АНАЛИЗ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ В СЕТЯХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Бурлаков С. О.[1], Федорова А. В.[2]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-66-74

Ключевые слова: *спутниковая связь, военные сети связи, адаптивное распределение ресурса, DAMA, MF-TDMA, помехоустойчивость, система управления и распределения радиочастотным ресурсом, beam hopping, глубинное обучение с подкреплением, помехоустойчивость.*

Аннотация

Цель работы: *состоит в анализе имеющих методов адаптивного распределения ограниченного ресурса ретранслятора для дальнейшего совершенствования метода адаптации.*

Результаты исследования: *рассматриваются подходы к адаптивному распределению ресурса в сетях спутниковой связи, функционирующих в условиях непреднамеренных и преднамеренных помех. Показано, что в современных военных сетях спутниковой связи распределение ресурса не может рассматриваться только как задача повышения спектральной эффективности: одновременно оно связано с обеспечением устойчивости управления, живучести сети, защиты от радиоэлектронного подавления и сохранения требуемого качества обслуживания. Проанализированы методы DAMA/MF-TDMA, адаптивного кодирования и модуляции, динамического распределения мощности и полосы, beam hopping (переключение лучей), когнитивного радиодоступа, теоретико-игрового управления ресурсами, машинного и глубокого обучения. Сделан вывод, что наиболее перспективным направлением является интеграция классических защищенных SATCOM-решений с многоагентными алгоритмами управления ресурсом, учитывающими помеховую обстановку, приоритеты трафика и ограничения полезной нагрузки спутника. Выявлены основные направления адаптации: предоставления ресурса по требованию, адаптивное кодирование и модуляция, динамическое переключение лучей, пространственная фильтрация, теория игр и методов машинного обучения. Результаты применимы при обосновании алгоритмов повышения помехозащищенности сетей спутниковой связи с предоставлением каналов по требованию. Полученные результаты позволяют повысить помехозащищенность в имеющихся сетях с предоставлением каналов по требованию в условиях ограниченного ресурса ретранслятора.*

Научная новизна: *в статье предствлено обобщение подходов на нескольких уровнях управления ресурсом, проведен анализ достоинств и недостатков, сделаны выводы по возможности применения комплексных подходов к повышению помехозащищенности в военных сетях спутниковой связи тактического звена управления с учетом особенностей их использования.*

Введение

Спутниковая связь в военных сетях выполняет не только функцию передачи информации на большие расстояния, но и управления различными группировками в условиях их территориального рассредоточения, разрушения наземной инфраструктуры и радиоэлектронного противодействия. В отличие от гражданских спутниковых систем, где основными критериями выступают пропускная способность, стоимость полосы и качество пользовательского сервиса, военные системы должны обеспечивать устойчивость информационного обмена при неполной доступности каналов, ограниченном энергетическом ресурсе ретранслятора и меняющейся помеховой обстановке.

В таких условиях распределение ресурса ретранслятора транформируется в многоуровневую задачу управления живучестью сети, где одновременно учитываются приоритеты абонентов, требуемая задержка, состояние линии, уровень помех, доступная мощность передачи, возможность смены несущих и методов кодирования. Поэтому адаптивное распределение ресурса следует рассматривать как один из ключевых механизмов обеспечения устойчивости военных спутниковых сетей при радиоэлектронном воздействии.

Проблема адаптивного распределения ресурса особенно важна при воздействии преднамеренных помех. Помеха уменьшает отношение сигнал-шум, вызывает снижение качества каналов, нарушает синхронизацию, затрудняет установление соединения и приводит к резкому росту задержек. В этих условиях статическое распределение частот, временных интервалов,

1 ***Бурлаков Сергей Олегович***, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Военной академии связи им. С. М. Будённого. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: soburlakov@yandex.ru

2 ***Федорова Александра Вячеславна***, адъюнкт Военной академии связи им. С. М. Будённого. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: neboskreb67@yandex.ru

мощности или сигнально-кодовых конструкций (СКК) оказывается недостаточным. Система должна в реальном времени перераспределять ограниченный ресурс ретранслятора между абонентами, лучами, несущими, потоками пакетов трафика и уровнями приоритета абонентов.

Исследования показывают, что эволюция методов распределения ресурса в спутниковых сетях прошла несколько этапов. На первом этапе доминировали схемы фиксированного доступа и классические DAMA-подходы (Demand Assigned Multiple Access, предоставление каналов по требованию), ориентированные на эффективное использование ограниченной полосы частот [6]. Далее получили развитие методы адаптивного кодирования и модуляции, динамического управления мощностью и многолучевого планирования [7–10]. В последние годы акцент сместился к интеллектуальному управлению ресурсами: когнитивным спутниковым сетям, теории игр, онлайн-обучению, глубокому обучению с подкреплением и многоагентным методам [11–15].

