

Отзыв официального оппонента д.т.н. Саульского Виктора Константиновича  
на диссертацию Нгуен Нам Куи  
«МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ОРБИТАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ  
ДВУХЪЯРУСНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ОБЗОРА  
СФЕРИЧЕСКОГО СЛОЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО  
ПРОСТРАНСТВА»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.07.09  
«Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

Представленная диссертация посвящена разработке метода и программно-математического обеспечения для оптимизации орбитального построения двухъярусных систем спутников, выполняющих однократное или многократное непрерывное наблюдение заданного сферического слоя в околоземном космическом пространстве (ОКП). Под орбитальным построением понимается комплекс характеристик, включающий для каждого яруса следующие параметры:

- количество спутников,
- высоты и наклонение круговых орбит,
- спутниковую структуру системы, т.е. распределение восходящих узлов орбитальных плоскостей вдоль экватора Земли и фазовое положение спутников на орбитах.

Тема диссертации актуальна, поскольку проблема реализации непрерывного обзора ОКП имеет растущую важность. Подобный обзор нужен для решения таких современных и перспективных задач, как мониторинг «космического мусора», информационное обеспечение непосредственного технического обслуживания космических аппаратов на орбитах, оперативный контроль несанкционированной деятельности в ОКП. До сих пор для данных целей рассматривались только одноярусные космические системы. Однако более сложные двухъярусные спутниковые группировки в ряде случаев могут оказаться более эффективными. Методология оптимизации подобных систем до настоящего момента не была разработана.

Целью работы являлось сокращение затрат на выполнение непрерывного наблюдения заданного сферического слоя в ОКП с заданной кратностью. Для этого потребовалось разработать новый метод оптимизации систем спутников непрерывного обзора и специальное программно-математическое обеспечение. Наиболее важным в его составе стало создание принципиально нового быстродействующего алгоритма расчета так называемых  $\alpha$ - характеристик спутниковых «дельта-систем» Дж. Уолкера, являющихся подклассом «кинематически правильных систем» Г.В. Можаяева.

Анализ диссертации свидетельствует, что поставленная в ней цель успешно достигнута. Созданный метод оптимизации и программно-математическое обеспечение являются значительным вкладом не только в решение проблемы

непрерывного обзора ОКП, но и в развитие методологии расчета дельта-систем Можаяева-Уолкера в целом. Данный класс многоспутниковых систем широко применяется также и в интересах космической навигации, космической связи с невысоких орбит, непрерывного мониторинга земной поверхности и других задач. Используя разработанный в диссертации алгоритм, значительно ускоряется трудоёмкая процедура расчёта  $\alpha$ - характеристик, необходимая для построения каталогов дельта-систем. Это позволило автору диссертации впервые довести объем каталога таких систем, реализующих непрерывный обзор с кратностью 1–4, до 110 спутников.

Задачи исследований, проведенных в рассматриваемой диссертации, наряду с уже отмеченным созданием быстродействующего алгоритма расчета дельта-систем, включают:

- получение точной формулировки задачи по оптимизации орбитального построения двухъярусных систем спутников для  $L$ -кратного непрерывного обзора сферического слоя в ОКП;
- обоснование возможности и способа декомпозиции задачи по оптимизации орбитального построения двухъярусных систем спутников;
- разработку метода расчета и комплекса компьютерных программ для оптимизации орбитального построения двухъярусных систем спутников;
- создание каталога оптимальных двухъярусных систем спутников для непрерывного обзора сферических слоёв в ОКП при различных значениях кратности обзора, угла полураствора бортовой аппаратуры, дальности её действия, а также высот нижней и верхней границ зондируемого сферического слоя;
- сравнительный анализ оптимальных двухъярусных и одноярусных систем спутников в различных вариантах  $L$ -кратного непрерывного обзора и разработку практических рекомендаций по областям предпочтительного использования двухъярусных систем.

В целом содержание и уровень решения задач диссертации соответствуют её цели. В связи с этим можно утверждать, что цель диссертации достигнута.

В частности, корректно поставлена задача по оптимизации двухъярусных группировок, формируемых из дельта-систем Можаяева-Уолкера. В качестве критерия оптимальности обоснован минимум суммарной характеристической скорости выведения всех спутников группировки на орбиты.

Выполнена декомпозиция поставленной задачи, используя разбиение сферического слоя на два подслоя: верхний и нижний, наблюдаемые соответственно с нижнего и верхнего ярусов спутников. Подслои соприкасаются по «разделительной сфере».

