**Зау Хтет Наинг. Математическая модель, алгоритмы и программный комплекс для предотвращения столкновений беспилотных летательных аппаратов гражданского назначения: диссертация ... кандидата Технических наук: 05.13.18 / Зау Хтет Наинг;[Место защиты: ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»], 2020**

**Федеральное государственное бюджетное**

**образовательное учреждение высшего образования**

**«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»**

**На правах рукописи**

**Зау Хтет Наинг**

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЙ**

**КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ**

**БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Специальность 05.13.18 -Математическое моделирование, численные**

**методы и комплексы программ**

**Диссертация на соискание учёной степени**

**кандидата технических наук**

**Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор, Бердоносов Виктор Дмитриевич**

**Комсомольск-на-Амуре - 2020**

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

**ВВЕДЕНИЕ 5**

**ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И АЛГОРИТМЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ 13**

**1.1 Анализ систем предотвращения столкновений беспилотных летательных**

**аппаратов со статическими объектами 18**

**1.2 Анализ систем предотвращения столкновений беспилотных летательных**

**аппаратов с динамическими объектами 26**

**1.3 Технические средства оценки положения потенциальных динамических**

**угроз 38**

**1.3.1 Некорпоративные системы 38**

**1.3.2 Корпоративные системы 39**

**ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМНОГО ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ 46**

**2.1 Математическая модель движения беспилотных летательных аппаратов .. 46**

**2.2 Математическая модель движения беспилотных летательных аппаратов под**

**управлением автопилота 48**

**2.3 Математическая модель взаимного движения двух и более беспилотных**

**летательных аппаратов 49**

**2.4 Линеаризация траекторий движения беспилотных летательных**

**аппаратов 52**

**2.5 Модель оценки параметров, позволяющих исключить столкновения**

**беспилотных летательных аппаратов 54**

**2.5.1 Модель оценки точки скрещивания 55**

**2.5.2 Модель оценки высотных параметров 57**

**2.5.3 Модель оценки критических скоростей 57**

**2.5.4 Модель оценки ускорений, предотвращающих столкновения 61**

**2.6 Комплексная модель оценки параметров, позволяющих исключить**

**столкновения беспилотных летательных аппаратов 62**

**2.7 Проверка адекватности моделей компьютерным моделированием 65**

**ГЛАВА 3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ С УЧЁТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ НА РЕСУРСЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ 73**

**3.1 Математическая постановка задачи предотвращения столкновений беспилотных летательных аппаратов с учётом ограниченности их ресурсов.... 73**

**3.2 Выбор метода численного решения задачи предотвращения столкновений беспилотных летательных аппаратов с учётом ограниченности их ресурсов... 76**

**3.3 Применение метода Монте-Карло для получения аппроксимирующего**

**выражения границы зоны взаимодействия 78**

**3.3.1 Прямое использование метода Монте-Карло 78**

**3.3.2 Использование дискретизации области поиска по полярному углу .... 80**

**3.3.3 Использование контекстного сужения области поиска по радиус-**

**вектору 81**

**3.4 Аппроксимирующее выражение для границ зоны взаимодействия 85**

**3.5 Проверка адекватности аппроксимирующего выражения компьютерным**

**моделированием 87**

**ГЛАВА 4. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МЕТОДА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ 89**

**4.1 Технические требования к системе предотвращения столкновений 89**

**4.2 Методика реализации метода предотвращения столкновений 92**

**4.3 Архитектура программного комплекса моделирования метода**

**предотвращения столкновений 98**

**4.3.1 Подсистема генерации навигационных параметров беспилотных**

**летательных аппаратов 98**

**4.3.2 Подсистема моделирования движения беспилотных летательных**

**аппаратов 100**

**4.3.3 Подсистема формирования управляющих воздействий на автопилот**

**беспилотного летательного аппарата 102**

**4.3.4 Подсистема визуализации моделирования и вывода результатов**

**моделирования 103**

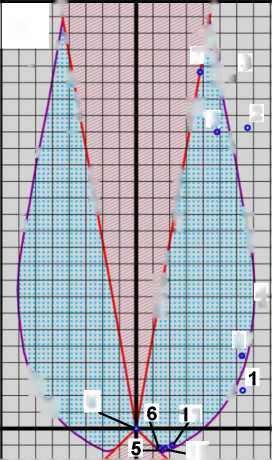
**4.4 Результаты моделирования метода предотвращения столкновений 105**

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ 112**

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 114**

**ПРИЛОЖЕНИЕ A. Охранные документы на результаты интеллектуальной деятельности 130**

**Выводы по четвертой главе**

1. Сформированы технические требования к программной реализации си­стемы предотвращения столкновений.
2. Представлен алгоритм предотвращения столкновений большого числа БПЛА, находящихся в едином воздушном пространстве.
3. Разработана программная архитектура системы предотвращения столкновений и программного комплекса моделирующего движения БПЛА.
4. Представлены результаты компьютерного моделирования работы си­стемы предотвращения столкновений при одновременном нахождении в «воз­духе» одиннадцати «чужих».

112

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования решён ряд задач:

1. разработаны алгоритмы обнаружения потенциально опасных динами- чески-движущихся объектов;
2. разработан алгоритм оценки возможности столкновения, по особен­ностям и характеристикам поведения этих объектов;
3. разработаны алгоритмы расчётов необходимых параметров для укло­нения;
4. разработанные алгоритмы реализованы в программном комплексе для моделирования движения БПЛА и их визуального отображения.

В первой главе была рассмотрена история БПЛА и их систем управления. Далее были описаны основные манёвры уклонения, выполняемые воздушными аппаратами, и осуществлена оценка эффективности этих манёвров. Выявлена необходимые функции, которые должна выполнять система предотвращения столкновения и представлена её общая структура, основанная на этих функциях. Были рассмотрены различные технические средства и осуществлён выбор наиболее подходящих, а именно БПЛА, имеющие модуль GPS/ГЛОНАСС и модуль автоматического зависимого наблюдения-вещания либо модуль, соче­тающий в себе и функции GPS/ГЛОНАСС модуля, и модуля АЗН-В. В конце главы приводится краткое описание технологии АЗН-В, являющейся очень перспективной и внедряемой во многих странах мира, в том числе и в Росси.

Во второй главе были приведены формулы, с помощью которых можно определить: параметры движения двух аппаратов (двигаются ли они оба в точ­ку скрещивания ли нет), возможность столкновения и параметры необходимого манёвра уклонения для «своего» БПЛА. Далее эти формулы были реализованы в компьютерной программе для моделирования движения.

В третьей главе приведены выражения для определения границ зоны вза­имодействия. В качестве метода численного решения нахождения корней нели­нейного уравнения, определяющих границы зоны взаимодействия, выбран ме­тод Моне-Карло. Приведён алгоритм повышения эффективности метода Мон-

те-Карло путем контекстного сужения области поиска. Определены аппрокси­мирующие полиномы границ зоны взаимодействия для разных значений пара­метров БПЛА. Представлены значения коэффициентов этих полиномов.

В четвёртой главе представлено описание разработанного программного комплекса для моделирования движений БПЛА. На нём продемонстрировано расчёт параметров скоростного манёвра уклонения и выполнение манёвра. Для расчёта параметров использовались методы и формулы, описанные во второй и третьей главах.

Проведённые моделирования показывают, что манёвры, выполненные по полученным параметрам, действительно позволяют «своему» БПЛА безопасно уклониться от столкновения с «чужими» БПЛА.