волны в узком спектральном диапазоне. Достоинствами светодиодов являются высокий КПД, стабильность, большой срок эксплуатации, надежность и низкая стоимость. Недостаток – переход в нелинейный режим при нагревании.

Лазерные диоды обеспечивают формирование когерентного излучения. Скорость переключения лазерных диодов значительно выше, чем светодиодов, что позволяет получить скорость

передачи информации до нескольких Гбит/с [5,6,8]. Недостатком лазерных диодов является высокая чувствительность к изменению температуры.

В настоящее время в подводных оптических линиях связи применяются следующие типы фотонных приемников [2,7]: фотодиод, лавинный фотодиод, фотоэлектронный умножитель.

Использование фотодиодов обеспечивает простоту реализации, но их чувствительность в сине-зеленой части спектра ограничена, что является недостатком, так как в этой области спектра оптический сигнал испытывает наименьшее ослабление [1,3,4,7]. Лавинные фотодиоды позволяют существенно повысить чувствительность при компактных размерах, однако обладают сильной зависимостью коэффициента усиления от температуры. Фотоэлектронный умножитель позволяет достичь компромисса между коэффициентом усиления и чувствительностью к изменению внешних условий. Таким образом, при имитационном моделировании распространения оптического сигнала в качестве источника излучения может быть использован лазерный диод с длиной волны излучения 450 нм и мощностью 80 мВт, а в качестве приёмника – фотоэлектронный умножитель с диаметром приёмной апертуры, равным 8 мм. Параметры передатчика и приёмника выбраны с учётом указанных выше требований после проведения анализа предлагаемых в настоящее время оптических устройств.

Экспериментальные исследования. По приведённым выше формулам (1)...(7) были проведены расчёты для разных типов вод, которые впоследствии использовались при моделировании. Значения для среднего коэффициента ослабления $\bar{\varepsilon}(\lambda)$ были получены в результате усреднения коэффициентов $\alpha(\lambda, z)$ и $\beta(\lambda, z)$ по дальности z .

В результате проведенного имитационного моделирования были получены зависимости нормированной мощности от расстояния между приёмником и передатчиком для разных типов вод (рисунок 6): 1 - чистая океаническая вода при среднем коэффициенте ослабления $\bar{\varepsilon}(\lambda) = 0,12$, 2 – прибрежная океаническая вода при $\bar{\varepsilon}(\lambda) = 0,3$, 3 – прибрежная морская вода при $\bar{\varepsilon}(\lambda) = 0,5$, 4 – вода в местах сильной биологической активности при $\bar{\varepsilon}(\lambda) = 2,19$.

Полученные зависимости (рисунок 6) использовались при расчёте вероятности ошибки при передаче оптического сигнала. Зависимости вероятности ошибки $P_{ОШ}$ от расстояния до

оптического приёмника, полученные в результате имитационного моделирования при передаче сигнала для разных значений скорости передачи и разных типов вод, представлены на рисунке 7 (здесь используются те же обозначения, что и на рисунке 6).

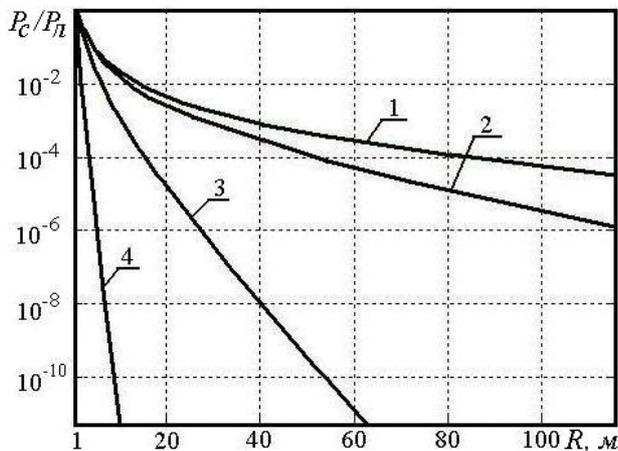


Рисунок 6 – Зависимость нормированной мощности на входе приёмника от расстояния

Сплошные линии на рисунке 7 соответствуют скорости передачи в 10 Мбит/с, пунктирные линии соответствуют скорости передачи в 100 Мбит/с.

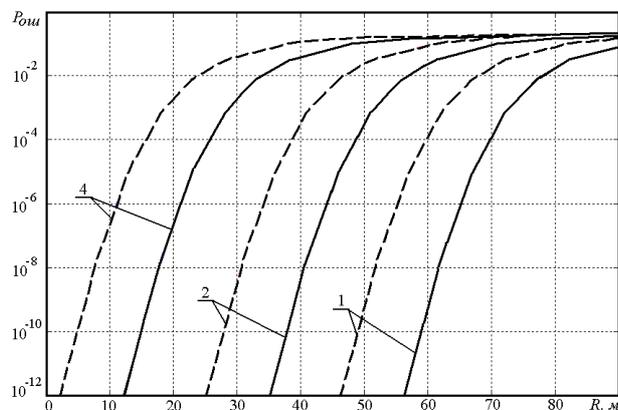


Рисунок 7 – Зависимость вероятности ошибки от расстояния до оптического приёмника

Разработанная модель согласуется с результатами исследований, проведённых в [1,2,7], по расчёту мощности на входе приёмника и вероятности ошибочного приёма символа.

Выводы. Таким образом, были проанализированы механизмы поглощения и рассеяния оптического излучения в водной среде. Исследованы особенности рассеяния оптического излучения и поглощения для различных типов вод. На основе проведенных исследований была разработана модель распространения оптичес-

кого излучения в водной среде, позволяющая производить оценку вероятности ошибки и рассчитывать мощность на входе приёмника в зависимости от расстояния между источником и приёмником для различных типов вод.

Проведено имитационное моделирование оптической системы передачи информации, в результате которого показано, что при передаче информации со скоростью 10 Мбит/с величина ошибки не превышает 10^{-7} на расстоянии до 64 м в чистой океанической воде, 42 м в прибрежной океанической воде и 19 м в океанической воде в местах сильной биологической активности.

При передаче информации со скоростью 100 Мбит/с величина ошибки не превышает 10^{-7} на расстоянии до 53 м в чистой океанической воде, 32 м в прибрежной океанической воде и 9 м в океанической воде в местах сильной биологической активности. Такие же дальности связи, как и при скорости передачи 10 Мбит/с, достигаются при вероятности появления ошибок 10^{-3} .

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» на 2007-2013 годы (ГК 07.514.11.4083).

Библиографический список

1. *Shlomi Arnon*. Underwater optical wireless communication network. Journal of optical engineering, january 2010. – 110 pp.
2. *Heather Brundage*. Designing a Wireless Underwater Optical Communication System. Master of Science in Mechanical Engineering at the Massachusetts Institute of Technology. 2010. – 87 pp.
3. *Доронин Ю.П.* Физика океана. – СПб.: Гидрометеоздат, 1978. – 296 с.
4. *Шифрин К.С.* Введение в оптику океана. – СПб.: Гидрометеоздат, 1983. – 281 с.
5. *Прамм В.* Лазерные системы связи. Пер. с англ. под ред. А.Г. Шереметьева. – М.: Связь, 1972. – 232 с.
6. *Кацман М.* Лазерная космическая связь. Пер. с англ. под ред. А.В. Ермишина – М.: Радио и связь, 1993. – 240 с.
7. *Gawdi Yash Jagdishlal*. Underwater free space optics. Master of Science in Mechanical Engineering at the North Carolina State University. 2006. – 130 pp.
8. *Hanson, Frank and Stojan Radic*. High bandwidth underwater optical communication. Optical Society of America, january 10, 2008, Applied Optics, Vol. 47. – 90 pp.

УДК 004.42 : 004.932

**Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, Ю.С. Коблов,
В.С. Муравьев, В.В. Стротов, А.Б. Фельдман**

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО ДАННЫМ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

Рассмотрен разработанный авторами программный комплекс «Навигация», реализующий алгоритмы определения географических координат и курса беспилотного летательного аппарата (БПЛА) по данным видеонаблюдения. Комплекс обеспечивает имитационное моделирование видеосъемки с борта БПЛА, подготовку полетных заданий и исходных данных для проведения экспериментальных исследований. Описаны структура и функциональные возможности программного комплекса, рассмотрены используемые алгоритмы анализа видеоизображений.

Ключевые слова: программный комплекс, анализ видеоизображений, навигация, беспилотный летательный аппарат.

Введение. Среди компонентов информационного обеспечения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) важное место занимает аппаратура навигации. Получившие распространение инерциальные и спутниковые навигационные системы не лишены недостатков, что заставляет искать альтернативные подходы к решению задач, связанных с определением местоположения и курса БПЛА. Такой альтернативой, широко обсуждаемой в последнее время [1-3], могут стать технологии машинного зрения.

Несмотря на серьезные успехи в области анализа изображений для задач навигации летательных аппаратов, существует ряд проблем, в значительной степени замедляющих прогресс в этой сфере. Особую трудность вызывают, во-первых, обеспечение заданной эффективности реализуемых подходов в широком диапазоне возможных условий наблюдения и, во-вторых, подготовка и проведение масштабных исследований с привлечением значительных по объемам экспериментальных видеоданных. К последним, как правило, относят данные бортовой видеосъемки с привязкой к географическим координатам, эталонные изображения соответствующих участков земной поверхности, необходимую контрольную информацию.

Преодолеть указанные затруднения помогают пакеты прикладных программ. С их помощью создают различные ландшафты и имитируют движение БПЛА. Следует отметить, что

используемые пакеты обычно не ориентированы на моделирование полетов, поэтому для получения сцен с нужными характеристиками необходимо привлекать специалистов по трехмерному моделированию. Вообще говоря, процедура получения видеосюжета и его увязка с эталонными данными требуют довольно много усилий, что мешает в полной мере сконцентрироваться на разработке подходов к анализу видеоизображений.

Таким образом, большую актуальность приобретает создание программных и инструментальных средств, позволяющих в сжатые сроки и без привлечения сторонних специалистов организовать деятельность по разработке методов и средств анализа изображений для навигации БПЛА, обеспечить возможность получения тестовых видеоданных и проведения экспериментальных исследований с объективной количественной оценкой эффективности реализуемых подходов.