Особенности распределения ресурса в военных спутниковых сетях заключаются в том, что ресурс ретранслятора включает в себя полосу частот, несущие, временные слоты, мощность передатчиков, сигнально-кодовые конструкции, лучи, буферные ресурсы, приоритеты очередей и маршруты передачи трафика. В многолучевых HTS/VHTS-системах (HTS – High Throughput Satelitte, VHTS – Very High Throughput Satelitte) дополнительно распределяются мощность между лучами, полоса между зонами обслуживания, временные интервалы подсветки лучей и ресурсы шлюзовых станций.

Военная специфика проявляется в нескольких ограничениях. Во-первых, часть трафика имеет жесткие требования к задержке и доступности: сигналы управления, данные разведки, телеметрия, оповещение и данные местоположению не могут обслуживаться по тем же правилам, что и фоновый информационный обмен. Во-вторых, сеть должна работать при неравномерной нагрузке – отдельные районы боевых действий могут внезапно требовать кратного увеличения пропускной способности. В-третьих, помеховая обстановка может быть неоднородной: один луч, несущая или район могут находиться под интенсивным радиоэлектронным подавлением, тогда как соседние ресурсы сохраняют работоспособность.

В связи с этим адаптивное распределение ресурса в военных сетях решает не одну, а группу взаимосвязанных задач: поддержание требуемого уровня сигнал-шум, перераспределение мощности ретранслятора, выбор устойчивой модуляции, изменение частотного или временного плана, приоритизация трафика, исключение перегруженных участков, балансировка нагрузки, восстановление связи после деградации и снижение эффективности воздействия помех.

DAMA и MF-TDMA как основы адаптивного доступа

Методы DAMA и MF-TDMA целесообразно рассматривать как базовый уровень адаптивного управления доступом к спутниковому ресурсу. Их преимущество состоит в том, что емкость ретранслятора не закрепляется за абонентским терминалом, а выделяется по мере возникновения потребности перераспределения трафика. Для военных сетей это особенно важно, поскольку интенсивность информационного обмена между пунктами управления, мобильными группами и отдельными терминалами имеет выраженный нестационарный характер.

В условиях помех алгоритм DAMA-распределения может выполнять не только функцию экономии полосы, но и функцию перераспределения устойчивости: критический трафик получает приоритетные интервалы, менее значимые потоки переводятся в режим ожидания, а ресурс деградированных несущих может быть временно перераспределен. Ограничением такого подхода является зависимость от качества служебных каналов запроса и доведения выделенного ресурса. Если этот канал подавлен или перегружен, эффективность DAMA резко снижается. Поэтому в защищенных спутниковых сетях предоставление каналов по требованию должен применяться совместно с резервированием управляющих процедур, устойчивыми СКК и механизмами приоритетного доступа.

Исследования DAMA выделяют централизованные, распределенные и иерархические варианты управления. Централизованная модель удобна для контроля приоритетов и учета общей загрузки, но уязвима к задержкам и отказу управляющего узла. Распределенная модель повышает живучесть, но усложняет координацию абонентских терминалов. Иерархическая модель сочетает преимущества обоих подходов и ближе к структуре военных сетей, где существуют уровни управления.

В современных DVB-RCS/RCS2 (Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite, двусторонняя интерактивная спутниковая связь с использованием малых спутниковых терминалов (VSAT)) и MF-TDMA-сетях (Multy Friquency Time Devision Multiple Access) DAMA развивается в сторону динамического планирования кадров. Терминалы получают слоты в обратном канале

с учетом заявленной нагрузки, класса обслуживания, доступной полосы, кодирования и текущего состояния канала [8]. При воздействии помех DAMA может использоваться для переназначения трафика на менее деградированные несущие или для временного увеличения ресурса наиболее востребованным абонентам. Ограничением DAMA является зависимость от качества служебного канала: если помеха нарушает процедуру запроса и назначения ресурса, эффективность адаптации снижается. Поэтому для военных сетей DAMA целесообразно сочетать с резервированием управляющих каналов, приоритетными процедурами доступа и устойчивыми СКК.

Адаптивное кодирование и модуляция

Адаптивное кодирование и модуляция позволяют изменять физический режим передачи в зависимости от текущего состояния линии. При снижении отношения сигнал-шум система переходит к более устойчивым режимам, уменьшая информационную скорость, но сохраняя возможность доставки сообщений. При улучшении условий могут использоваться более спектрально эффективные схемы. В военной спутниковой сети ценность ACM (адаптивное кодирование и модуляция) заключается не только в повышении средней пропускной способности, но и в обеспечении управляемой деградации: при ухудшении канала сеть не прекращает работу, а снижает скорость обслуживания менее критичных потоков.

Вместе с тем ACM не следует рассматривать как самостоятельное средство противодействия помехам. Этот механизм компенсирует ухудшение энергетических условий линии, но не устраняет источник воздействия. Поэтому на практике ACM должен быть связан с управлением мощностью, выбором несущей, пространственной фильтрацией и политиками приоритета трафика. В условиях помех ACM выполняет функцию «мягкой деградации» – вместо полного разрыва связи система снижает информационную скорость, сохраняя передачу приоритетных сообщений. ACM также может сочетаться с адаптивным выбором размера кадра, изменением скорости кодирования, интерливингом, повторной передачей и пакетной коррекцией ошибок.