Разработан метод расчёта, реализуя который получена полная совокупность компьютерных программ по определению оптимальных двухъярусных систем.

Рассчитан обширный электронный каталог оптимальных двухъярусных систем для следующих диапазонов исходных данных:

- кратность обзора 1-4,
- угол полураствора бортовой аппаратуры  $30^{\circ}$ - $55^{\circ}$ ,



- высота нижней границы наблюдаемого сферического слоя 0–35000 км.

Весь огромный каталог представить в диссертации нельзя, поэтому для примера показана одна его страница, на которой варьируют: высота верхней границы сферического слоя и дальность действия аппаратуры обзора.

Выполнен сравнительный анализ оптимальных одноярусных и двухъярусных систем спутников. С этой целью сопоставлялись тройки лучших орбитальных группировок, выбиравшихся по критерию минимума суммарной характеристической скорости выведения спутников на орбиты и представлявших следующие три типа космических систем:

- одноярусные системы для наблюдения сферического слоя сверху,
- одноярусные системы для наблюдения сферического слоя снизу,
- двухъярусные системы для наблюдения сферического слоя сверху и снизу.

Однако, изложение результатов сравнительного анализа носит не вполне последовательный характер. Нужно было полноценно описать и исследовать все области изменения исходных данных, где двухъярусные системы превосходят одноярусные. По-видимому, это сделано, но в диссертации отражено небрежно.

Там, действительно, даны «области локализации оптимальных вариантов двухъярусных спутниковых систем», как называет этот заключительный раздел своей работы автор, но лишь для однократного обзора. Анализ для кратностей 2–4 отсутствует. Но и представленные результаты носят неполный характер. Об этом косвенно свидетельствует то, что в пяти подробно рассмотренных примерах, отобранных автором в качестве «характерных» для применения разработанной методики, двухъярусные системы оказались лучшими в 3-х случаях, но почему-то их нет среди представленных результатов.

Неполнота анализа областей предпочтительности двухъярусных систем привела к тому, что итоговые выводы сформулированы неудачно. В них нечётко и без указания конкретных (численных) диапазонов изменения границ зондируемых сферических слоёв, дальностей действия и углов полураствора бортовой аппаратуры, количества спутников и значений кратностей обзора словесно описаны рекомендуемые области применения двухъярусных систем.

Всё это несколько снижает общее высокое впечатление от рассматриваемой диссертации, содержащей большой теоретический и практический материал. Тем не менее, невзирая на неясность некоторых итоговых формулировок, я должен снова повторить, что, по моему мнению, цель диссертации достигнута.

Методы исследований, выполненных в диссертации, вполне соответствуют современным подходам к решению задач по оптимизации орбитального построения многоспутниковых группировок для непрерывного обзора. В частности, можно отметить квалифицированное и плодотворное использование математического аппарата из теории «кинематически правильных систем» и «дельта-систем», методологии системного анализа, численных алгоритмов поиска экстремумов. Автор в совершенстве владеет компьютерным моделированием и умело разрабатывает программы на языке C++.

Достоверность полученных научных результатов диссертации обеспечена, во-первых, корректным использованием применённых методов исследований и,



во-вторых, фактическим подтверждением той части полученных результатов, которая может быть непосредственно проверена по уже известным данным Б.П. Быркова, Г.В. Можаяева, Дж. Уолкера, Т. Лэнга.

Научная новизна исследований и результатов диссертации не вызывает сомнений и заключается в следующем:

- впервые поставлена и решена задача оптимизации двухъярусных систем спутников для многократного непрерывного наблюдения сферического слоя в околоземном космическом пространстве,

- разработан принципиально новый быстродействующий алгоритм расчета  $\alpha$ -характеристик «дельта-систем» Можаяева-Уолкера,

- впервые доведен до 110 спутников электронный каталог дельта-систем с минимальными  $\alpha$ - характеристиками для непрерывного обзора с кратностями 1–4.

Практическая значимость состоит, во-первых, в том, что создано эффективное программно-математическое обеспечение для практического расчета и выбора двухъярусных систем спутников  $L$ -кратного непрерывного обзора, которые в ряде случаев оказываются предпочтительнее традиционных одноярусных группировок. Во-вторых, разработанный быстродействующий алгоритм расчёта  $\alpha$ -характеристик «дельта-систем» Можаяева-Уолкера будет востребован также и при решении ряда других задач, помимо непрерывного однократного и многократного наблюдения сферического слоя в ОКП. Среди них можно выделить непрерывный мониторинг заданной области на земной поверхности и космическую связь с применением многоспутниковых группировок на низких и средних (по высоте) орбитах.

Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она изложена технически корректным языком, хотя имеются отдельные, но не искажающие смысла шероховатости в построении фраз на русском языке, что вполне объяснимо, поскольку для автора он не является родным.

Автореферат соответствует основным положениям и выводам диссертации.

По теме диссертации опубликованы 2 работы в изданиях по перечню ВАК, 1 работа по перечню Скопус и ещё 4 работы в остальных изданиях. Кроме того, подано 5 заявок на получение патентов. В связи с этим можно считать, что рассматриваемая диссертация получила достаточную апробацию в публикациях.

Тем не менее, нужно отметить следующие замечания по диссертации:

1. Максимальная дальность действия бортовой аппаратуры наблюдения ограничена с целью исключения «составных» и «кольцевых» зон обзора. Такое требование носит искусственный характер и сделано для упрощения постановки задачи, которая иначе приобретает чрезмерную сложность. Для практически обоснованного ограничения дальности требовалось проанализировать реальные возможности современной и перспективной бортовой аппаратуры.

2. При выводе формулы для расчёта общей характеристической скорости, требуемой для выведения спутника на орбиту, сделано ошибочное утверждение: «приравняем энергию спутника, находящегося на пусковой площадке, и энергию спутника, выведенного на орбиту» (с. 20 диссертации). Реализуя его, получено



некорректное уравнение, в котором обе указанные энергии, стоящие в его левой и правой частях, приняли отрицательные значения. На самом деле нужно было просто сложить потенциальную энергию подъёма спутника на высоту круговой орбиты и кинетическую энергию его движения по орбите.

3. Выводы по определению областей предпочтительного применения двухъярусных систем спутников носят неполный и неконкретный характер.

4. В диссертации принято, что работа каждого яруса спутников ограничена выделенным для него сферическим подслоем, хотя с обоих ярусов можно наблюдать весь заданный сферический слой. Ограничение облегчает декомпозицию задачи, которая в противном случае становится трудно реализуемой. Тем не менее, в будущем можно рекомендовать автору продолжить исследования с учетом совместного действия обоих ярусов. Это тем более целесообразно, что в окрестности так называемой «разделительной» сферы, имеющей ключевой характер, совместная работа обоих ярусов наиболее продуктивна.

5. В диссертации встречаются утверждения, не получившие должного обоснования. Например, вывод на с. 25 о равнозначности критериев минимума числа спутников и минимума характеристической скорости принят со следующей формулировкой: «можно в этом убедиться, проанализировав зависимость критических значений углового радиуса зон обзора от высоты орбит и (или) проведя соответствующие оценочные расчеты». Для корректности нужно было изложить результаты указанного анализа или оценочных расчётов.

6. Допускается чрезмерно низкая минимальная высота орбит 300 км, что не оправданно с точки зрения их длительного поддержания.

Замечания не снижают высокой ценности представленной диссертации.

Совокупность решённых задач и разработанный в диссертации метод являются значительным вкладом в методологию оптимизации орбитального построения систем спутников для непрерывного обзора околоземного космического пространства (ОКП). Каталоги дельта-систем и оптимальных двухъярусных спутниковых группировок пригодятся при проектировании космических систем для мониторинга загрязнений, технического обслуживания спутников на орбитах и контроля несанкционированной деятельности в ОКП. Каталоги дельта-систем будут полезны также и при проектировании многоспутниковых систем связи и непрерывного мониторинга Земли.

### **Выводы.**

Кандидатская диссертация Нгуен Нам Куи является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена научно-техническая задача разработки метода и программно-математического обеспечения по оптимизации орбитального построения двухъярусных систем спутников для непрерывного наблюдения сферического слоя в ОКП.

Решённая задача является вкладом в развитие методологии оптимизации систем непрерывного обзора не только для ОКП, но и на поверхности Земли.

Диссертация соответствует критериям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор

Нгуен Нам Куи заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09:

«Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Официальный оппонент,  
главный специалист  
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,  
доктор технических наук



В.К. Саульский

Подпись Саульского Виктора Константиновича удостоверяю.  
Ученый секретарь  
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,  
кандидат военных наук, доцент



А.В. Пинчук