Цель работы: создание программного комплекса, обеспечивающего имитацию видеосъемки с борта БПЛА, подготовку полетных заданий и количественную оценку эффективности применяемых подходов к анализу видеоданных. В статье рассматриваются структура и функциональные возможности разработанного авторами программного комплекса (ПК) «Навигация», предназначенного для автоматизации научных исследований в области создания перспективных систем навигации БПЛА по данным видео-

наблюдения; излагаются концепции, лежащие в основе математического обеспечения комплекса.

Структура программного комплекса. На разработку структурной концепции ПК «Навигация» повлиял ряд соображений, вытекающих из практического опыта.

Первое соображение касается реализуемых в ПК методов анализа видеоданных. Для определения местоположения и курса БПЛА необходимо сопоставить наблюдаемое изображение с полученными заранее эталонными снимками местности. Нередки ситуации, когда значительные области обрабатываемых изображений оказываются малоинформативными или подвергаются существенным искажениям при изменении условий наблюдения. По этим причинам в ПК «Навигация» использован подход, согласно которому на эталонных изображениях выделяется некоторое число характерных объектов местности – опорных участков (ОУ), которые в дальнейшем отыскиваются на текущих изображениях. Это позволяет, во-первых, существенно сократить вычислительные затраты и, во-вторых, снизить влияние грубых ошибок сопоставления изображений. В качестве ОУ лучше всего выбирать объекты искусственного происхождения, так как они менее всего подвержены сезонным изменениям.

Второе важное соображение, нашедшее отражение в структуре ПК «Навигация», связано с необходимостью реализации технологий формирования исходных данных и анализа изображений в виде, максимально приближенном к условиям практического применения в системах подготовки полетных заданий и на борту БПЛА. С этой точки зрения может быть значительно облегчен вопрос промышленного внедрения исследуемых подходов.

С учетом указанных соображений предложена следующая схема организации исследований:

- 1) подготовка эталонных снимков местности;
- 2) подготовка маршрутов полета;
- 3) разметка опорных участков на эталонных снимках;
- 4) имитация полета с оценкой местоположения и курса БПЛА;
- 5) статистическая обработка результатов полетов, количественная оценка работоспособности алгоритмов анализа изображений и навигации БПЛА;
- 6) анализ статистических данных, модернизация алгоритмов анализа изображений и навигации БПЛА.

Перечисленные действия могут выполняться параллельно, что дает возможность эффективно

организовать работу исследовательской группы.

Для реализации описанной схемы исследований ПК «Навигация» организован в виде набора специализированных программных модулей, интегрированной базы данных (БД) и ряда файловых хранилищ. Структура ПК представлена на рисунке 1. Показанные на рисунке таблицы являются частью базы данных, внутренние связи которой здесь для простоты опущены. Вместо этого модель БД показана на рисунке 2. Необходимые пояснения относительно полей таблиц и способов представления данных приведены в последующем изложении.

Создание эталонных изображений, имитирующих аэрофотосъемку или спутниковую фотосъемку местности, а также формирование данных текущей видеосъемки с борта БПЛА в ПК «Навигация» выполняется посредством авиасимулятора с открытым исходным кодом FlightGear [4]. Программный интерфейс симулятора позволяет задавать поле зрения виртуальной видеокамеры и устанавливать ее в любое требуемое положение, определяемое географическими координатами, высотой и углами ориентации.

В целях более эффективного использования доступных вычислительных ресурсов целесообразно иметь возможность запуска авиасимулятора на машине, отличной от той, где выполняются навигационные расчеты. В связи с этим к проекту FlightGear добавлены файлы исходного кода, реализующие специализированный сетевой сервис – сервер FlightGear Connector. Сервер принимает команды управления авиасимулятором и осуществляет передачу формируемых им изображений и вспомогательной информации по сети Ethernet. На обрабатывающей стороне взаимодействие с сервером осуществляется посредством клиентского интерфейса FlightGear Connector API, реализуемого программной библиотекой FlightGear Connector.

Автоматизацию процесса получения и параметризации эталонных снимков местности обеспечивает программный модуль «Управление снимками местности», снабженный графическим пользовательским интерфейсом. Модуль позволяет считать из авиасимулятора изображение интересующего участка Земли или загрузить натуральный снимок. Каждый снимок в ПК «Навигация» описывается набором атрибутов, ассоциированных со столбцами таблицы «Снимки местности» БД (см. рисунок 2).

Центр снимка привязан к географической системе координат. Ориентация показывает отклонение вертикальной оси снимка от направления на север. Метрические характеристики –

длина и ширина, измеряемые в метрах, позволяют определить разрешение на местности. В БД фиксируются время формирования снимка и сезон года (естественные для натурального снимка и отсчитываемые по внутренним часам симулятора – для синтезированного). Это дает возможность выбирать для конкретного полета

наиболее подходящий снимок в зависимости от сезона года и времени суток. В целях уменьшения объема передаваемых данных размещение изображений выполняется на локальном или сетевом жестком диске. В таблице «Снимки местности» хранятся ссылки на местоположение файлов.

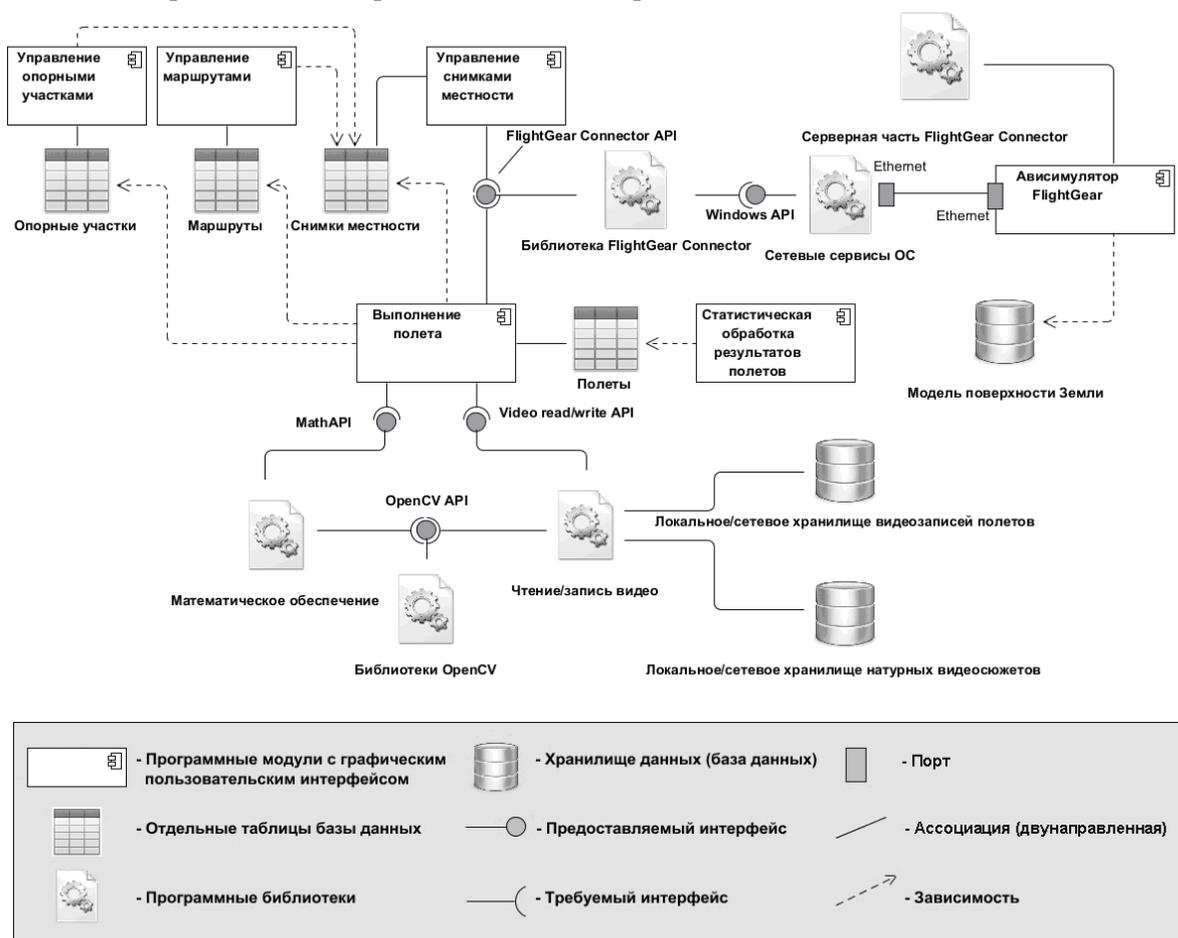


Рисунок 1 – Структура ПК «Навигация»

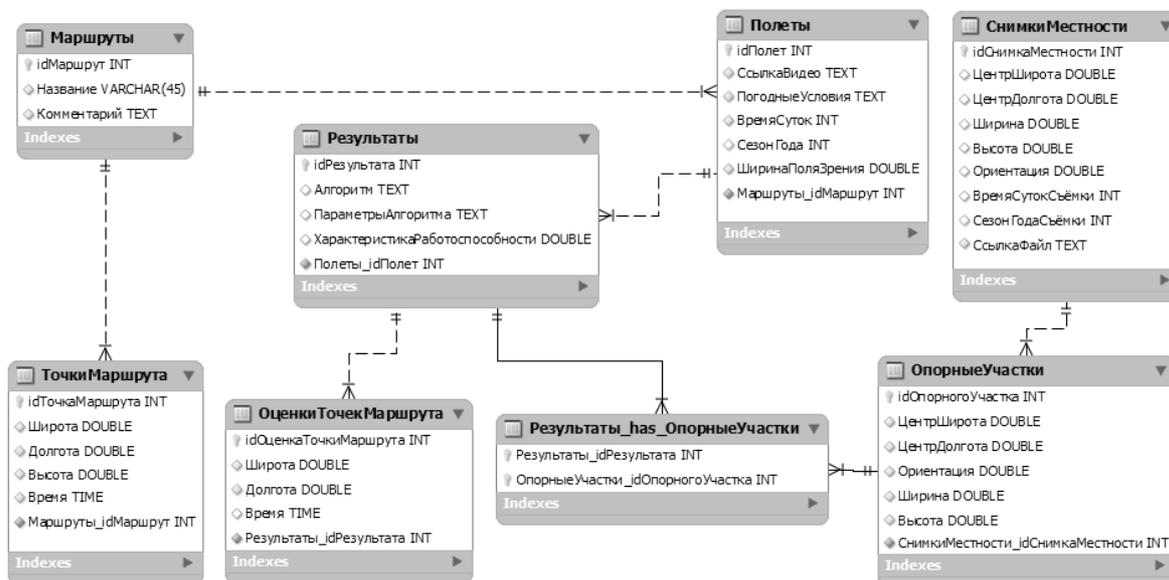


Рисунок 2 – Модель базы данных ПК «Навигация»

На каждом снимке могут быть заданы опорные участки – характерные объекты или регионы наблюдаемой местности. Для облегчения работы с ними в ПК «Навигация» реализован модуль «Управление опорными участками» (см. рисунок 1), взаимодействующий с таблицей «Опорные участки» БД (рисунок 2). Перечень параметров опорного участка включает координаты, ориентацию и размеры изображения ОУ на местности.