Однако ACM имеет ограничения. Во-первых, он требует достоверной оценки состояния канала. В условиях интеллектуальных или импульсных помех измерение отношения сигнал-шум может быть нестабильным. Во-вторых, снижение кратности модуляции увеличивает время передачи сообщения, что создает дополнительную нагрузку на механизм управления ресурсом. В-третьих, ACM сам по себе не устраняет помеху, а только адаптирует режим передачи. Поэтому в защищенных системах рассматривается как часть более широкой архитектуры: совместно с распределением мощности, пространственной фильтрацией, частотной перестройкой и приоритизацией трафика.

Динамическое распределение мощности ретранслятора, полосы частот и несущих

Динамическое распределение мощности и полосы особенно важно для многолучевых спутниковых систем, где нагрузка и помеховая обстановка различаются по зонам обслуживания. Статический частотно-энергетический план в таких условиях приводит либо к недоиспользованию ресурса в спокойных районах, либо к дефициту в районах с высокой нагрузкой и активным радиоэлектронным воздействием. Поэтому современные подходы переходят к адаптивной нагрузке (demand-aware) и помехозащищенному (interference-aware) управлению ресурсом, при котором алгоритм адаптивного распределения ресурса учитывает не только запросы пользователей, но и степень деградации качества отдельных каналов.

При воздействии помех увеличение мощности передачи в пораженном луче может восстановить качество канала, однако такое решение не всегда оптимально. Оно расходует общий энергетический ресурс ретранслятора, может усиливать межлучевую интерференцию и снижать доступность ресурса для других абонентов. Более эффективной является комбинированная адаптация: изменение мощности дополняется сменой кодово-модуляционного режима, перераспределением временных интервалов, переносом части нагрузки и приоритизацией сообщений.

Методы динамического распределения мощности можно разделить на оптимизационные, эвристические и обучающиеся. Оптимизационные методы формулируют задачу максимизации суммарной пропускной способности, минимизации неудовлетворенного спроса или обеспечения справедливости между лучами. Их преимущество – математическая обоснованность. Недостаток – высокая вычислительная сложность при большом числе лучей, терминалов и ограничений. Эвристические методы быстрее, но могут уступать по качеству решения. Обучающиеся методы, включая глубокое обучение с подкреплением, позволяют формировать политику распределения ресурса на основе накопленного опыта [13].

При воздействии помех динамическое распределение мощности решает две противоположные задачи. С одной стороны, повышение мощности в пораженном канале может восстановить требуемый SINR (Signal Interference Noise Ratio). С другой стороны, чрезмерное увеличение мощности расходует ограниченный ресурс ретранслятора, повышает межлучевую интерференцию и может демаскировать передачу. Поэтому перспективные методы используют не простое «усиление», а многокритериальную адаптацию: изменение мощности, полосы, очередности обслуживания, модуляции и направления луча.

«Прыгающий луч» и пространственно-временное распределение ресурса

«Прыгающий луч» (beam hopping) это передовая технология в спутниковой связи, которая развивает идею адаптации под спрос (Demand-Aware), динамически распределяя мощность и частотный ресурс спутника между разными географическими зонами в реальном времени. Если в классической технологии DAMA базовая станция выделяет частотные каналы по требованию, то при beam hopping сам спутник физически переключает направление своих лучей туда, где в данный миллисекундный отрезок времени зафиксирован наибольший трафик. Для военных сетей этот принцип важен тем, что он дает возможность учитывать не только распределение пользователей, но и локализацию помехового воздействия.

При ухудшении условий в отдельной зоне механизм пространственно-временного управления ресурсом может изменить длительность обслуживания лучей, перераспределить емкость между соседними районами, временно ограничить передачу второстепенного трафика или сформировать альтернативную конфигурацию покрытия. При этом эффективность метода зависит от точности прогноза нагрузки, синхронизации терминалов, возможностей полезной нагрузки спутника и допустимых задержек для приоритетных потоков. Для низкоорбитальных систем и спутников с высокой пропускной способностью (HTS-систем) это особенно важно, так как распределение пользователей и трафика меняется во времени, а бортовые энергетические ресурсы ограничены [14].

В условиях помех «прыгающий луч» может использоваться как средство пространственно-временной адаптации. Если отдельный район или луч деградирован, система может изменить расписание подсветки, временно перераспределить ресурсы соседним лучам, ограничить обслуживание менее приоритетного трафика или использовать альтернативную конфигурацию покрытия. В низкоорбитальных сетях «прыгающий луч» дополнительно связан с динамикой орбитального движения, сменой зон видимости и ограничениями по интерференции с геостационарными системами [14].

