

РАЗРАБОТКА МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА КОСМИЧЕСКИМ МУСОРОМ

Разумовский А.И.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

razumovsky@yandex.ru

Аннотация. В докладе представлен инновационный подход разработки и интеграции в спутниковые коммуникационные сети многоагентной системы с распределением ролей, направленной на повышение эффективности обнаружения и отслеживания космического мусора. Использование данной архитектуры влечет за собой уменьшение нагрузки на командный центр и предоставляет более широкие возможности по масштабированию сети спутников.

Ключевые слова: космический мусор, спутники, многоагентная система, мониторинг, алгоритм выбора лидера.

Введение

Ежедневно люди по всему миру пользуются спутниковыми данными в своей повседневной жизни, которая немаловажна без обмена мгновенными сообщениями с семьей, проверки погоды в приложениях и онлайн-банкинга для управления счетами. Это стало возможным благодаря глобальным навигационным системам и спутникам связи, которые образуют невидимый каркас современной цифровой экономики. Кроме того, спутники играют ключевую роль в наблюдении за стихийными бедствиями и снижении их воздействия, мониторинге климатических изменений и обеспечении национальной безопасности. Например, данные дистанционного зондирования Земли позволяют точно прогнозировать пути ураганов, оценивать масштабы наводнений и контролировать выбросы парниковых газов.

Активные операции по освоению космического пространства привели к накоплению значительного количества обломков на орбите, в результате чего Земля оказалась окружена плотным слоем вышедших из строя космических аппаратов и их фрагментов. Космический мусор представляет собой серьезную опасность для функционирующих летательных аппаратов и Международной космической станции (МКС), а также потенциальную угрозу [1] для населения Земли. С точки зрения государственной безопасности, неконтролируемое перемещение космических объектов создает риски для стратегических активов и может быть использовано для маскировки направленных противоспутниковых действий. Частично сгоревшие фрагменты космических объектов с высокой долей вероятности могут достигать поверхности планеты, вызывая повреждения наземной инфраструктуры или приводя к пробитию обшивки космических кораблей. Особую озабоченность вызывает возможность ложного распознавания падающих обломков как ракетной атаки, что может спровоцировать неадекватный ответ и эскалацию напряженности между космическими державами.

Ключевым направлением нейтрализации данной угрозы является активное удаление объектов космического мусора с околоземной орбиты. Среди коммерческих организаций лидером в этой области выступает японская компания Astroscale. Ее проект – Elsa-d представляет собой автономный комплекс, специализирующийся на очистке космического пространства от орбитальных обломков [3]. Однако развитие подобных технологий коммерческими структурами требует особого контроля, поскольку они обладают двойным назначением и могут быть использованы для противоспутниковых действий под прикрытием гражданской деятельности.

Проведение операций по удалению мусора невозможно без предварительного анализа обстановки и точного отслеживания объектов. Решению этой задачи способствуют специализированные системы мониторинга. Для национальной безопасности критически важно сохранять суверенные возможности по отслеживанию космической обстановки, чтобы не зависеть от данных других государств в этой стратегической области. Наиболее развитой является Сеть космического наблюдения (Space Surveillance Network) [2], являющаяся компонентом космической программы США. Контроль над подобными системами наблюдения предоставляет их операторам не только технические, но и стратегические преимущества, включая возможность скрывать информацию о собственных космических объектах и манипулировать данными о космической обстановке.

Расположение центров наблюдения Сети космического наблюдения показано на рисунке 1.