Для задания и последующей корректировки маршрутов полета используется программный модуль «Управление маршрутами». Маршрут определяется как последовательность ключевых точек, имеет имя и ему может быть сопоставлен текстовый комментарий. Каждая ключевая точка маршрута задается географическими координатами и высотой над уровнем моря. Для каждой точки указывается отсчитываемый от начала полета момент времени, соответствующий прохождению аппаратом данной точки. Положение БПЛА между ключевыми точками определяется с помощью одного из нескольких возможных методов интерполяции. Маршруты хранятся в таблице «Маршруты», а ключевые точки в таблице «Точки маршрута» (рисунок 2). Связь между ними устанавливается указанием принадлежности ключевой точки к тому или иному маршруту. Для удобства ввода маршрута пользователь может загрузить подходящий снимок из БД и отобразить содержащиеся на нем опорные участки. Аналогично во время работы с модулем «Управление опорными участками» имеется возможность вывести на экран маршруты, пролегающие над участком поверхности, охватываемым текущим снимком.

Дополнительную возможность по созданию маршрутов предоставляет авиасимулятор FlightGear. Пользователь с его помощью осуществляет полет, используя при этом физическую модель летательного аппарата. Полученная таким образом траектория сохраняется в специализированном файле, который затем считывается в модуле «Управление маршрутами». Синтезированный маршрут в дальнейшем может многократно использоваться для имитации полетов с различными параметрами окружающей среды. Данная технология позволяет отлаживать алгоритмы навигации с учетом физических особенностей полета БПЛА.

Обработка изображений и визуализация полета осуществляются модулем «Выполнение полета». Пользователь выбирает маршрут полета из таблицы «Маршруты», устанавливает параметры моделирования видеоданных или указывает натурный видеосюжет, задает параметры

алгоритмов анализа изображений и позиционирования БПЛА. Программа загружает из БД подходящие снимки местности и находит на них опорные участки, пролегающие вблизи выбранного маршрута полета. В процессе полета с целью получения очередного видеокadra наблюдения местности выполняется обращение к авиасимулятору или чтение видеофайла с локального или сетевого хранилища. Анализ видеоданных с расчетом навигационных параметров осуществляют функции, помещенные в библиотеку математического обеспечения. Последняя, в свою очередь, использует некоторые типы данных и функции обработки изображений из популярной библиотеки с открытым исходным кодом OpenCV [5]. Пользователю предоставляется визуальная информация о ходе полета: наблюдаемое изображение и локализованные опорные участки, истинная и рассчитываемая траектории, параметры алгоритмов и контрольные данные. Видеозапись полета сохраняется в специализированном хранилище.

Данные полета и оценка работоспособности алгоритмов заносятся в таблицу «Полеты» и ассоциированную с ней таблицу «Оценки точек маршрута». Эта информация позволяет предварительно судить об эффективности реализуемых подходов. Детализированный анализ результатов можно получить, если воспользоваться программным модулем «Статистическая обработка результатов полетов», который позволяет создавать ручную коллекции полетов или группировать их автоматически по задаваемому пользователем критерию. Например, можно объединить полеты, в ходе которых обработка видеоданных осуществлялась с помощью заданного алгоритма. Для каждой коллекции по требованию пользователя выполняется оценка статистических показателей, таких как дисперсия оценки координат, максимальное и минимальное отклонения от истинной траектории и пр. В дальнейшем полученная статистика может использоваться для сравнения различных подходов к решению задачи навигации БПЛА.

Алгоритмы анализа видеоизображений в ПК «Навигация». Математическое обеспечение комплекса реализует некоторые подходы к распознаванию и прослеживанию опорных участков местности в данных текущей видеосъемки, позволяет определять географическое местоположение и курс БПЛА. Целесообразно рассмотреть более подробно используемые алгоритмы анализа видеоданных.

Основную сложность представляют распознавание и локализация ОУ на ТИ. В рамках решения подобных задач непосредственное срав-

нение интенсивностей изображения ОУ и ТИ не обеспечивает должной инвариантности к изменению условий наблюдения и сопряжено со значительными вычислительными затратами. В ПК «Навигация» использован подход, основанный на выделении, инвариантном описании и сопоставлении особых точек изображений. Для этого применяются специализированные алгоритмы, реализация которых выполнена на базе программной библиотеки для обработки изображений OpenCV. В настоящее время в комплексе используются уже реализованные в OpenCV подходы (SIFT [6], SURF [7], ORB [8]), однако в дальнейшем они будут дополнены алгоритмами собственной разработки. Совместимость разрабатываемых алгоритмов обеспечивается применением программных интерфейсов библиотеки.

Для представления особых точек внутри программы используется структура, включающая следующие поля:

- координаты точки на изображении;
- размер анализируемой окрестности;
- «ориентация» (этот параметр обычно связывают с направлением наиболее интенсивного изменения яркости в окрестности рассматриваемой точки);
- величина отклика (позволяет сравнивать особые точки между собой и определять, какая из них «лучше» выражена);
- номер октавы на гауссовой пирамиде (масштаб, на котором выделена данная точка);
- идентификатор объекта (поле, с помощью которого можно установить связь между особыми точками и объектами в процессе распознавания).

Детектор особых точек обеспечивает стабильное выделение заданной точки на изображении одной и той же сцены при изменении условий наблюдения. К таким изменениям можно отнести, в частности, геометрические преобразования: сдвиг, поворот, изменение масштаба. Результаты выделения слабо зависят от изменения общего уровня и малочувствительны по отношению к аддитивному шуму, имеющему место на ТИ.

Дескриптор особой точки представляет собой описатель, который мало изменяется под действием возможных искажений. В самом общем смысле дескриптор можно рассматривать как инвариантный вектор параметров особой точки. В ПК «Навигация» применяются различные методы вычисления дескрипторов, в частности достаточно эффективный способ описания особых точек, предложенный в работе [6]. Для каждой точки с учетом «ориентации» и номера

октавы составляется специальная гистограмма направлений. С этой целью на соответствующем уровне гауссовой пирамиды формируется окно заданного размера, повернутое согласно «ориентации» рассматриваемой точки и охватывающее ближайшую ее окрестность. Полученное окно разбивается на некоторое определяемое параметрами алгоритма число окон меньшего размера – регионов. Внутри регионов для каждого пикселя вычисляются величина и направление градиента изображения на данном уровне пирамиды. Модули градиентов дополнительно умножаются на коэффициент, зависящий от расстояния до рассматриваемой особой точки, после чего суммируются их проекции на каждое из заданного числа направлений, равномерно покрывающих промежуток от 0 до 360°. Это позволяет получить гистограмму направлений внутри региона. Такие гистограммы, представленные в виде вектора, составляют дескриптор особой точки, который, если не учитывать эффекты дискретизации, практически не изменяется при сдвигах, поворотах и масштабировании изображения. Дополнительные элементы дескриптора – номер октавы и «ориентация» особой точки.

При распознавании предполагается, что на ТИ присутствует несколько ОУ из заранее сформированного списка. Каждый ОУ задается множеством особых точек и их дескрипторов, которые, таким образом, образуют эталонную базу особых точек. Каждая особая точка ТИ сравнивается с точками эталонной базы, в результате чего можно установить ее принадлежность одному из ОУ.

Сравнение особых точек производится путем вычисления L_2 -нормы расстояния между их дескрипторами. Точки разных изображений с близкими значениями дескрипторов образуют пару соответствия. Учитывая, что на одном изображении могут быть выделены несколько десятков, а часто и несколько сотен особых точек, установление подобного соответствия становится непростой задачей. Для её решения в ПК «Навигация» реализованы методы поиска на многомерных деревьях [9, 10]. Данный подход широко применяется в теории распознавания образов и анализе изображений.

После установления соответствий между точками для каждого опорного участка по полученным парам выполняется оценка параметров аффинного преобразования. Эта задача решается методом робастного оценивания RANSAC [11]. Метод выполняет оценку параметров модели, определяя одновременно, какие из исходных данных ей соответствуют, а какие являются «выбросами». Это позволяет находить пара-

метры преобразования с достаточной точностью, даже когда значительное число особых точек было неверно сопоставлено между собой.

Найденные методом RANSAC оценки включают коэффициент изменения масштаба, угол поворота и вектор сдвига между ОУ, представленными на эталонном снимке и на ТИ. На

рисунке 3 приведены эталонное изображение опорного участка (справа) и текущее изображение с локализованным ОУ (слева). Линии показывают пары соответствующих точек. Как видно из рисунка, особые точки сопоставлены корректно, несмотря на наличие геометрических преобразований между изображениями.