Реализация динамического переключения лучей требует наличие на борту космического аппарата фазированной антенной решетки. Это обусловлено тем, что при таком способе распределения ресурса ретранслятора спутник должен формировать несколько зон обслуживания и изменять последовательность их направления во времени в соответствии с обстановкой. Дополнительным условием эффективного применения метода является точное знание текущего местоположения космического аппарата обслуживаемых земных станций.

Методы планирования beam hopping включают жадные алгоритмы, генетические алгоритмы, кластеризацию неинтерферирующих сот, смешанно-целочисленную оптимизацию и глубокое обучение с подкреплением. Преимущество таких систем заключается в гибкости использования времени, мощности и частоты. Ограничения связаны с необходимостью точного планирования, синхронизации терминалов, учета межлучевой интерференции и обеспечения непрерывности обслуживания критических абонентов.

Пространственная фильтрация и адаптивное формирование диаграммы направленности

Еще одно направление исследований – использование антенных решеток, адаптивного формирования луча и пространственной фильтрации. В наземных станциях спутниковой связи применяются алгоритмы типа MVDR (Minimum Variance Distortionless Response – адаптивный алгоритм пространственной фильтрации (формирования луча)), которые минимизируют суммарную мощность помехи и шума при сохранении усиления в направлении полезного сигнала [15]. Такие методы позволяют создавать провалы диаграммы направленности в направлении источника помехи и тем самым повышать выходное отношение сигнал-шум.

В военных сетях спутниковой связи пространственные методы важны по двум причинам. Во-первых, они не требуют полного изменения сетевого плана и могут работать на уровне земных станций. Во-вторых, они совместимы с другими видами адаптации: ACM, управлением мощностью, beam hopping и частотной перестройкой. В современных защищенных системах спутниковой связи пространственная адаптация рассматривается как элемент «fight-through» –

способности продолжать обмен информацией при активном воздействии помех.

Ограничения пространственных методов связаны с числом антенных элементов, точностью оценки направления прихода сигнала и помехи, калибровкой решетки и вычислительной сложностью. Кроме того, если помеха находится близко к направлению полезного сигнала, возможности пространственного подавления ограничены. Поэтому MVDR и родственные методы обычно рассматриваются не как единственная защита, а как компонент многоуровневой архитектуры.

Когнитивные спутниковые сети и динамический доступ к спектру

Когнитивная спутниковая связь предполагает, что система способна анализировать спектральную обстановку, обнаруживать свободные или менее загруженные участки спектра и адаптивно выбирать несущие, полосу и мощность. Когнитивный подход часто рассматривается применительно к совместному использованию спектра спутниковыми и наземными сетями [9]. Для военных сетей этот подход интересен тем, что он позволяет учитывать не только собственную нагрузку, но и внешнюю электромагнитную обстановку.

В условиях преднамеренных помех когнитивный доступ может использоваться для выбора менее пораженных частотных участков, перераспределения трафика между несущими и обнаружения аномальной активности. Однако применение когнитивных методов в военной спутниковой среде имеет особые ограничения: необходимость доверенной оценки спектра, защита служебной информации, устойчивость алгоритмов к ложным измерениям и противодействие интеллектуальному противнику, способному имитировать свободные или занятые каналы.

Теоретико-игровые методы и онлайн-обучение

При воздействии преднамеренных помех распределение ресурса становится конфликтной задачей. Передающая сторона стремится распределить мощность и каналы так, чтобы сохранить связь, а постановщик помех – нарушить максимальное число каналов или снизить пропускную способность. Поэтому исследователи активно используют теорию игр: игры Нэша, Stackelberg games, Blotto games, стохастические и повторяющиеся игры [11].

В теоретико-игровой постановке каналы, мощность и частоты рассматриваются как стратегические ресурсы. Если система заранее не знает стратегию противника, применяются методы онлайн-обучения, минимизации regret (разницы между качеством работы текущего алгоритма и качеством работы «идеального» (оптимального) алгоритма, который заранее знал бы все будущие данные) и адаптивного выбора действий. Например, в работах по спутниковой связи задача многоканального распределения мощности формулируется как конфликт между связной системой и помеховым воздействием; для однократного взаимодействия применяются приближения равновесия, а для повторяющихся сценариев – алгоритмы онлайн-обучения [11].

Преимущество таких методов – способность учитывать активное противодействие, а не только случайные изменения канала. Недостаток – зависимость от корректности модели противника. В реальных военных условиях постановщик помех может действовать неполно, нерегулярно или менять стратегию. Поэтому игровые методы наиболее эффективны в сочетании с измерениями реальной обстановки и алгоритмами обучения.

Методы машинного и глубокого обучения

В последние годы ключевым направлением стало применение машинного обучения и глубокого обучения с подкреплением для распределения спутникового ресурса. Обучающийся агент получает состояние сети: загрузку лучей, качество каналов, уровень помех, очереди пакетов, остаток мощности и требования пользователей. Критерий оптимизации формируется на основе совокупности показателей: пропускной способности, задержки, степени удовлетворения спроса, энергоэффективности и устойчивости к помехам [7–9].