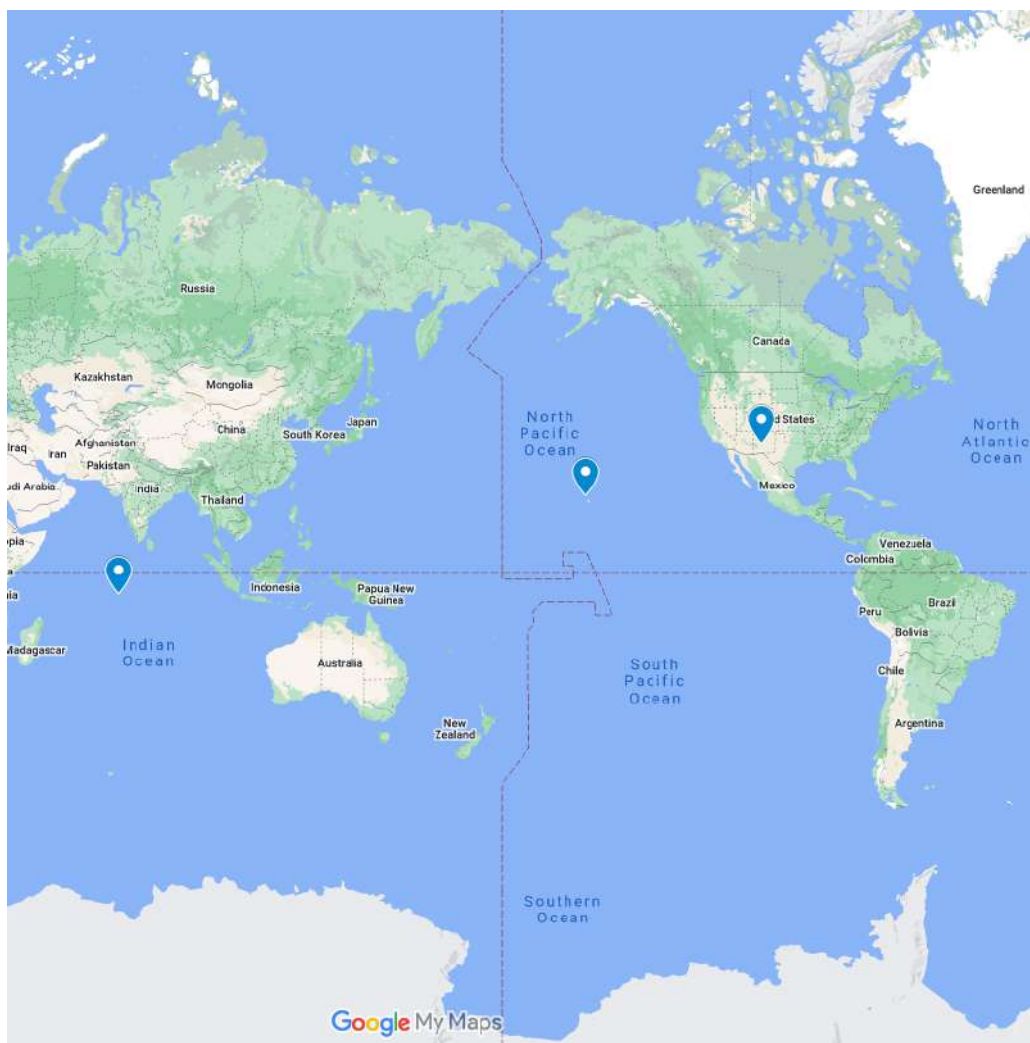


Рис. 1. Наземные центры мониторинга

К основным функциональным задачам служб космического наблюдения относятся:

- картографирование текущего местоположения космических объектов с проектированием их ожидаемых орбитальных траекторий;
- прогнозирование времени и места вхождения разрушающихся космических объектов в атмосферу Земли;
- идентификация возвращающихся объектов, имеющих на радаре сходство с ракетой, с целью исключения ложных срабатываний в системах предупреждения о ракетном нападении;
- ведение и актуализация каталога искусственных космических объектов;
- корректное отображение объектов, находящихся на орбите Земли;
- выявление новых искусственных объектов в космическом пространстве;
- установление государственной принадлежности запускаемых космических аппаратов.

Ключевым методом обнаружения космического мусора является применение наземных радарных комплексов (GBR) [4] и оптических систем наблюдения [5] (рис. 2). Наземные радарные комплексы эффективны для отслеживания относительно крупных объектов (от 15 сантиметров в диаметре), в то время как обнаружение более мелких фрагментов с поверхности Земли сопряжено со значительными техническими сложностями при дальности обнаружения 600-800 км. С точки зрения национальной безопасности, зависимость от наземных систем мониторинга создает существенные "слепые зоны" в орбитальном пространстве, что может быть использовано для скрытного развертывания средств противокосмической обороны под видом космического мусора.