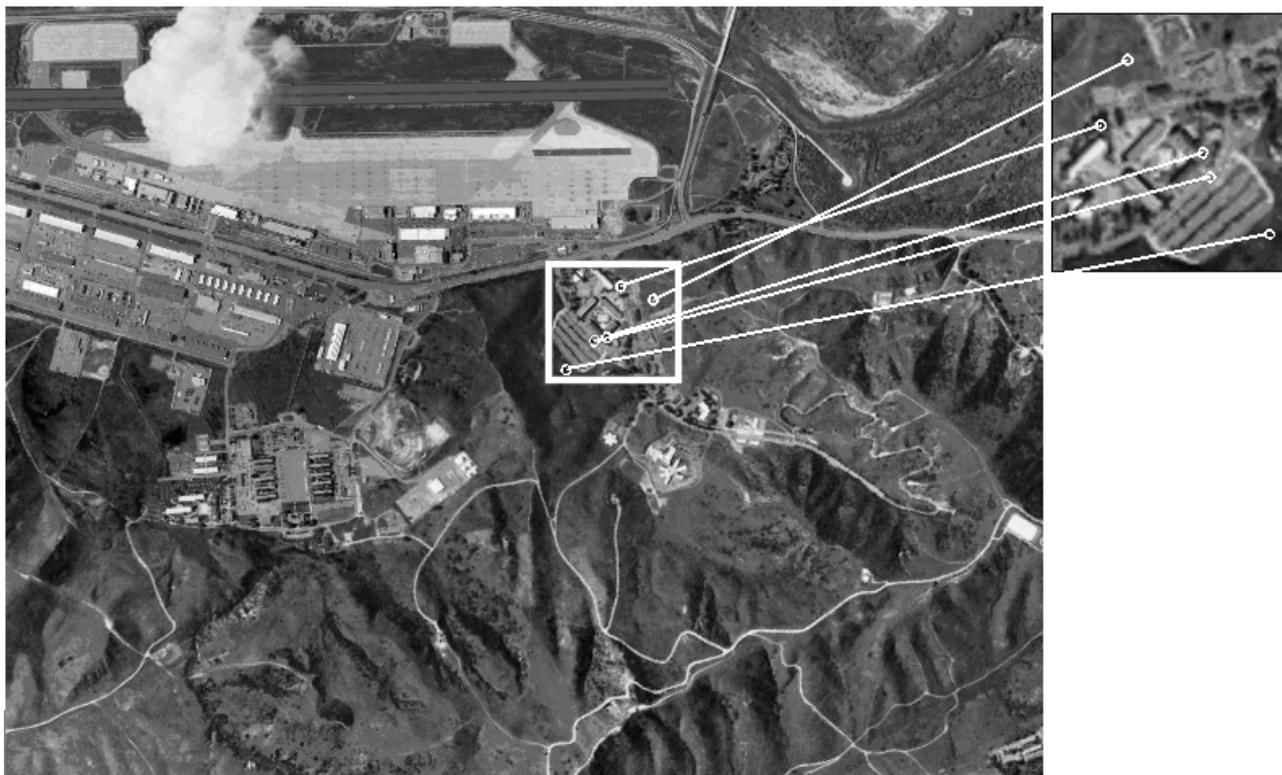


Рисунок 3 – Пример локализации опорного участка: слева – текущее изображение, справа – эталонное изображение; прямые линии показывают пары соответствующих точек

Так как известны истинное (географическое) положение и ориентация опорных участков, то, обладая информацией об их координатах в текущем кадре и учитывая, что ведется съемка надира, нетрудно найти географические координаты видеодатчика БПЛА и его ориентацию в горизонтальной плоскости.

С целью уточнения производимых расчетов выполняется прослеживание опорных участков в последовательности поступающих изображений. Для этого используется фильтр Калмана. Фильтрации в данном случае подвергаются координаты опорных участков. Предполагается, что ошибки измерения по отдельным координатам некоррелированы, а движение БПЛА на коротком интервале наблюдения является равномерным и прямолинейным.

Выводы. В статье представлено описание структуры и возможностей программного комплекса «Навигация». С его помощью решается ряд важных научно-практических задач, среди которых моделирование видеосъемки с борта БПЛА, отладка и исследование алгоритмов нави-

гации БПЛА по данным видеонаблюдения. Преимущество использования ПК «Навигация» по отношению к традиционным подходам состоит в следующем. Во-первых, ПК предоставляет существенно большую наглядность при формировании полетных заданий и иных исходных данных, не требуя при этом от пользователя навыков трехмерного моделирования. Во-вторых, ПК автоматически обеспечивает согласование данных, причем использование натуральных и синтезированных изображений или видеосюжетов осуществляется по единой схеме. Важно отметить, что ПК «Навигация» позволяет разбить процедуру подготовки экспериментов и непосредственно проведение исследований на ряд этапов, каждый из которых может выполняться параллельно с остальными. Это дает возможность эффективно организовать работу исследовательской группы.

ПК «Навигация» ориентирован на использование технологии определения положения и курса БПЛА, естественным образом вытекающей из практического опыта. Она заключается в

локализации на текущем изображении отмеченных заранее опорных участков – характерных объектов местности, относительно которых можно в дальнейшем определить положение и ориентацию бортового видеодатчика. Для обнаружения, локализации и прослеживания опорных участков в наблюдаемой последовательности кадров применяются известные алгоритмы, основанные на поиске, инвариантном описании и сопоставлении особых точек изображений. Существует возможность реализации собственных алгоритмов того же класса.

Таким образом, ПК «Навигация» представляет собой достаточно эффективный инструмент для автоматизации научных исследований в области создания перспективных систем навигации БПЛА по данным видеонаблюдения. Реализованные в ПК алгоритмы и технология подготовки полетных заданий могут использоваться в бортовой аппаратуре БПЛА и системах обеспечения полетов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 16.120.11.300–МК).

Библиографический список

1. A Vision-Based Guidance System for UAV Navigation and Safe Landing using Natural Landmarks / Cesetti A., Frontoni E. and others // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2010. – №57. – P. 233–257.
2. Use of Geo-referenced Images with Unmanned Aerial Systems / Conte C., Rudol P. and others // Workshop Proceedings of Intl. Conf. on Simulation,

Modeling and Programming for Autonomous Robots. – Venice (Italy), 2008. – P. 444-454.

3. Семёнов А.Е., Крюков Е.В., Рыкованов Д.П., Семёнов Д.А. Практическое применение технологий машинного зрения в решении задач распознавания, восстановления 3D, шивки карт, точного целеуказания, счисления пути и навигации // Известия ЮФУ. Технические науки. №2. – 2010. – С. 92-102.

4. Официальный сайт проекта FlightGear (англ.). – URL: <http://www.flightgear.org>

5. Официальный сайт проекта OpenCV (Open Source Computer Vision, англ.). – URL: <http://opencv.willowgarage.com/wiki>

6. Lowe D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // International Journal of Computer Vision. – 2004. – №2 (60). – P. 91-110.

7. SURF: Speeded Up Robust Features / Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. // Proceedings of 9th European Conference on Computer Vision (ECCV), Graz (Austria), 2006. – Part I. – PP.404-417.

8. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF / Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. // Proceedings of 13th International Conference on Computer Vision, Barcelona, 2011.

9. Friedman et al. An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time // ACM Trans. On Mathematical Software, 1977. – №3. – P. 209–226.

10. Muja M., Lowe D. Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration // Proceedings in International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 2009.

11. Fischler M.A., Bolles R.C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // Communication of the ACM, 1981. – Vol.24 (№6). – P. 381–395.

УДК. 621.391.037.372

А.Д. Токарь

СТАБИЛИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ БЫСТРОИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ВОЗМУЩЕНИЙ

Синтезирован алгоритм полета объекта управления (ОУ) класса «поверхность - поверхность» на основе комбинированного критерия качества, обеспечивающий его наведение по заданной траектории полета в условиях действия таких мешающих факторов, как порывы ветра, наличие неконтрастных изображений участков местности. Показано, что при воздействии этих мешающих факторов ошибки управления уменьшаются в среднем на 10...20 % по сравнению с известным алгоритмом автономного управления.

Ключевые слова: алгоритм автономного управления, комбинированный критерий качества, траектория полета, мешающие факторы, весовые коэффициенты, поперечное ускорение.

Введение. Основной задачей автономных систем тракторного управления является удержание центра массы ОУ на рассчитанной траектории [1]. Однако следует отметить, что в процессе управления на ОУ действует ряд случайных факторов и обстоятельств, которые заранее учесть невозможно. К таким факторам относятся: наличие неконтрастных изображений участков местности, воздействие на ОУ ветра, неоднородность атмосферы и т.п. В результате процесс сближения ОУ с заданной траекторией полета носит колебательный характер, что увеличивает время наведения и расход топлива. При этом первая производная от ошибки управления может принимать достаточно большие значения. Как следствие, возрастают перегрузки ОУ, снижается точность наведения в расчетную точку и увеличивается расход топлива.

Цель работы – синтез алгоритма наведения ОУ на основе функционала качества, включающего взвешенную сумму минимума квадрата сигнала ошибки и минимума квадрата производной сигнала ошибки, обеспечивающего стабилизацию траектории полета в условиях воздействия мешающих факторов.

Теоретические исследования. Синтез алгоритма полета ОУ будет выполняться при условии, что соблюдаются следующие допущения:

- все фазовые координаты в ОУ измеряются идеально;
- каналы управления наводимого ОУ не влияют друг на друга;
- не учитывается инерционность ОУ (ОУ рассматривается как материальная точка).

Траектории полета ОУ в вертикальной плоскости представлены на рисунке 1, где:

\vec{V}'_p, \vec{V}_p – векторы скорости ОУ при наличии и отсутствии мешающих факторов; \vec{V}_{p1} – тангенциальная составляющая скорости; \vec{V}_{p2} – нормальная составляющая скорости; φ – угол визирования ОУ между вектором скорости и горизонтом при отсутствии мешающих факторов; θ_p – угол визирования ОУ при наличии мешающих факторов; D/D_0 – относительная дальность до ОУ с момента начала полета; H/H_0 – относительная высота полета ОУ; D_0, H_0 – максимальная дальность и высота полета ОУ; 1 – траектория ОУ без мешающих факторов; 2 – траектория ОУ при наличии случайных мешающих факторов.