Преимущество глубокого обучения с подкреплением (DRL) состоит в возможности работать с высокоразмерными и нелинейными задачами, где классическая оптимизация слишком медленна. Например, в задачах непрерывного распределения мощности в гибких HTS-системах применяются алгоритмы PPO (Proximal Policy Optimization), позволяющие минимизировать неудовлетворенный спрос и расход мощности [13]. В низкоорбитальных системах спутниковой связи многоагентное обучение используется для распределенного выбора спектрального доступа в условиях помех и канальной интерференции [14].

Ограничения ML/DRL-методов включают в себя необходимость наличие массива обучающих данных, риск переобучения на симуляционных сценариях, сложность объяснения решений, уязвимость к adversarial-воздействию (состязательные атаки) и необходимость гарантировать

безопасное поведение при неизвестной помеховой обстановке. Поэтому в военных системах такие методы должны применяться с механизмами контроля, ограничениями безопасности и приоритетности обслуживания, а также возможностью возврата к проверенным эвристическим режимам.

Области применения адаптивных методов

Рассмотренные методы применяются в нескольких типах спутниковых систем.

Защищенные военные сети спутниковой связи. В таких системах используются помехоустойчивые сигнально-кодовые конструкции, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, методы расширения спектра сигнала, адаптивное кодирование, приоритетный доступ, мониторинг помеховой обстановки и динамическое перераспределение ресурса. Защищенные тактические режимы передачи и аналогичные решения ориентированы на сохранение связи в условиях радиоэлектронного противоборства [16].

Геостационарные спутниковые системы высокой и сверхвысокой пропускной способности. Для них характерны многолучевые зоны покрытия, высокая суммарная емкость и необходимость адаптивного распределения мощности и полосы между лучами. Такие системы используют управление ресурсом с учетом потребности в пропускной способности и текущей помеховой обстановки [10].

Низкоорбитальные и негеостационарные спутниковые группировки. Здесь ключевыми методами становятся динамическое переключение лучей, перспективная маршрутизация трафика через межспутниковые линии связи, распределенное управление, прогнозирование трафика и многоагентные методы машинного обучения. Динамика орбитального движения делает статическое планирование ресурса малопригодным [14].

Интегрированные спутниково-наземные сети. В таких системах ресурс распределяется с учетом совместного использования радиочастотного спектра, взаимного влияния между спутниковым и наземным сегментами, а также требований перспективных сетей связи пятого и шестого поколений с использованием неназемного сегмента [9].

Тактические мобильные сети. Для них важны малогабаритные терминалы, ограниченный энергетический ресурс, быстрое развертывание и устойчивость к локальному помеховому воздействию. Здесь применимы гибридные схемы доступа с предоставлением ресурса по запросу, адаптивная маршрутизация, когнитивный выбор каналов и упрощенные алгоритмы машинного обучения.

Перспективные направления исследований

Проведенный анализ работ позволяет выделить несколько перспективных направлений.

Первое направление связано с созданием гибридных алгоритмов, объединяющих методы математической оптимизации и машинного обучения. Такие методы позволяют учитывать строгие ограничения безопасности и одновременно адаптироваться к нестационарной помеховой и сетевой обстановке.

Второе направление – многоагентное распределенное управление низкоорбитальными спутниковыми группировками. В условиях роста числа спутников централизованная система управления ресурсами становится узким местом, поэтому требуются алгоритмы, способные принимать локальные решения и согласовывать их через ограниченный обмен служебной информацией.

Третье направление связано с обеспечением устойчивости алгоритмов машинного обучения к преднамеренному искажению входных данных. Если противник способен влиять на результаты измерения радиочастотного спектра или создавать ложные признаки помехового воздействия, обучающиеся алгоритмы могут принимать ошибочные решения. Для военных сетей спутниковой связи необходимы методы доверенной оценки состояния, проверки принимаемых решений и защищенного обучения.

Четвертое направление – интеграция распределения ресурса с политиками приоритизации трафика. Военные сети должны распределять ресурс не только по критерию пропускной способности, но и с учетом значимости трафика, оперативной обстановки и допустимого риска потери связи.

Пятое направление – применение цифровых двойников спутниковых сетей. Они позволяют заранее моделировать помеховые сценарии, обучать алгоритмы распределения ресурса и проверять устойчивость решений до внедрения в реальную сеть.

Заключение

Проведенный обзор показывает, что методы адаптивного распределения ресурса в военных сетях спутниковой связи развиваются от отдельных механизмов канальной адаптации к интегрированным системам многоуровневого управления. Сети с предоставлением ресурса по запросу и многочастотным доступом с временным разделением обеспечивают гибкое

назначение спутникового ресурса в зависимости от текущей потребности абонентов. Адаптивное кодирование и модуляция поддерживают устойчивость физического канала связи, динамическое распределение мощности и полосы частот позволяют реагировать на локальное ухудшение условий доставки сообщений, динамическое переключение лучей повышает пространственно-временную гибкость сети, а методы машинного обучения и теории игр дают возможность учитывать нестационарную и конфликтную природу помеховой обстановки.