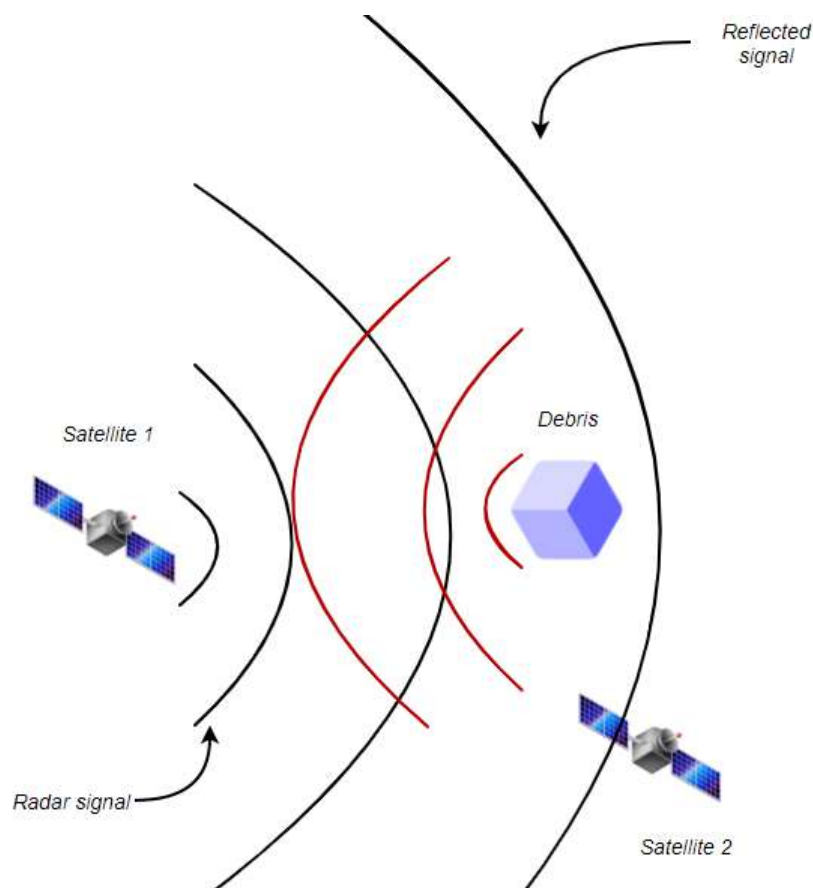


Рис. 2. Применение космических радаров

Сегодня растет интерес к орбитальным системам мониторинга, использующим ударные детекторы для обнаружения частиц субмиллиметрового размера [6, 7], а также оптические сенсоры для объектов размером 0,05-1 см [8]. Развертывание орбитальных систем слежения обладает стратегической важностью, поскольку позволяет осуществлять непрерывный мониторинг космического пространства без ограничений, связанных с атмосферными помехами и географическим расположением наземных станций. Для космических радарных систем характерна значительно меньшая дальность обнаружения – порядка 500 метров [10], что компенсируется их высокой точностью и возможностью работы в различных орбитальных плоскостях.

Преимущества космических радарных систем отличаются значительным многообразием. Главное преимущество заключается в их потенциально меньшей чувствительности к солнечной интерференции, атмосферным искажениям и значительным потерям сигнала при прохождении через атмосферу, что характерно для наземных радарных систем. С национально-безопасной точки зрения, орбитальные системы радиолокационного наблюдения обеспечивают возможность скрытного мониторинга космической обстановки без географических ограничений и с более высокой оперативной готовностью. Однако создание автономной специализированной системы обнаружения космического мусора не является экономически и спектрально эффективным решением, поскольку требует выделения исключительных частотных полос для генерации специализированных радиолокационных сигналов. Это создает серьезные проблемы для оборонного сектора, поскольку перенасыщение частотного спектра может ограничить возможности военных систем коммуникации и раннего предупреждения. В связи с этим возникает объективная необходимость разработки обновленных космических радиолокационных систем, посредством инфраструктурной интеграции. Такая интеграция позволит обеспечить двойное использование частотных ресурсов, что повысит как экономическую эффективность, так и стратегическую целесообразность системы космического наблюдения.

В представленном докладе предлагается перспективная архитектура спутниковой системы обнаружения космического мусора, основанная на принципах многоагентной организации с функциональным разделением ролей. Данный подход позволяет создавать масштабируемые и отказоустойчивые системы мониторинга, что особенно важно для обеспечения непрерывного контроля космического пространства в интересах национальной безопасности.

1. Разработка агентов

Современные вычислительные системы функционируют на основе парадигмы прямого контакта, где оператор самостоятельно инициирует задачи и контролирует выполняемые операции. В контексте кибербезопасности данный подход обеспечивает детальный надзор над процессами, однако порождает уязвимости при недостаточной квалификации пользователя или совершении им ошибочных действий. Альтернативой выступает концепция косвенного управления, где автономные программные агенты оказывают содействие пользователю, что особенно актуально в условиях массовой цифровизации и привлечения неподготовленных операторов. С позиций национальной безопасности, внедрение автономных систем требует разработки специальных механизмов контроля для предотвращения несанкционированной активности и манипуляций критически важными процессами. Принципиально, что агентские системы не становятся обязательным посредником между пользователем и компьютером – сохраняется возможность прямого выполнения операций в обход агентной архитектуры. Данный принцип обеспечивает сохранение суверенитета пользователя над системой, что соответствует stringent-требованиям по защите критической информационной инфраструктуры.

Под интеллектуальным агентом [9] понимается программный комплекс, способный к анализу окружающей операционной среды и автономному принятию решений без надзорного человеческого вмешательства. Подобные системы требуют реализации специальных протоколов верификации для исключения нештатных ситуаций и внешнего вмешательства. Современная таксономия выделяет три фундаментальных класса архитектур интеллектуальных агентов:

- селективные архитектуры, ориентированные на комплексный анализ и стратегическое планирование;
- реактивные архитектуры, функционирующие по принципу "стимул-реакция";
- интегрирующие архитектуры.

Каждая архитектурная парадигма представляет различные компромиссы между автономностью и контролируемостью, что имеет paramount-значение для их применения в системах национальной безопасности.

Селективные архитектуры демонстрируют существенное преимущество в возможности применения строгих формальных методов и апробированных технологий классического искусственного интеллекта. Данный подход обеспечивает эффективное представление знаний в символической форме и их последующую интеграцию в агентные системы. Однако для надежности систем национальной безопасности, формальная верификация селективных архитектур предоставляет дополнительные гарантии корректности функционирования критически важных систем. Надо также учесть, что создание исчерпывающей и точной модели предметной области реального мира, формализация ментальных свойств агентов и процессов логического вывода в рамках селективных структур представляют значительные сложности в технической реализации. Данные ограничения особенно критичны для оборонных применений, где требуется абсолютная предсказуемость поведения систем в нештатных ситуациях.