На рисунке 1 величина \vec{V}_{p2} характеризует

изменение расстояния по направлению в единицу времени, а величина \vec{V}_{p1} – изменение дальности с момента начала полета, также в единицу времени.

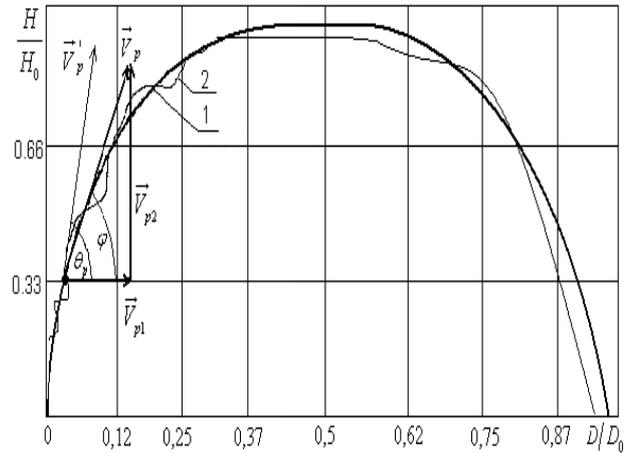


Рисунок 1 – Траектория полета ОУ в вертикальной плоскости

На основании рисунка 1 перемещение ОУ в вертикальной плоскости описывается уравнениями:

$$\begin{cases} V_{p1} = \dot{D} = V_p \cos \varphi, \\ V_{p2} = \dot{H} = V_p \sin \varphi. \end{cases} \quad (1)$$

Переходя к полярным координатам, можно записать нормальную составляющую скорости для случаев, когда мешающие факторы есть и при их отсутствии:

$$\begin{cases} \dot{\varphi} D = -V_p \sin \varphi, \\ \dot{\theta}_p D = -V'_p \sin \theta_p. \end{cases} \quad (2)$$

Вычитая из второго уравнения системы (2) первое и дифференцируя обе части полученного выражения, получаем следующий результат:

$$\dot{D}(\dot{\theta}_p - \dot{\varphi}) + D(\ddot{\theta}_p - \ddot{\varphi}) = -V_p \dot{\varphi} \cos \varphi + V'_p \dot{\theta}_p \cos \theta_p. \quad (3)$$

Выражение (3) можно преобразовать к виду:

$$\ddot{\delta} = a \cdot \dot{\delta} + b \cdot U, \quad (4)$$

где $a = -\dot{D}/D$; $b = 1/D$; $\ddot{\delta} = \ddot{\theta}_p - \ddot{\varphi}$;

$$\dot{\delta} = \dot{\theta}_p - \dot{\varphi}; \quad U = J_p - J_{pm}; \quad J_{pm} = V_p \dot{\varphi} \cos \varphi;$$

$J_p = V'_p \dot{\theta}_p \cos \theta_p$ – требуемое и текущее значения нормального ускорения ОУ; $\dot{\varphi}, \dot{\theta}_p$ – значения скорости изменения угла визирования ОУ при отсутствии и с учетом мешающих факторов; $\delta, \dot{\delta}$ – сигналы ошибки и производной ошибки наведения ОУ, V'_p – скорость ОУ при воздействии мешающих факторов.

С учетом всех этих допущений задачу

синтеза алгоритма наведения (ОУ) класса «поверхность - поверхность» сформулируем следующим образом. Для ОУ, перемещение которого определяется типовым кинематическим уравнением (4), необходимо определить оптимальное управление \tilde{U} , переводящее ОУ из начального состояния $\varphi(0)$ в конечное $\varphi(t_k)$ и доставляющее минимум функционалу качества [2]:

$$J(\theta_p, \dot{\theta}_p, t) = \int_0^T F(\theta_p, \dot{\theta}_p, t) \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $F(\theta_p, \dot{\theta}_p, t) = \alpha\delta^2 + (1-\alpha)\dot{\delta}^2 + \beta U^2(t)$; α, β – некоторые положительные весовые коэффициенты.

В теории оптимального управления сформулирована задача оптимальной стабилизации полета ОУ с фиксированным левым концом $\varphi(0) = \varphi_0$, фиксированным правым концом $\varphi(t_k) = 0$ и фиксированным временем процесса t_k , где t_k – время вывода ОУ на прямолинейную траекторию. Введя фазовые переменные $x_1 = \theta_p - \varphi$, $x_2 = \dot{\theta}_p - \dot{\varphi}$, получим стандартную форму записи уравнений перемещения ОУ:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = ax_2 + bU. \end{cases} \quad (6)$$

В данной постановке задачу определения оптимального управления можно решить с помощью метода динамического программирования Беллмана [2, 3], при этом функция Беллмана зависит только от состояния x . Уравнение Беллмана имеет вид:

$$\min_U [\alpha x_1^2 + (1-\alpha)x_2^2 + \beta U^2 + K_1 x_2 + K_2 E] = 0, \quad (7)$$

где $K_1 = \partial\mu/\partial x_1$, $K_2 = \partial\mu/\partial x_2$, $E = (ax_2 + bU)$, $\mu(x)$ – функция Беллмана. Поскольку на функцию управления U нет ограничений, то для определения значения \tilde{U} , при котором достигается указанный минимум, приравняем к нулю производную по U выражения в скобках (7). В результате получим:

$$\tilde{U} = -(b \cdot K_2) / (2 \cdot \beta). \quad (8)$$

Подставив функцию (8) в уравнение (7), получим нелинейное уравнение в частных производных первого порядка:

$$\alpha x_1^2 + (1-\alpha)x_2^2 + x_2 K_1 + ax_2 K_2 - (b^2 K_2^2) / 4\beta = 0. \quad (9)$$

Представим функцию Беллмана в виде квадратичной формы [4]:

$$\mu(x_1, x_2) = Ax_1^2 + 2Bx_1x_2 + Cx_2^2, \quad (10)$$

где A, B, C – неизвестные коэффициенты. Подставим (10) в дифференциальное уравнение (9) и, так как переменные x_1 и x_2 независимы, приравняем к нулю коэффициенты при различных произведениях переменных. Решение системы трех уравнений с тремя неизвестными A, B, C получим в виде следующих выражений:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{b} \sqrt{a^2 \alpha \beta + b^2 \alpha (1-\alpha) + 2b\alpha \sqrt{\alpha \beta}}, B = \sqrt{\alpha \beta} / b, \\ C &= \left[a\beta + \sqrt{a^2 \beta^2 + b^2 \beta \alpha + 2b\beta \sqrt{\alpha \beta}} \right] / b^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Вычислим частные производные K_1 и K_2 :

$$K_1 = 2Bx_1 + 2Cx_2; K_2 = 2Ax_1 + 2Bx_2. \quad (12)$$

Подставляя в дифференциальное уравнение (9) значения (11), (12), получаем выражение для оптимального управления:

$$\tilde{U} = -\sqrt{\alpha/\beta} \cdot x_1 - \left(a/b + \sqrt{a^2 + \gamma_1 + \gamma_2} / b \right) \cdot x_2, \quad (13)$$

где $\gamma_1 = b^2(1-\alpha)/\beta$; $\gamma_2 = 2b\sqrt{\alpha/\beta}$.

Угол визирования ОУ φ в системах автономного управления рассчитывается заранее и хранится в запоминающем устройстве бортового вычислительного комплекса ЛА.

Определение угла визирования ОУ φ на начальном участке полета также является вариационной задачей, где в качестве критерия оптимальности рассматривается максимизация скорости ОУ в конце участка выведения на прямолинейную траекторию. Для решения данной задачи представим движение ОУ в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{V}_{p1} = J_p \cos \varphi, \dot{V}_{p2} = J_p \sin \varphi, \\ \dot{D} = V_{p1}, \dot{H} = V_{p2}. \end{cases} \quad (14)$$

Решение данной задачи в теории оптимального управления [5] сводится к составлению гамильтониана системы:

$$H = \lambda_{V_{p1}} \dot{V}_{p1} + \lambda_{V_{p2}} \dot{V}_{p2} + \lambda_D V_{p1} + \lambda_H V_{p2} \quad (15)$$

и определению условия оптимальности:

$$\frac{\partial H}{\partial \varphi} = -\lambda_{V_{p1}} \sin \varphi + \lambda_{V_{p2}} \cos \varphi = 0. \quad (16)$$

При решении дифференциального уравнения (16) с учетом (14), (15) оптимальное управление направлением ускорения ОУ $J_p(t)$ примет вид:

$$\operatorname{tg} \varphi(t) = \operatorname{tg} \varphi_0 (1 - 2t/t_k), \quad (17)$$

где φ_0 – начальный угол ускорения ОУ $J_p(t)$. Соответственно выражение для $\varphi(t)$ определяется:

$$\varphi(t) = \text{arctg} \left[\varphi_0 \left(1 - 2t/t_k \right) \right]. \quad (18)$$

Для получения уравнения оптимального управления (13) необходимо знать не только выражение, определяющее $\varphi(t)$, но и выражение для $\dot{\varphi}(t)$. С этой целью продифференцируем выражение (18) по времени:

$$\dot{\varphi}(t) = -2\varphi_0 / \left[t_k \left(t + \varphi_0 \left(1 - 2t/t_k \right) \right) \right]. \quad (19)$$

В соответствии с (13) для уменьшения влияния мешающих факторов в состав бортового измерительного комплекса автономного управления ОУ должны быть включены устройства оптимального оценивания параметров \hat{D} , $\hat{\dot{D}}$, $\hat{\theta}_\delta$, $\hat{\dot{\theta}}_\delta$, $\hat{\varphi}$, $\hat{\dot{\varphi}}$. При этом значения оценок $\hat{\varphi}$, $\hat{\dot{\varphi}}$ должны храниться в запоминающем устройстве бортовой информационно – вычислительной системы ОУ.

Значения \hat{D} , $\hat{\dot{D}}$ можно получить в бортовом измерительном комплексе, обрабатывая сигналы, отраженные от характерных участков местности (опорных радиориентиров). Оценки $\hat{\theta}_\delta$, $\hat{\dot{\theta}}_\delta$ достаточно просто формируются по выходным сигналам датчиков, сориентированных по соответствующим осям ОУ.