Наиболее рациональным подходом при ограниченном ресурсе и наличии преднамеренных помех является адаптивное распределение ресурса, при котором параметры передачи изменяются в зависимости от состояния каналов, уровня помех, приоритета трафика и текущей потребности абонентов. Особенно важное значение такой подход имеет в сетях с предоставлением ресурса по запросу, где ограниченный частотный ресурс не закрепляется за абонентами постоянно, а выделяется в соответствии с их фактической потребностью. Это позволяет более эффективно использовать ограниченный ресурс ретранслятора, поддерживать обслуживание критически важных сообщений и снижать влияние помех на устойчивость управления.

Опыт показывает, что дальнейшее развитие таких систем связано с переходом от статических и централизованных схем к гибким, многоуровневым и интеллектуальным механизмам управления. Классические методы доступа с предоставлением ресурса по требованию и многочастотного доступа с временным разделением сохраняют значение как основа распределения ресурса ретранслятора, однако в условиях радиоэлектронного противоборства они должны дополняться адаптивным кодированием и модуляцией, динамическим управлением мощностью, динамическим переключением лучей, пространственной фильтрацией и когнитивным анализом радиочастотной обстановки.

Для спутниковых сетей тактического звена управления особую значимость приобретает применение методов машинного обучения. Такие методы позволяют прогнозировать изменение нагрузки, выявлять признаки ухудшения канала, выбирать более устойчивые режимы передачи и перераспределять ресурс между абонентами. В решении задач повышения помехозащищенности важную роль играет теория игр, поскольку воздействие преднамеренных помех имеет конфликтный характер. Игровые модели позволяют описывать такое взаимодействие как задачу выбора стратегий, учитывать возможные действия противника и формировать более устойчивые правила распределения мощности, частот, временных интервалов и режимов передачи. Вместе с тем интеллектуальные методы не могут применяться в военных системах без ограничений. Для них необходимы проверка корректности принимаемых решений, защита от ложных данных, доверенная оценка состояния радиоканала, объяснимость результатов и возможность безопасного перехода к резервным режимам работы.

Наиболее перспективной является архитектура адаптивного управления, в которой ресурс распределяется не по одному критерию, а по совокупности факторов: помеховая обстановка, приоритет трафика, состояние канала, энергетический ресурс, доступность лучей, требования к качеству обслуживания и оперативная значимость абонентов. Такая архитектура позволяет не только повысить эффективность использования спутникового ресурса, но и обеспечить устойчивость управления войсками в условиях радиоэлектронного противоборства. Особенно эффективной она является для сетей с предоставлением ресурса по запросу, где адаптивное распределение становится основным механизмом сохранения связи при ограниченной емкости канала и воздействии преднамеренных помех.

Литература

1. Новиков, Е. А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении / Е. А. Новиков // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 2 (69). – С. 79–86. – EDN SAXBVV.
2. Ковальский, А. А. Модели статистического уплотнения и алгоритмы диспетчеризации разнородного трафика земных станций спутниковой связи в условиях изменяющейся помеховой обстановки / А. А. Ковальский // Труды МАИ. – 2016. – № 90. – С. 20.
3. Абазина, Е. С. Методика планирования и распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи / Е. С. Абазина, С. Х. Зиннуров, К. Н. Лукинов [и др.] // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2022. – № 3–4. – С. 9–17. – DOI 10.53816/23061456_2022_3-4_9.
4. Астахов, Е. Н. Способ управления системой спутниковой связи в условиях дефицита пропускной способности / Е. Н. Астахов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2022. – № 7–8. – С. 36–44. – DOI 10.53816/23061456_2022_7-8_36.