Реактивные архитектуры предоставляют эффективную реализацию множества относительно простых поведенческих сценариев на заданном множестве откликов на определенные события окружающей среды. Для задач мониторинга космического пространства такой подход идеален для отслеживания орбитальных обломков, где требуется мгновенная реакция на изменение траектории объектов. Фундаментальное ограничение реактивного подхода обнаруживает себя в коренной затруднительности исчерпывающего осмысления обстановки всех потенциальных активностей агентов. По данной причине в подавляющей части современных проектов задействуются интегрирующие архитектуры, обладающие обширным арсеналом возможностей.

Интегрирующие архитектуры эффективно поддерживают моделирование различных уровней абстракции, распределения ответственности и сложности представления знаний, однако характеризуются чрезмерной сложностью формального описания свойств агентов и существенной зависимостью от интуиции разработчика. В контексте космических систем это создает дополнительные риски для обеспечения национальной безопасности, поскольку усложняется верификация корректности функционирования системы. Интегрирующие архитектуры комбинируют обе функциональные парадигмы. Интеллектуальный агент наделяется как способностями к высокоуровневому логическому выводу, так и низкоуровневыми реактивными механизмами. Для спутниковых систем реактивные способности оптимальны для рутинного мониторинга космических обломков, в то время как восстановление связи с внешней средой требует уникальных когнитивных подходов и сложного ситуационного анализа.

Реактивные механизмы применяются для решения стандартных задач, тогда как более сложные когнитивные вызовы требуют задействования мощных систем логического вывода и стратегического планирования. Данное разделение обеспечивает оптимальный баланс между эффективностью и надежностью, что особенно важно для систем двойного назначения и оборонного применения.

2. Формирование системы множества агентов

В контексте достижения исследовательской цели была выбрана архитектура многоагентной системы, описанной в работе [12], с выраженной функциональной дифференциацией ролей. Такой подход особенно перспективен для систем космического мониторинга, где требуется распределение задач между специализированными модулями при обеспечении общей координации.

Многоагентные системы классифицируются как самоорганизующиеся, поскольку они способны находить оптимальные решения без внешнего вмешательства. В условиях космических операций это свойство обеспечивает устойчивость системы даже при частичном отказе компонентов или потере связи с центром управления. Под оптимальностью понимается решение, достигаемое с минимальными энергетическими затратами в условиях строгой ресурсной ограниченности. Для орбитальных систем это критически важно, поскольку энергоэффективность напрямую влияет на срок активного существования космического аппарата.

Ключевое преимущество многоагентной архитектуры заключается в исключительной координируемости. Система может быть модифицирована и расширена без кардинальной переработки основной программы. Это позволяет оперативно адаптировать систему к новым вызовам и угрозам без длительного цикла перепроектирования. Дополнительными преимуществами являются способность к самовосстановлению и устойчивость к сбоям, обеспечиваемые избыточностью компонентов и механизмами самоорганизации.

Для классической многоагентной системы характерны следующие фундаментальные свойства:

- автономность: агенты функционируют полностью или частично независимо;
- частичная «слепота»: отсутствие у агентов полной информации о системе;
- диффузия: отсутствие единого контролирующего агента.

Эти свойства делают многоагентные системы особенно подходящими для распределенного мониторинга космического пространства, где требуется обработка данных из множества источников в условиях неполной информации. В качестве варианта реализации мы рассмотрели модель волчьей стаи [11], состоящей из множества бета-волков и одного альфы-волка. В случае мониторинга космического мусора модель волчьей стаи выглядит следующим образом (Рис. 3).