Для адаптации параметров в зависимости от оценок \hat{D} , $\hat{\dot{D}}$, $\hat{\theta}_\delta$, $\hat{\dot{\theta}}_\delta$, $\hat{\varphi}$, $\hat{\dot{\varphi}}$ необходимо в контур управления ввести устройство формирования и хранения значений α, β . В зависимости от значений оценок \hat{D} , $\hat{\dot{D}}$, $\hat{\theta}_\delta$, $\hat{\dot{\theta}}_\delta$, $\hat{\varphi}$, $\hat{\dot{\varphi}}$ из данного устройства будут выбираться конкретные значения α, β .

Экспериментальные исследования. Проверка эффективности полученного алгоритма автономного управления ЛА осуществлялась с помощью имитационного моделирования, которое было направлено на выявление особенностей функционирования в условиях действия мешающих факторов. Для проведения анализа использовалась идеальная траектория (ИТ) наведения ОУ, определяемая выражением (18). Реальная траектория представлялась в виде суммы ИТ и помехи. В качестве модели мешающего фактора возьмем зависимость скорости ветра V_g от высоты над уровнем моря.

Известно [6], что на высотах с 9 до 25 километров от уровня моря и на широтах между 25 и 70 градусами в каждом полушарии наб-

людаются струйные течения, причем максимальные скорости течения располагаются на высотах 9...14 км. Длина струйных течений достигает нескольких тысяч километров, ширина и высота – сотен и нескольких километров соответственно.

Так как порывы ветра в зависимости от высоты имеют разные значения скорости, то в качестве модели изменения коэффициента α целесообразно взять эмпирическое правило, учитывающее максимальную D_0 и текущую D дальность полета ЛА:

$$\alpha = (D_0 - D) / D_0. \quad (20)$$

В соответствии с этим правилом в начале наведения ($D = D_0$) превалирует вес производной сигнала ошибки $\dot{\delta}$, в то время как на конечном этапе наведения преобладает вес сигнала ошибки δ . Значение коэффициента β определяется на основании допустимого радиуса кривизны траектории ОУ, рассчитываемого по заданной предельной перегрузке.

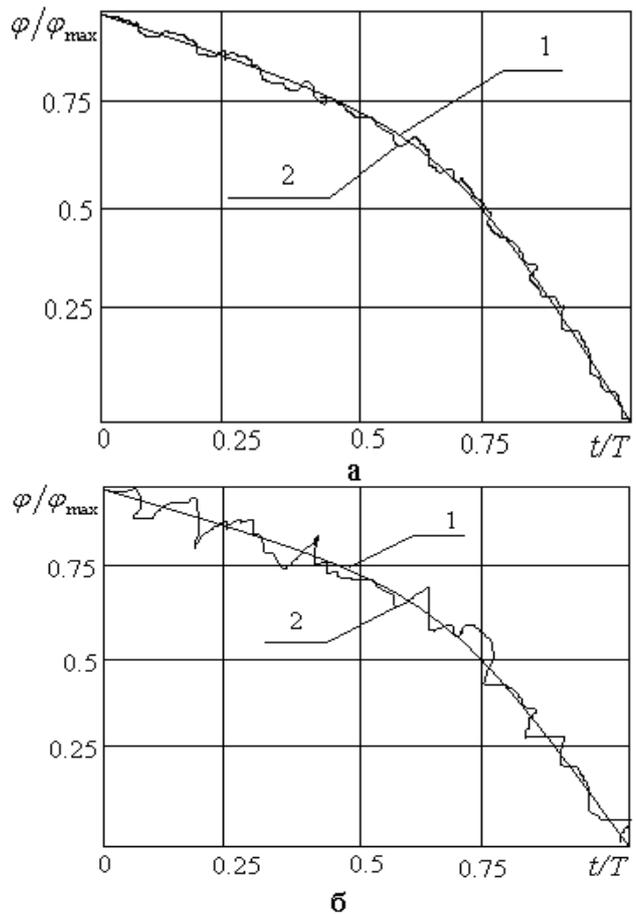


Рисунок 2 – Процесс управления ЛА при искажении ИТ порывами ветра

На рисунке 2 показан процесс управления ЛА при искажении ИТ порывами ветра (рисунок 2, а) с применением полученного алгоритма

управления (13), при этом коэффициент α изменяется по правилу (20) и без него (рисунок 2, б), где 1 – ИТ, 2 – траектория наведения при наличии мешающих факторов.

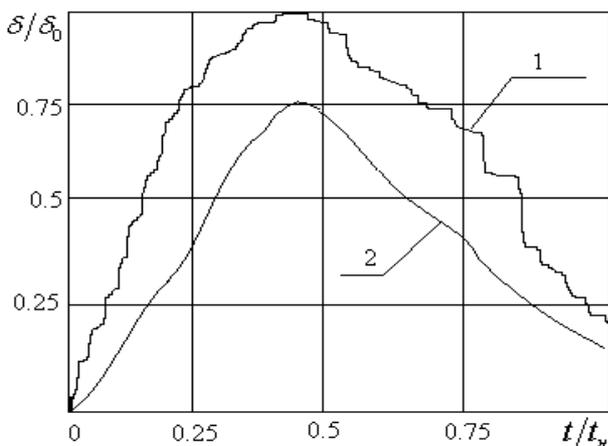


Рисунок 3 – Зависимости изменения относительного сигнала ошибки

Имитационное моделирование (рисунок 2) показывает, что при воздействии случайных, быстро изменяющихся мешающих факторов происходит существенное отклонение ЛА от ИТ. Однако при наведении ОУ согласно полученному алгоритму (13) происходит плавное сближение ОУ с расчетной траекторией, при этом уменьшаются ошибки наведения δ в среднем до 25 %. Зависимости изменения относительного сигнала ошибки δ/δ_0 представлены на рисунке

3, где: 1 – ОУ наводится без учета порывов ветра, 2 – ОУ наводится согласно полученному алгоритму.

Выводы. Результаты исследований показали, что при автономном наведении ОУ полученный алгоритм уменьшает чувствительность траектории полета ОУ к случайным мешающим факторам до 25 %. Изменяя значение коэффициентов α, β от 1 до 0 (варьируя вес членов, входящих в функционал качества (5)), можно изменять крутизну траектории ОУ, тем самым осуществляя изменение значений поперечного ускорения ОУ.

Библиографический список

1. Вейцель В.А. Радиосистемы управления. М.: Дрофа, 2005. - С. 65-68.
2. Кириллов С.Н., Токарь А.Д. Эффективный алгоритм наведения объекта управления на маневрирующие воздушные цели. // Вестник РГРТУ. Рязань, 2008. Вып. 24. - С. 33-36.
3. Канащенков А.И., Меркулов В.И. Авиационные системы радиопередачи. Т1. - М.: Радиотехника, 2003. - С. 65-68.
4. Ванько В.И., Ермошина О.В. Вариационное исчисление и оптимальное управление. - М.: МГТУ им. Баумана, 2001. - С. 305-309.
5. Брайсон А., Хо Ю – Ши. Прикладная теория оптимального управления. - М.: МИР, 1972. - С. 74-80.
6. Зимин Г.В. Справочник офицера противовоздушной обороны. - М.: Воениздат, 2001. - С. 41-49.

УДК 004.93.12

М.И. Иванов, М.Е. Виноградова

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ ДВИГАТЕЛЕЙ И ПРОЦЕДУРА СНИЖЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВА ПРИЗНАКОВ ПРИ ИХ КЛАССИФИКАЦИИ

Предложены способ параметризации сигналов и процедура снижения размерности пространства признаков при решении задачи классификации акустических шумов двигателей. Проведен анализ реализаций акустических шумов двигателей 34 марок автомобилей, обоснована целесообразность выбранного способа параметризации сигналов. Показано, что предложенная процедура позволила уменьшить размерность исходного пространства признаков в 46 раз и разделить пространство признаков акустических шумов двигателей с помощью детерминированного алгоритма классификации с вероятностью 97,6 %.

Ключевые слова: акустический шум, классификация, параметризация.

Введение. Системы распознавания образов, идентификации и классификации находят все более широкое применение в различных облас-

тах науки и техники: системах передачи информации, робототехнике, медицине - при создании адаптивных к изменяющимся условиям окру-

жающей среды интеллектуальных систем [1...8]. Кроме того, при решении ряда специфических задач экспертам приходится сталкиваться с необходимостью классификации акустических шумов окружения, присутствующих на фонограмме, и идентификации их источников. Акустическое окружение, в частном случае, может создаваться автомобилем, причем источником акустических шумов являются его двигатель и другие системы. При всем совершенстве слуховой системы человека и современных систем обработки акустических сигналов количество экспертов, способных качественно произвести подобный анализ, невелико. В настоящее время основная часть работ отечественных и зарубежных ученых по распознаванию акустических сигналов сосредоточена в области распознавания речевых сигналов. Можно выделить работы современных отечественных и зарубежных авторов, посвященные исследованию акустических шумов двигателей внутреннего сгорания в при решении задач технической диагностики [1,2,8].

Таким образом, задачи параметризации акустических сигналов и снижения размерности признакового пространства в интересах разработки алгоритмов классификации акустических шумов окружения являются актуальными.

Цели работы - анализ реализаций акустических шумов двигателей, выбор способа параметризации сигналов данного типа и разработка процедуры снижения размерности пространства признаков в интересах обоснования решающего правила (алгоритма) классификации различных марок автомобилей.

Постановка задачи. Имеется M классов объектов распознавания, которые были исследованы по некоторым представителям. Под классом будем понимать множество реализаций сигналов акустического шума двигателя, полученное для автомобиля определенной марки. В результате наблюдений для каждого класса сформировано множество $S_j \subset S, j = \overline{1, M}$ сигналов реализаций акустического шума двигателя автомобиля определенной марки, S - пространство сигналов. Каждому i -му сигналу j -го класса S_j^i необходимо поставить в соответствие вектор $J_j^i, f: S_j^i \rightarrow J_j^i, J_j^i \subset J$ признаков (J - пространство признаков) таким образом, чтобы по данному набору признаков исходное пространство признаков A могло быть разбито на классы $A_j, j = \overline{1, M}$. Отображение пространства сигналов S в пространство признаков

J посредством алгоритма, осуществляющего преобразование f , есть задача параметризации.