5. Парфенов, М. С. Модель функционирования подсистемы управления в широкополосной сети спутниковой связи с многопараметрическим распределением ресурса ретранслятора С-диапазона / М. С. Парфенов // Информация и Космос. – 2026. – № 1. – С. 14–23.
6. Feldman, P. M. An Overview and Comparison of Demand Assignment Multiple Access (DAMA) Concepts for Satellite Communications Networks / P. M. Feldman; RAND Corporation. – Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1996. – (Monograph Report MR-762-AF). – DOI 10.7249/MR762. doi.org +1.
7. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2 : European Standard EN 302 307-1 / European Telecommunications Standards Institute. – Sophia Antipolis.
8. Skinnemoen, H. DVB-RCS2 overview / H. Skinnemoen, C. Rigal, A. Yun [и др.] // International Journal of Satellite Communications and Networking. – 2013. – Vol. 31, № 5. – Pp. 201–217. – DOI 10.1002/sat.1025.
9. Lagunas, E. Resource Allocation for Cognitive Satellite Communications with Incumbent Terrestrial Networks / E. Lagunas, S. K. Sharma, S. Maleki [и др.] // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. – 2015. – Vol. 1, № 3. – Pp. 305–317. – DOI 10.1109/TCCN.2015.2503286.
10. Abdu, T. S. Demand and Interference Aware Adaptive Resource Management for High Throughput GEO Satellite Systems / T. S. Abdu, S. Kisseleff, E. Lagunas [и др.] // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2022. – Vol. 3. – Pp. 759–775. – DOI 10.1109/OJCOMS.2022.3167785. colab.ws +1.
11. Zou, M. Equilibrium Approximating and Online Learning for Anti-Jamming Game of Satellite Communication Power Allocation / M. Zou, J. Chen, J. Luo [и др.] // Electronics. – 2022. – Vol. 11, № 21. – Art. 3526. – DOI 10.3390/electronics11213526.
12. Liu, X. Anti-Jamming Communications Using Spectrum Waterfall: A Deep Reinforcement Learning Approach / X. Liu, Y. Xu, L. Jia [и др.] // IEEE Communications Letters. – 2018. – Vol. 22, № 5. – Pp. 998–1001. – DOI 10.1109/LCOMM.2018.2815018.
13. Garau Luis, J. J. Deep Reinforcement Learning Architecture for Continuous Power Allocation in High Throughput Satellites / J. J. Garau Luis, M. Guerster, I. del Portillo [и др.] // arXiv. – 2019. – arXiv:1906.00571. – DOI 10.48550/arXiv.1906.00571.
14. Guo, S. An Efficient Multi-Dimensional Resource Allocation Mechanism for Beam-Hopping in LEO Satellite Network / S. Guo, K. Han, W. Gong [и др.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 23. – Art. 9304. – DOI 10.3390/s22239304.
15. Cao, W. A Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Anti-Jamming Spectrum-Access Method in LEO Satellites / W. Cao, Y. Chen, Y. Liu [и др.] // Electronics. – 2025. – Vol. 14, № 16. – Art. 3307. – DOI 10.3390/electronics14163307.
16. Xi, Y. SATCOM Earth Station Arrays Anti-Jamming Based on MVDR Algorithm / Y. Xi, J. Liu, W. Zhao // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 14. – Art. 8337. – DOI 10.3390/app13148337.

ANALYSIS OF METHODS FOR ADAPTIVE RESOURCE ALLOCATION UNDER THE INFLUENCE OF INTERFERENCE IN SATELLITE COMMUNICATION NETWORKS

Burlakov S. O.[3], Fedorova A. V.[4]

Keywords: *satellite communications, military communication networks, adaptive resource allocation, DAMA, MF-TDMA, noise immunity, radio frequency resource control and distribution system, beam hopping, deep reinforcement learning, noise immunity.*

Abstract

The purpose of the work *is to analyze the existing methods of adaptive distribution of the limited resource of the repeater for further improvement of the adaptation method.*

It is shown that in modern military satellite communication networks, resource allocation cannot be considered only as a task of increasing spectral efficiency: at the same time, it is associated with ensuring the stability of control, network survivability, protection against electronic jamming and maintaining the required quality of service. The methods of DAMA/MF-TDMA, adaptive coding and modulation, dynamic power and bandwidth allocation, beam hopping, cognitive radio access, game-theoretic resource management, machine learning and deep learning are analyzed. It is concluded that the most promising direction is the integration of classical secure SATCOM solutions with multi-agent resource management algorithms that take into account the interference situation, traffic priorities and satellite payload limitations. The main directions of adaptation are revealed: resource provision on demand, adaptive coding and modulation, dynamic beam switching, spatial filtering, game theory and machine learning methods. The results are applicable in substantiating algorithms for increasing the noise immunity of satellite communication networks with the provision of channels on demand.

3 ***Sergey O. Burlakov***, Dr.Sc. in Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of the Military Academy of Communications named after S. M. Budyonny. St. Petersburg, Russia. E-mail: soburlakov@yandex.ru

4 ***Alexandra V. Fedorova***, adjunct of the S. M. Budyonny Military Academy of Communications. St. Petersburg, Russia. E-mail: neboskreb67@yandex.ru

Scientific novelty: *the article presents a generalization of approaches at several levels of resource management, analyzes the advantages and disadvantages, draws conclusions on the possibility of applying integrated approaches to improving noise immunity in military satellite communication networks of the tactical control level, taking into account the features of their use.*