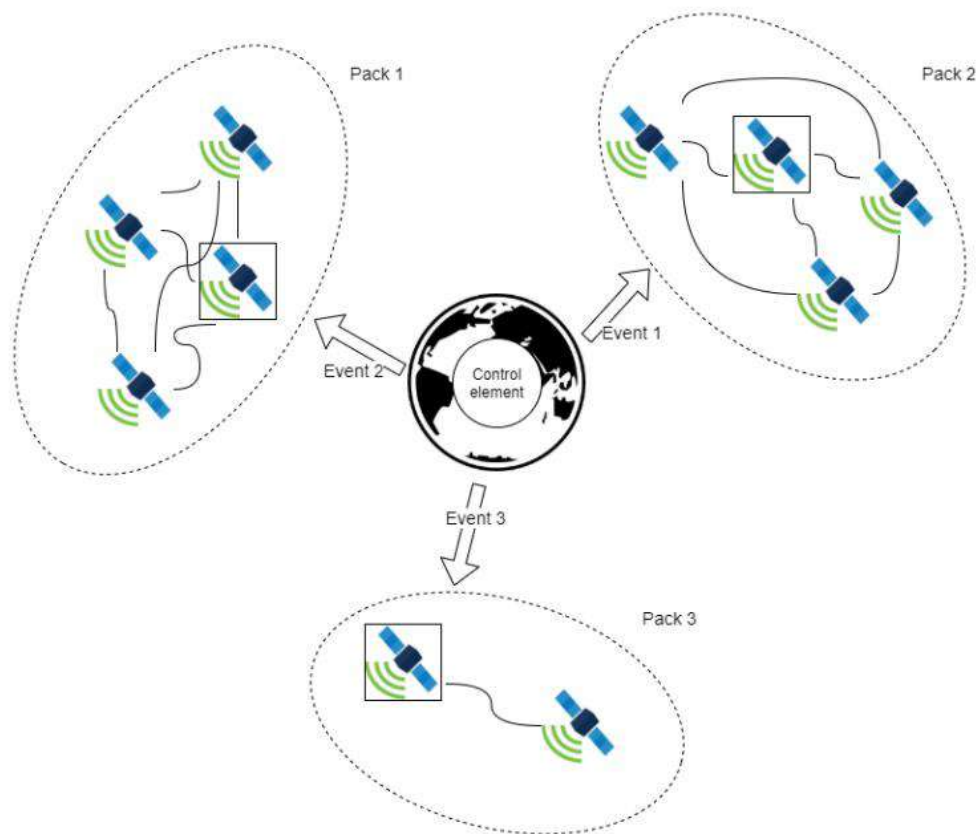


Рис. 3. Схема космического мусора в модели волчьей стаи

В рамках предложенного подхода выдвигается концепция разделения спутниковой группировки на обособленные стаи, что позволяет существенно снизить нагрузку на центральный командный пункт. Децентрализованная архитектура повышает устойчивость системы к потере отдельных элементов и противодействует попыткам радиоэлектронного подавления центра управления. Функциональное распределение предполагает следующую организацию:

- бета-спутники осуществляют постоянное сканирование окружающего пространства с идентификацией космических обломков и передачей данных альфа-спутнику;
- альфа-спутник выполняет функции шлюза связи с командным центром и проводит первичную обработку собираемой информации.

Такая архитектура обеспечивает распределение вычислительной нагрузки и оптимизацию энергопотребления группировки. С технической точки зрения, все аппараты должны быть эквивалентны по конструкции и базовым возможностям. Выбор альфа-спутника осуществляется не по принципу технического превосходства, а на основе оптимального распределения функциональной нагрузки внутри стаи. Данный подход исключает создание единых точек отказа и повышает живучесть системы в условиях космических операций.

Таким образом, роль координатора может выполнять любой член стаи, наиболее подходящий для выполнения задачи в конкретный момент времени. Это обеспечивает подлинную стаевую демократию и позволяет системе адаптироваться к изменяющимся условиям.

В исходный момент спутники находятся в режиме поиска стаи. Аппарат рассылает сигналы идентификации, которые принимаются другими спутниками и переадресуется альфа-спутнику при получении бета-аппаратами. Все коммуникации должны защищаться криптографическими методами для предотвращения несанкционированного доступа и имитации ложных команд. Альфа-спутник инициирует процедуру включения в стаю после подтверждения длительного присутствия аппарата в зоне действия и при наличии технической возможности интеграции. Протоколы взаимодействия должны включать механизмы взаимной аутентификации для исключения проникновения в группу чуждых элементов. В случае одновременного получения приглашений от нескольких групп, спутник-одиночка принимает предложение первой ответившей группы, остальные игнорируются. Алгоритмы

принятия решений должны включать оценку надежности и репутации группы-отправителя. При обнаружении другого спутника-одиночки формируется новая стаевая группа с установлением всех необходимых связей и распределением ролей. Система должна предусматривать механизмы быстрой реконфигурации и перераспределения ролей при изменении состава группировки.

Членство спутника в группе прекращается при нарушении связи со стаей или отсутствии ответа на передаваемые сообщения в течение установленного времени. Данный механизм обеспечивает автономность системы в условиях потери связи с Землей, но требует разработки защищенных протоколов для исключения ложных отключений вследствие радиоэлектронных помех.

Предлагаемая сетевая архитектура реализует гибридную модель, серьезно интегрирующую централизованное управление с диффузной координацией. Это обеспечит преимущества централизованного контроля для стратегических задач с гибкостью распределенных систем для тактических операций. На глобальном уровне развертывается звездный граф, где командный центр выполняет функции системного ядра (Рис. 4). Центр охватывает несколько операций: стратегическое планирование, логистику ресурсов и обзорные мероприятия состояния всех узлов в реальном времени, используя защищенные каналы связи с криптографической защитой данных. Дублирование центра управления с использованием алгоритмов репликации обеспечивает отказоустойчивость, критически важную для систем национальной безопасности. Периферийные элементы – стайные группы – взаимодействуют исключительно с центром, что минимизирует задержки передачи критической информации и упрощает масштабирование системы. Каждый стайной кластер функционирует как автономная тактическая единица, способная выполнять задачи при временном отсутствии связи с центром управления.