На этапе классификации для имеющихся M классов объектов, которые представлены рядом признаков $\{\overline{1, n}\}$, сформирован вектор параметров $(a_1 \dots a_n) \subset J$. Таким образом, информация о классах $j = \overline{1, M}$ в виде эталонов $\{a_1 \dots a_n\}^j$ представлена множествами полученных экспериментально описаний $\{\tilde{a}_1 \dots \tilde{a}_n\}^j$. На основании этой информации требуется обосновать решающее правило (алгоритм), которое по описанию произвольного объекта $x = (a_1 \dots a_n)$ относило бы этот объект к тому из классов, который его содержит.

Обоснование выбора способа параметризации сигнала. Для акустических шумов автомобильных двигателей при работе в режиме холостого хода характерно малое изменение спектральной динамики с течением времени и большой динамический диапазон изменения спектральной плотности мощности (СПМ). В связи с этой особенностью данного типа сигналов в качестве исходного набора параметров предложено использовать среднее значение [математическое ожидание (МО)] нормированного логарифма СПМ (НЛСПМ), полученной периодограммным методом для обеспечения гладкой и статистически устойчивой оценки [9] в заданных диапазонах частот и усредненной в каждой точке по k отсчетам. Для приведения сигналов к одному динамическому диапазону производится нормирование по энергии ЛСПМ. Для снижения влияния далеко отстоящих гармоник усреднение НЛСПМ следует производить после взвешивания с помощью оконной функции. МО НЛСПМ сигнала вычисляется следующим образом:

$$\overline{\text{MPSD}} = \overline{\text{PSD}} * \overline{\mathbf{W}}, \quad (1)$$

где $\overline{\text{MPSD}}$ - МО НЛСПМ сигнала, усредненное в каждой точке после взвешивания в окне \mathbf{W} , символом $*$ обозначен оператор свертки,

$\overline{\text{PSD}}$ - НЛСПМ сигнала, полученный периодограммным методом и нормированный по энергии для приведения сигналов к одному динамическому диапазону:

$$\overline{\text{PSD}} = (\text{PSD}_1 \dots \text{PSD}_N), \quad (2)$$

где $\text{PSD}_l = \log(\hat{P}_{xy}(l) / \sum_{m=1}^N \hat{P}_{xy}(m))$,

$\hat{P}_{xy}(l)$ - СПМ сигнала, полученная периодogramным методом [9], N – ширина окна анализа.

Предложенную процедуру можно рассматривать как вариант спектрально-полосных методов [3,6], когда для получения исходного набора признаков также производится усреднение в определенных полосах частот. Однако в современных системах распознавания данный способ используется для обработки речевых сигналов, имеющих определенную специфику. Усреднение производится с целью снижения размерности пространства признаков, а информативность полос определяется эмпирически, чаще всего в соответствии с существующими перцепционными моделями восприятия человека. В связи с этим некоторые информативные для решения задач распознавания признаки могут быть не представлены моделью на выходе.

Кроме того, необходимо использовать признаки, позволяющие учитывать связь между соседними отсчетами МО НЛСПМ для увеличения точности классификации. Для этой цели предложено использовать признаки $(\overline{\text{MPSD}}^I, \overline{\text{MPSD}}^{II})$, учитывающие разность между соседними отсчетами МО НЛСПМ, определяемые следующим способом:

$$\begin{aligned}\overline{\text{MPSD}} &= \bar{a} = (a_1, a_2 \dots a_N), \\ \overline{\text{MPSD}}^I &= (a_1 - a_2, a_2 - a_3 \dots a_{N-1} - a_N), \quad (3) \\ \overline{\text{MPSD}}^{II} &= (a_1 - 2a_2 + a_3, a_2 - 2a_3 + \\ &+ a_4, \dots a_{N-2} - 2a_{N-1} + a_N).\end{aligned}$$

Процедура снижения размерности пространства признаков

1. На пространстве признаков A рассматриваются множество $A_j, J \subset M$ и множество $R = A_K, K = M \cup \bar{J}$, где K - подмножество из множества классов, описываемое вводимыми ограничениями признаков сигналов, не принадлежащих к нему.

2. Для i -го признака j -го класса производится оценка распределения значений и определяется динамический диапазон $(P_{\min}^{ij} \dots P_{\max}^{ij})$. Далее рассматривается множество C сигналов, не пересекающееся с множеством $A_j(i)$ распределения i -го параметра j -го класса:

$$C = A_K, \quad (4)$$

$$K = (M \cup \bar{J}) \cap ((P_{\min}^{ij} < A_j^i) \cap \cap (P_{\max}^{ij} > A_j^i)).$$

Если множество C оказывается не пустым, оно исключается из дальнейшего рассмотрения (если C – пустое множество, анализируемый признак неинформативен в том смысле, что в данной точке множество A_j имеет пересечение со всеми рассматриваемыми классами множества R , а значит, произвести классификацию по нему невозможно), т.е. на следующей итерации множество R будет определяться как

$$\begin{aligned}R &= A_K, \\ K &= (M \cap \bar{J}) \cap ((P_{\min}^{ij} < A_K^i) \cap \cap (P_{\max}^{ij} > A_K^i)). \quad (5)\end{aligned}$$

Значения $P_{\min}^{ij}, P_{\max}^{ij}$ дописываются в массив P , а значения i - в вектор I , определяющий информативные для класса j признаки.

Этап 2 процедуры последовательно выполняется для каждого i -го признака сигналов j -го класса и завершается, когда множество R оказывается пустым либо по завершении анализа последнего признака j -го класса (в этом случае в вектор I дописывается 0).

3. Этапы (1...3) процедуры выполняются для каждого класса сигналов $j = 1, 2, \dots M$.

Входными данными для предложенной процедуры являются пространство признаков (A) и множество классов (M).

На выходе процедуры получаем массив значений динамических диапазонов P и вектор I , по которым может быть произведена классификация.

Блок-схема алгоритма работы предложенной процедуры показана на рисунке 1.

Алгоритм классификации. На рисунке 2 показана блок-схема устройства, позволяющего осуществить классификацию сигналов типа акустического шума двигателя по результатам работы предложенной процедуры.

Блок параметризации осуществляет представление входного сигнала $S(t)$ вектором параметров $\{a_1 \dots a_n\} \subset J$ ($\overline{\text{MPSD}}$, $\overline{\text{MPSD}}^I$ и $\overline{\text{MPSD}}^{II}$ или $\overline{\text{MPSD}}$, $\overline{\text{MPSD}}^I$ и $\overline{\text{MPSD}}^{II}$) в соответствии с предложенным способом параметризации. Устройство загрузки осуществляет

загрузку параметров $\{\beta_1 \dots \beta_n\}^j$ и функций $\{P_1 \dots P_n\}^j$ j -го класса на основании полученных в результате предложенной процедуры снижения размерности пространства массива значений динамических диапазонов P и вектора I . Параметр β_i^j принимается равным нулю, если в результате процедуры было установлено, что для j -го класса i -й признак неинформативен, либо 1, если информативен.

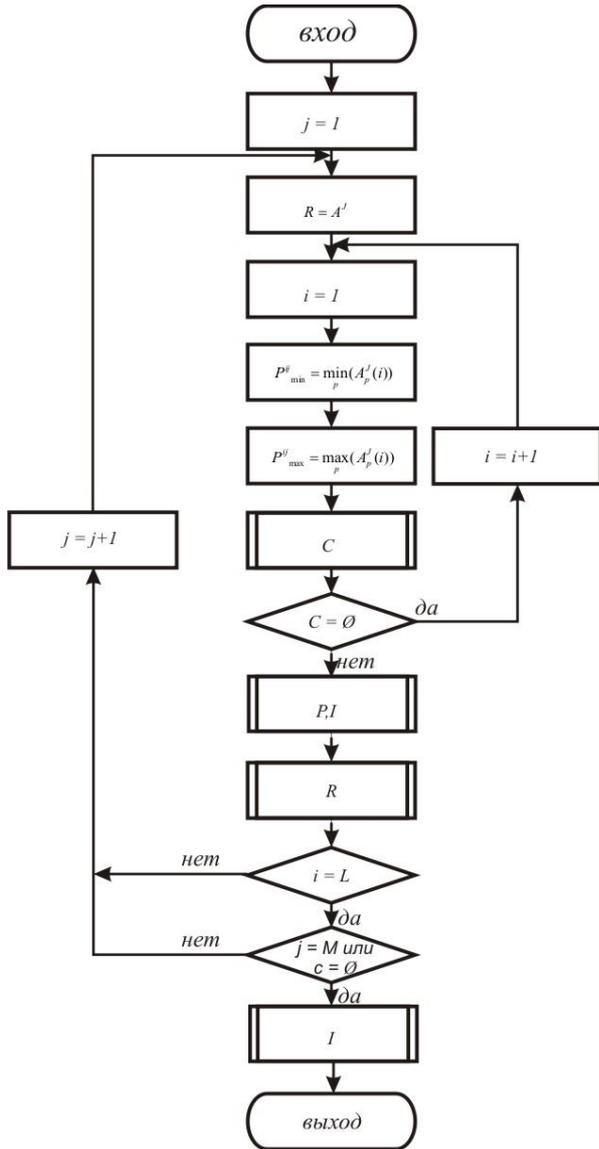


Рисунок 1 – Алгоритм работы предложенной процедуры

$$P_i^j = \begin{cases} 0, & \text{если } \beta_i^j = 0, \\ 1, & \text{если } \beta_i^j \neq 0 \text{ и } \beta_i^j \in \{P_{\min}^{ij} \dots P_{\max}^{ij}\}. \end{cases}$$

В блоке \sum осуществляется суммирование значений $\sum_{i=1}^n P_i^j \beta_i^j a_i$. По величине, полученной

на выходе сумматора, решающее устройство (РУ) определяет, принадлежит ли входной сигнал $S(t)$ к классу j .