References

1. Novikov E. A. Operativnoe raspredelenie radioresursa sputnika-retranslyatora pri nestacionarnom vkhodnom potoke soobshchenij s uchetom zapazdyvaniya v upravlenii [Operational distribution of the radio resource of a relay satellite under a nonstationary input message flow taking into account control delays] / E. A. Novikov // Informacionno-upravlyayushhie sistemy [Information and Control Systems]. – 2014. – № 2 (69). – Pp. 79–86. – EDN SAXBVV.
2. Kovalskij A. A. Modeli statisticheskogo uplotneniya i algoritmy dispetcherizacii raznorodnogo trafika zemnykh stancii sputnikovoj svyazi v usloviyakh izmenyayushhejsya pomekhovoj obstanovki [Statistical multiplexing models and dispatching algorithms for heterogeneous traffic of satellite communication earth stations under changing interference conditions] / A. A. Kovalskij // Trudy MAI [Proceedings of the Moscow Aviation Institute]. – 2016. – № 90. – P. 20.
3. Abazina E. S. Metodika planirovaniya i raspredeleniya chastotno-vremennogo resursa seti sputnikovoj svyazi [Method for planning and distribution of the time-frequency resource of a satellite communication network] / E. S. Abazina, S. Kh. Zinnurov, K. N. Lukinov [et al.] // Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu [Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism]. – 2022. – № 3–4. – Pp. 9–17. – DOI 10.53816/23061456_2022_3-4_9.
4. Astakhov E. N. Sposob upravleniya sistemoj sputnikovoj svyazi v usloviyakh deficita propusknoj sposobnosti [A method for controlling a satellite communication system under a capacity shortage] / E. N. Astakhov // Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu [Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism]. – 2022. – № 7–8. – Pp. 36–44. – DOI 10.53816/23061456_2022_7-8_36.
5. Parfenov M. S. Model` funkcionirovaniya podsistemy upravleniya v shirokopolosnoj seti sputnikovoj svyazi s mnogoparametricheskim raspredeleniem resursa retranslyatora S-diapazona [Model of the control subsystem operation in a broadband satellite communication network with multiparameter distribution of the C-band repeater resource] / M. S. Parfenov // Informaciya i Kosmos [Information and Space]. – 2026. – № 1. – Pp. 14–23.
6. Feldman P. M. An Overview and Comparison of Demand Assignment Multiple Access (DAMA) Concepts for Satellite Communications Networks / P. M. Feldman; RAND Corporation. – Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1996. – (Monograph Report MR-762-AF). – DOI 10.7249/MR762.
7. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2: European Standard EN 302 307-1 / European Telecommunications Standards Institute. – Sophia Antipolis: ETSI, [б. г.]. – URL: (accessed: 16.11.2026).
8. Skinnemoen H. DVB-RCS2 overview / H. Skinnemoen, C. Rigal, A. Yun [et al.] // International Journal of Satellite Communications and Networking. – 2013. – Vol. 31, № 5. – Pp. 201–217. – DOI 10.1002/sat.1025.
9. Lagunas E. Resource Allocation for Cognitive Satellite Communications with Incumbent Terrestrial Networks / E. Lagunas, S. K. Sharma, S. Maleki [et al.] // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. – 2015. – Vol. 1, № 3. – Pp. 305–317. – DOI 10.1109/TCCN.2015.2503286.
10. Abdu T. S. Demand and Interference Aware Adaptive Resource Management for High Throughput GEO Satellite Systems / T. S. Abdu, S. Kisseleff, E. Lagunas [et al.] // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2022. – Vol. 3. – Pp. 759–775. – DOI 10.1109/OJCOMS.2022.3167785.
11. Zou M. Equilibrium Approximating and Online Learning for Anti-Jamming Game of Satellite Communication Power Allocation / M. Zou, J. Chen, J. Luo [et al.] // Electronics. – 2022. – Vol. 11, № 21. – Art. 3526. – DOI 10.3390/electronics11213526.
12. Liu X. Anti-Jamming Communications Using Spectrum Waterfall: A Deep Reinforcement Learning Approach / X. Liu, Y. Xu, L. Jia [et al.] // IEEE Communications Letters. – 2018. – Vol. 22, № 5. – Pp. 998–1001. – DOI 10.1109/LCOMM.2018.2815018.
13. Garau Luis J. J. Deep Reinforcement Learning Architecture for Continuous Power Allocation in High Throughput Satellites / J. J. Garau Luis, M. Guerster, I. del Portillo [et al.] // arXiv. – 2019. – arXiv:1906.00571. – DOI 10.48550/arXiv.1906.00571. – URL: (accessed: 16.11.2026).
14. Guo S. An Efficient Multi-Dimensional Resource Allocation Mechanism for Beam-Hopping in LEO Satellite Network / S. Guo, K. Han, W. Gong [et al.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 23. – Art. 9304. – DOI 10.3390/s22239304.
15. Cao W. A Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Anti-Jamming Spectrum-Access Method in LEO Satellites / W. Cao, Y. Chen, Y. Liu [et al.] // Electronics. – 2025. – Vol. 14, № 16. – Art. 3307. – DOI 10.3390/electronics14163307.
16. Xi Y. SATCOM Earth Station Arrays Anti-Jamming Based on MVDR Algorithm / Y. Xi, J. Liu, W. Zhao // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 14. – Art. 8337. – DOI 10.3390/app13148337.