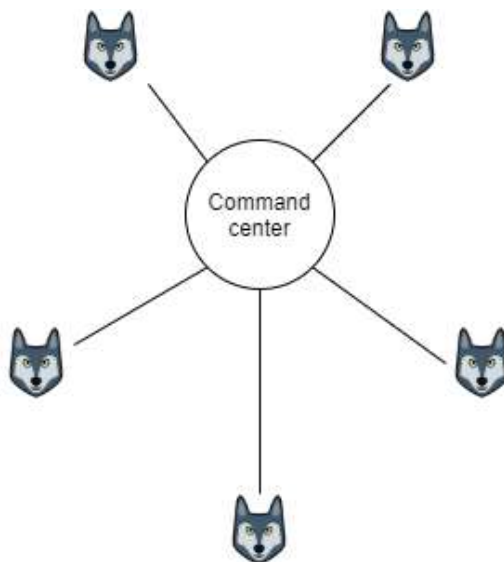


Рис. 4. Граф-звезда волчьей стаи

На уровне межспутниковой координации (Рис. 5) реализуется полный граф между альфа- и бета-узлами, где каждый участник поддерживает прямые соединения со всеми членами группы. Такая архитектура обеспечивает:

- мгновенный обмен телеметрией и данными наблюдений;
- автоматическое перераспределение ролей при выходе узлов из строя;
- синхронизацию групповых маневров и наблюдений;
- высокую пропускную способность для передачи больших объемов данных.

Все соединения защищаются сквозным шифрованием, а аутентификация участников осуществляется с использованием инфраструктуры открытых ключей, что исключает возможность несанкционированного доступа к управлению группировкой.

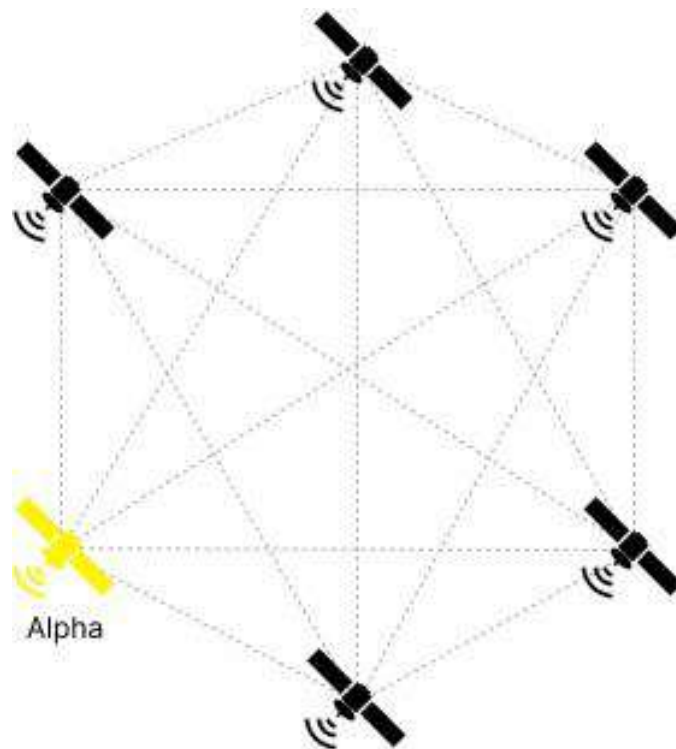


Рис. 5. Полный граф стаи спутников

В рамках предложенной концепции необходимо реализовать отказоустойчивый алгоритм поведения бета-спутника, обеспечивающий надежную передачу данных в условиях нестабильной связи.

Фаза 1: Стандартная операционная процедура:

- первостепенной задачей бета-спутника является установление связи с альфа-узлом своей роевой группировки для ретрансляции собранных данных. Данный подход минимизирует нагрузку на центральный командный центр и обеспечивает оптимальное использование пропускной способности каналов связи;
- в случае отсутствия ответа от альфа-спутника алгоритм предусматривает комплексную диагностику каналов связи и оборудования.

Фаза 2: Процедура восстановления связи:

- инициируется поиск других членов роевой группировки через направленные широкополосные запросы (Рис. 6). Механизм использует алгоритмы георассеивания для оптимизации поиска в условиях ограниченной энергии и времени отклика;
- при обнаружении активных членов группы осуществляется повторная попытка передачи данных через альфа-спутник с применением протоколов квитирования.

Фаза 3: Аварийный режим работы:

- при полной потере связи с группировкой активируется прямой канал связи с командным центром с передачей как собранных данных, так и диагностической информации о состоянии роя. Все передаваемые данные защищаются криптографическими алгоритмами для предотвращения перехвата и обеспечения целостности информации;
- реализуется механизм приоритезации трафика, обеспечивающий передачу наиболее критичных данных в условиях ограниченной пропускной способности.

Фаза 4: Процедуры восстановления работоспособности:

- при отсутствии ответа от всех адресатов выполняется полная диагностика систем спутника с использованием встроенных средств телеметрии. Алгоритм включает проверку энергосистемы, коммуникационного оборудования и систем ориентации;
- после диагностики осуществляется циклический повтор попыток установления связи с экспоненциальным увеличением интервалов между запросами.