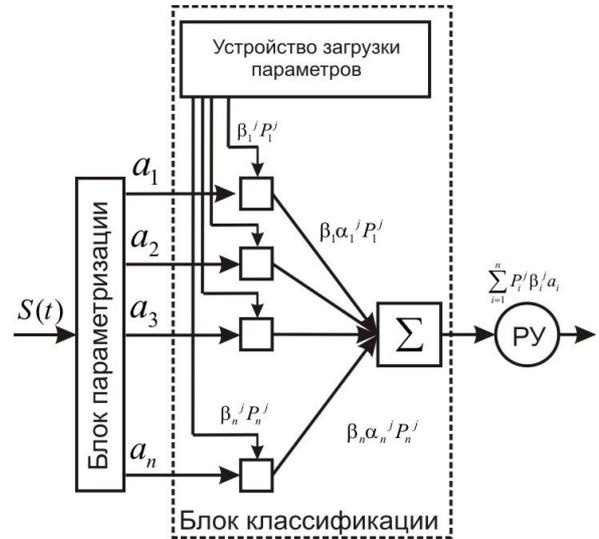


Рисунок 2 – Блок-схема классификатора

Проведение экспериментальных исследований. Для проведения экспериментальных исследований был получен массив фонограмм для автомобилей различных типов (легковых, грузовых) с инжекторной и карбюраторной системами подачи топлива, а также дизельных и бензиновых типов двигателей, марок (как отечественных, так и зарубежных производителей) для 34 моделей. Длительность реализаций была не менее 10 секунд, запись производилась при трех различных положениях устройств звукозаписи в салоне автомобиля (во всех случаях автомобиль находился на стоянке). При записи использовались формат представления данных wav с частотой дискретизации сигнала 44100 Гц и 24-х битное квантование.

На полученных в ходе эксперимента реализациях акустических шумов автомобильных двигателей присутствуют также акустические шумы, связанные с шумами окружающей среды, кроме того, характер возникновения данного типа шумов предполагает изменение параметров сигнала с течением времени. В связи с этим целесообразно произвести сегментацию исходных сигналов на выборке небольшой длительности для учета вариабельности параметров сигнала.

Анализ экспериментальных данных показал, что информативными для данного типа сигналов являются составляющие в диапазоне частот 10 ... 22000 Гц, поэтому во избежание потери информативной низкочастотной составляющей для получения периодограммной оценки СПМ целесообразно выбирать длительность окна анализа не менее 0,1 с [6]. Так как для

исследуемого типа сигналов изменение спектральной динамики с течением времени не является информативным признаком с точки зрения решения задачи классификации, ширина окна анализа может быть выбрана достаточно большой. Однако при решении данной задачи необходимо также сохранить возможность сегментации исходных сигналов для увеличения набора векторов признаков сигналов, что требует выбора наименьшей ширины окна анализа. На основании этого при частоте дискретизации 44100 Гц была выбрана ширина окна анализа 8192 отсчетов (что соответствует ширине окна 0,186 секунды во временной области), а для снижения влияния краевых искажений взвешивание производилось с помощью оконной функции Хемминга с 50 % наложением.

В ходе проведения эксперимента исходный массив сигналов каждого класса (все полученные реализации акустического шума двигателя определенной модели автомобиля) был разбит на сегменты длительностью 0,74 секунды (32768 отсчетов). Полученный массив был разбит на две равные группы – обучающую и тестовую. Для первой группы сигналов была произведена параметризация полученного массива данных предложенным выше способом. После этого производились процедура понижения размерности пространства признаков и разбиение исходного пространства признаков на классы на основе полученных моделей шумов. Сигналы тестовой группы после параметризации подавались на блок классификации для оценки вероятности правильной классификации.

На рисунках 3, 4 показаны зависимости вероятностей правильной классификации на тестовой группе от ширины окна усреднения W при использовании различных параметров сигнала.

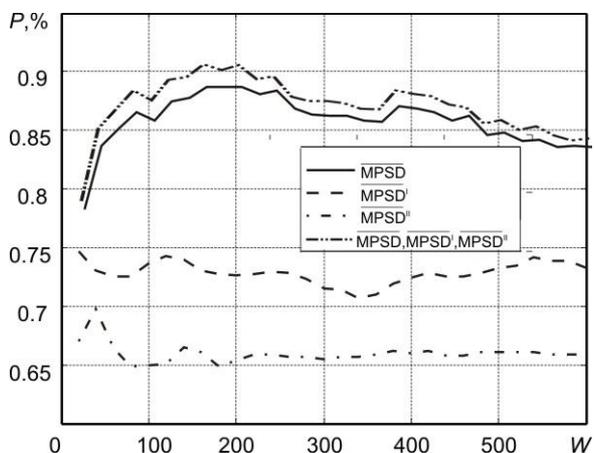


Рисунок 3 – Зависимости вероятности правильной классификации на тестовой группе от ширины окна усреднения W

Обучающие выборки представляли собой сегменты сигналов типа акустических шумов автомобилей длительностью 0,74 с.

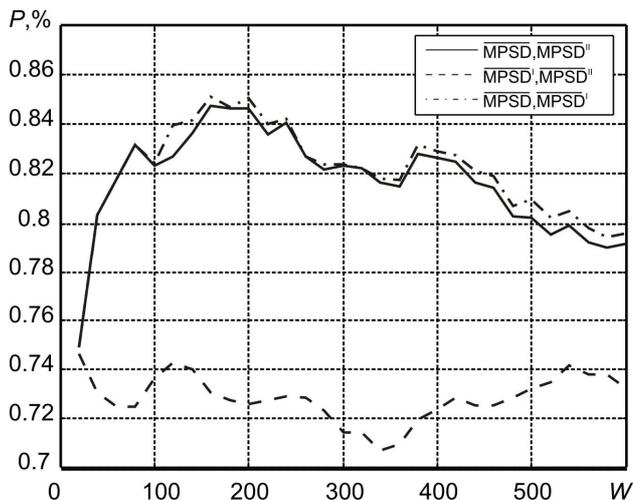


Рисунок 4 – Зависимости вероятности правильной классификации на тестовой группе от ширины окна усреднения W

В таблице приведены результаты применения предложенного алгоритма классификации шумов и процедуры снижения размерности пространства признаков при использовании в качестве признаков $\overline{\text{MPSD}}$, $\overline{\text{MPSD}}^I$, $\overline{\text{MPSD}}^{II}$ и их комбинаций для обучающей группы сигналов.

Таблица – результаты применения предложенного алгоритма классификации шумов и процедуры снижения размерности пространства признаков к обучающей группе сигналов

Параметры сигнала, используемые для классификации	Исходная размерность пространства признаков	Полученная размерность пространства признаков
$\overline{\text{MPSD}}$	4223	263
$\overline{\text{MPSD}}^I$	4223	178
$\overline{\text{MPSD}}^{II}$	4223	188
$\overline{\text{MPSD}}, \overline{\text{MPSD}}^I$	8447	347
$\overline{\text{MPSD}}^I, \overline{\text{MPSD}}^{II}$	8447	180
$\overline{\text{MPSD}}, \overline{\text{MPSD}}^I, \overline{\text{MPSD}}^{II}$	12699	349

Из анализа приведенных зависимостей следует, что наилучшим с точки зрения возможности классификации тестовой группы сигналов является использование в качестве исходного набора признаков $\overline{\text{MPSD}}$, $\overline{\text{MPSD}}^I$, $\overline{\text{MPSD}}^{II}$

(позволяет достичь 91,2 % вероятности правильной классификации). Также в результате проведенных исследований путем изменения ширины окна усреднения от 2 до 512 отсчетов было определено, что ширина окна W , дающая возможность наилучшим образом произвести параметризацию, равна 100...160 отсчетам, т.к. при таких значениях ширины окна взвешивания обеспечивается возможность наилучшего разбиения пространства признаков (максимальная вероятность правильной классификации на тестовой группе сигналов).

Из анализа данных, приведенных в таблице, следует, что наилучшее разбиение пространства признаков сигналов при наименьшей размерности полученного пространства признаков удается обеспечить в случае использования в качестве признаков $\overline{\text{MPSD}}^I$, $\overline{\text{MPSD}}^{II}$.

Заключение. В статье предложены способ параметризации сигналов и процедура снижения размерности пространства признаков для решения задачи классификации автомобилей по реализациям акустических шумов двигателей. Предложенная процедура позволила снизить размерность пространства признаков в 46 раз в случае использования в качестве исходного набора признаков $\overline{\text{MPSD}}$, $\overline{\text{MPSD}}^I$ и $\overline{\text{MPSD}}^{II}$ и разделить пространство признаков акустических шумов с помощью детерминированного алгорит-

ма классификации с вероятностью 91,2 % на тестовой группе.

Библиографический список

1. Ding, Hong. An Approach to State Recognition and Knowledge-Based Diagnosis for Engines. - Mechanical System and Signal Processing, 1991. - Vol. 5, № 46. - P. 257-266.
2. Schiffbanker, H. Automatische Gutekontrolle an Verbrennungsmotoren auf Basis von Schwingungsinformationen. MTZ. 1988. - Vol. 49, № 2. - P. 73-80.
3. Аграновский А.В., Леднов Д.А. Теоретические аспекты алгоритмов обработки и классификации акустических сигналов. - М.: Радио и связь, 2004. - 164 с.
4. Верхаген К. Распознавание образов. Состояние и перспективы. - М.: Радио и связь, 1985. - 104 с.
5. Стукалов Д.Н. Алгоритмы цифровой обработки речевых сигналов при воздействии акустических помех: дис. канд. техн. наук. Рязань 1996. - 200 с.
6. Шелухин И.О., Лукьянцев Н.Ф. Цифровая обработка и передача речи. - М.: Радио и связь, 2000. - 456 с.
7. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. - М.: Наука, 1979. - 368 с.
8. Лютин К.И. Использование нейронно-сетевых моделей при виброакустической диагностике ДВС: на примере диагностики Кулачкового ГРМ: дис. канд. техн. наук. - Волгоград 2009. - 130 с.
9. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. - М.: Мир, 1990. - 584 с.