Фаза 5: Активация аварийного режима:

- после многократных безуспешных попыток спутник переходит в режим сохранения энергии и начинает передачу сигналов бедствия. Сигналы бедствия передаются на резервных частотах и

содержат информацию о местоположении, состоянии систем и причине перехода в аварийный режим;

- реализуется алгоритм ожидания помощи или принятия решения о выводе спутника из эксплуатации в случае критических неисправностей.

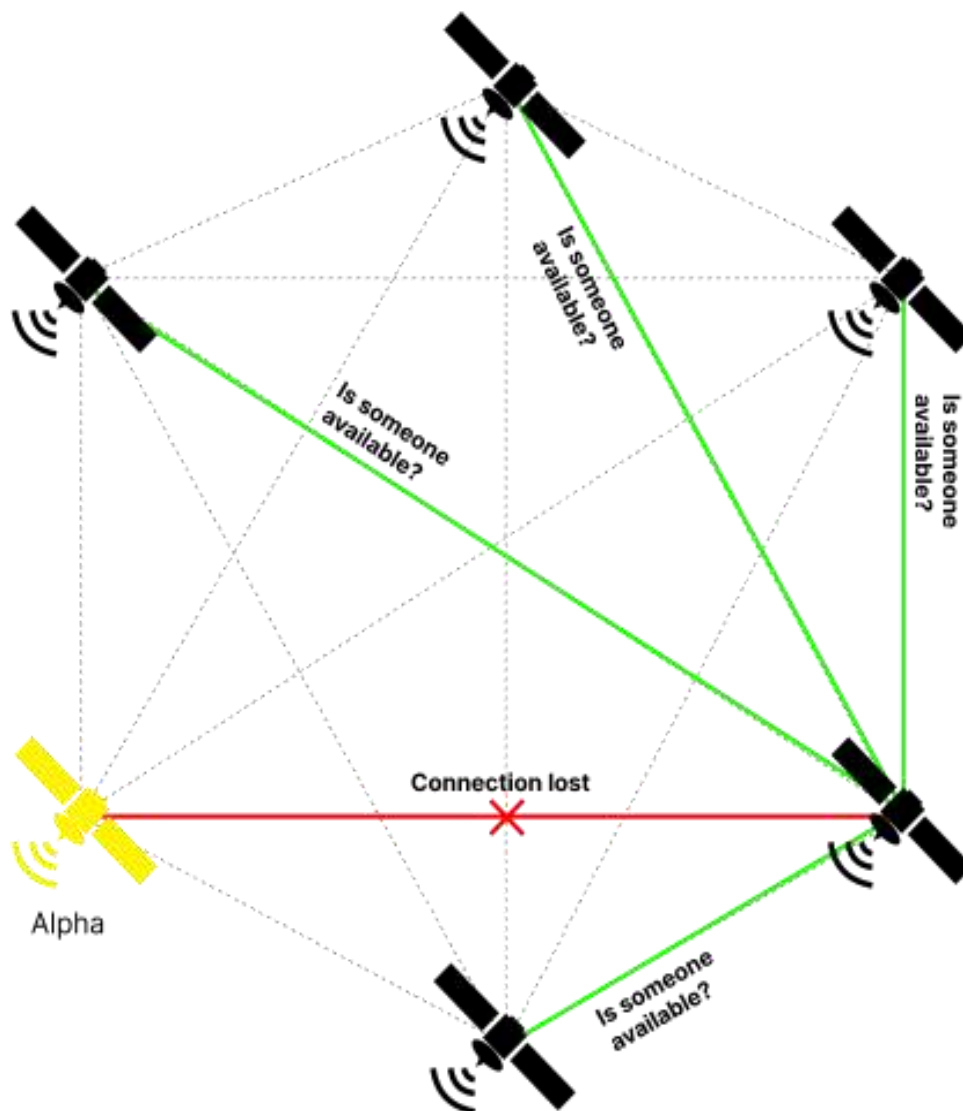


Рис. 6. Поиск соседей

Данный многоуровневый подход обеспечивает максимальную надежность передачи данных и отказоустойчивость системы в условиях космических операций.

Критически важным аспектом исследования является разработка надежного механизма выбора альфа-спутника [13]. Алгоритм должен обеспечивать безусловное определение лидера даже в условиях частичной потери связи и ограниченной пропускной способности каналов.

Состояния узлов в процессе выборов:

- неактивное состояние;
- пассивный режим: предпроцессное состояние;
- статус кандидата: состояние узла после активации, предполагающее потенциальное лидерство.

Переход между состояниями регулируется детерминированными алгоритмами виртуального кольца (возобновления сигнала) для исключения неоднозначностей в распределенных системах.

Виртуальное кольцо представляет собой связный граф циклической структуры, где каждый узел соединен ровно с двумя соседями.

Данная архитектура обеспечивает:

- n узлов и ровно n соединений в системе;
- минимизацию количества необходимых соединений;
- предсказуемую маршрутизацию сообщений.

Кольцевая топология может быть:

- однонаправленной – коммуникация только по часовой или против часовой стрелки;
- двунаправленной – возможность обмена сообщениями в обоих направлениях.

Выбор конфигурации зависит от требований к пропускной способности и отказоустойчивости.

Последовательная процедура выбора лидера:

- все процессоры инициализируются в пассивном состоянии до момента активации;
- при активации узлы переходят в статус кандидатов и включаются в виртуальное кольцо;
- кандидаты устанавливают идентификацию предшественников в кольцевой структуре;
- реализуется схема приоритетов, где узлы с высшим приоритетом запрашивают информацию у низкоприоритетных кандидатов;
- кандидаты с низким приоритетом переходят в неактивное состояние после предоставления информации;
- кандидат с максимальным приоритетом завершает процедуру, убедившись в отсутствии других активных участников.

Алгоритм обеспечивает детерминированное определение лидера за конечное число шагов, что критически важно для систем реального времени.

Преимущества подхода:

- гарантированное определение единственного лидера;
- устойчивость к частичным отказам сети;
- минимизация служебного трафика;
- возможность динамической реконфигурации при изменении состава группировки.

Приоритетность выбора определяется на основе коэффициента полезного действия спутника. Предполагается, что наиболее полезными считаются спутники, обнаружившие наибольшее количество космических обломков. При этом устанавливается обратно пропорциональная зависимость между эффективностью обнаружения и приоритетом в системе выбора лидера.

Данный подход приводит к парадоксальной ситуации: альфа-спутник, выполняющий координационные функции, с операционной точки зрения потенциально является наименее эффективным членом группировки в вопросах поиска обломков.

Важным преимуществом предложенного метода является решение проблемы масштабируемости за счет исключения необходимости организации связи всех спутников напрямую с командным центром. Представленная архитектура соответствует принципам операционной эффективности и обладает значительным потенциалом для масштабирования.

3. Выводы

В представленном исследовании была изучена проблема организации коммуникации между спутниками, осуществляющими обнаружение космических обломков. Для решения этой задачи был предложен многоагентный подход с функциональным разделением ролей внутри спутниковых группировок. С точки зрения государственной безопасности, такая архитектура обеспечивает устойчивость системы к потере отдельных элементов и противодействует попыткам радиоэлектронного подавления каналов связи. Разработанная в ходе исследования сетевая топология демонстрирует высокую гибкость и предоставляет возможности для многовариантного масштабирования системы. Децентрализованный характер системы минимизирует риски единой точки отказа, что критически важно для обеспечения непрерывности мониторинга космического пространства в интересах национальной безопасности. Были созданы и проанализированы алгоритмы установления связи между спутниками, формирования и присоединения к группам, а также протоколы поведения в аварийных ситуациях и критерии выбора ведущего спутника в группе.

Литература

1. *Darya A.M., Fernini I.* Analysis of space debris re-entry over the Arabian Peninsula (2004 to 2018) // 2018 International Conference on Signal Processing and Information Security (ICSPIS). – IEEE, 2018. – С. 1–4.
2. *Sridharan R., Pensa A.F.* Us space surveillance network capabilities // Image Intensifiers and Applications; and Characteristics and Consequences of Space Debris and Near-Earth Objects. – SPIE, 1998. – Т. 3434. – С. 88–100.
3. <https://astroscale.com/wp-content/uploads/2022/02/ELSA-d-Press-Kit-2022-Lo-Res.pdf>
4. *Klinkrad H.* Space debris: models and risk analysis. – Springer Science & Business Media, 2006.
5. *Xi J. et al.* Space debris detection using feature learning of candidate regions in optical image sequences // IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 150864–150877.

6. *Zhao H. et al.* Research on the visibility of low-orbit debris using space-borne radar // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2015. – T. 9, № 1. – C. 31–37.
7. *Felicetti L., Emami M.R.* A multi-spacecraft formation approach to space debris surveillance // Acta Astronautica. – 2016. – T. 127. – C. 491–504.
8. *Cerutti-Maori D. et al.* Preliminary concept of a space-based radar for detecting mm-size space debris // Proc. 7th European Conf. on Space Debris, Darmstadt, Germany. – 2017.
9. *Sarma V.V.S.* Intelligent agents // IETE Journal of Research. – 1996. – T. 42, № 3. – C. 105–109.
10. *Sturm C., Wiesbeck W.* Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing // Proceedings of the IEEE. – 2011. – T. 99, № 7. – C. 1236–1259.
11. *Sánchez A.V., Weitzenfeld A.* Multi-agent formations in a herd of wolves hunting model. – Technical report, Instituto Tecnológico Autónomo de México, Mexico City, Mexico, 2004.
12. *Chan-Zheng C., Carvajal-Godínez J.* A multi-agent system framework for miniaturized satellite // Revista Tecnología en Marcha. – 2019. – T. 32, № 1. – C. 54–67.
13. *Ma X. et al.* Leader selection and dynamics analysis under leader-based collective bargaining for buyers' alliance // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2021. – T. 31, № 10. – C. 2150156.