

Основные принципы построения моделей перспективных гибридных наземно-космических систем связи

И. Н. Пантелеймонов, ФГБУ НИИР, начальник лаборатории; panteleimonov@niir.ru

УДК 621.314.5

DOI: 10.34832/ELSV.2024.56.7.001

Аннотация. Представлено описание моделей и уровней взаимодействия технологий, систем и элементов с целью формирования системного подхода, необходимого для проведения анализа и синтеза перспективных гибридных наземно-космических систем связи.

Ключевые слова: наземно-космические системы связи, модель, уровень иерархии взаимодействия, сеть спутниковой связи, спутниковый интернет, сеть интернет, спутник-ретранслятор, космический аппарат, абонентский терминал, линия связи.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в развитии систем спутниковой связи (ССС) наблюдаются следующие тенденции [1–5]:

- интеграция с наземными сетями связи;
- развертывание многоспутниковых орбитальных группировок космических аппаратов (КА);
- обеспечение широкополосного доступа с небольших носимых абонентских терминалов (АТ);
- применение сетевых технологий для передачи мультисервисного трафика;
- постоянная доступность и оперативность доставки любой информации.

В то же время проблемой является отсутствие в существующих СССР [1–5]:

- широкомасштабной взаимной интеграции;
- единых подходов к построению;
- автоматизации процессов дублирования;
- масштабируемости.

КЛАССИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ СПУТНИКОВОГО ИНТЕРНЕТА

С целью описания модели гибридных наземно-космических систем связи (НКСС) предлагается разделить её на разные классы и уровни взаимодействия.

Информационно-логическое взаимодействие объектов гибридной НКСС осуществляется согласно следующим моделям:

- 1) модель архитектуры НКСС и взаимодействия её объектов [2–6];
- 2) модель внутренней архитектуры объектов НКСС и взаимодействия её компонентов (систем, узлов, блоков, модулей) [7–9];

3) модель управления объектов и компонентов объектов НКСС [7];

4) модель организации связи (информационная) в НКСС [3, 5, 6].

Классификация моделей НКСС изображена на рис. 1.

МОДЕЛЬ АРХИТЕКТУРЫ НКСС И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЕЁ ОБЪЕКТОВ

Модель архитектуры НКСС и взаимодействия её объектов, состоит из следующих уровней:

– L0 – наземные объекты проводной сети интернет (абоненты и провайдеры сети интернет), в том числе: центр управления сетью спутниковой связи (ЦУС); центр управления полетом (ЦУП) космических аппаратов; центр обработки информации (ЦОИ), получаемой от КА различного назначения; шлюзовые станции спутниковой связи; центральная и абонентские земные станции (ЗС) спутниковой связи; командно-измерительные станции командной радиолнии КА;

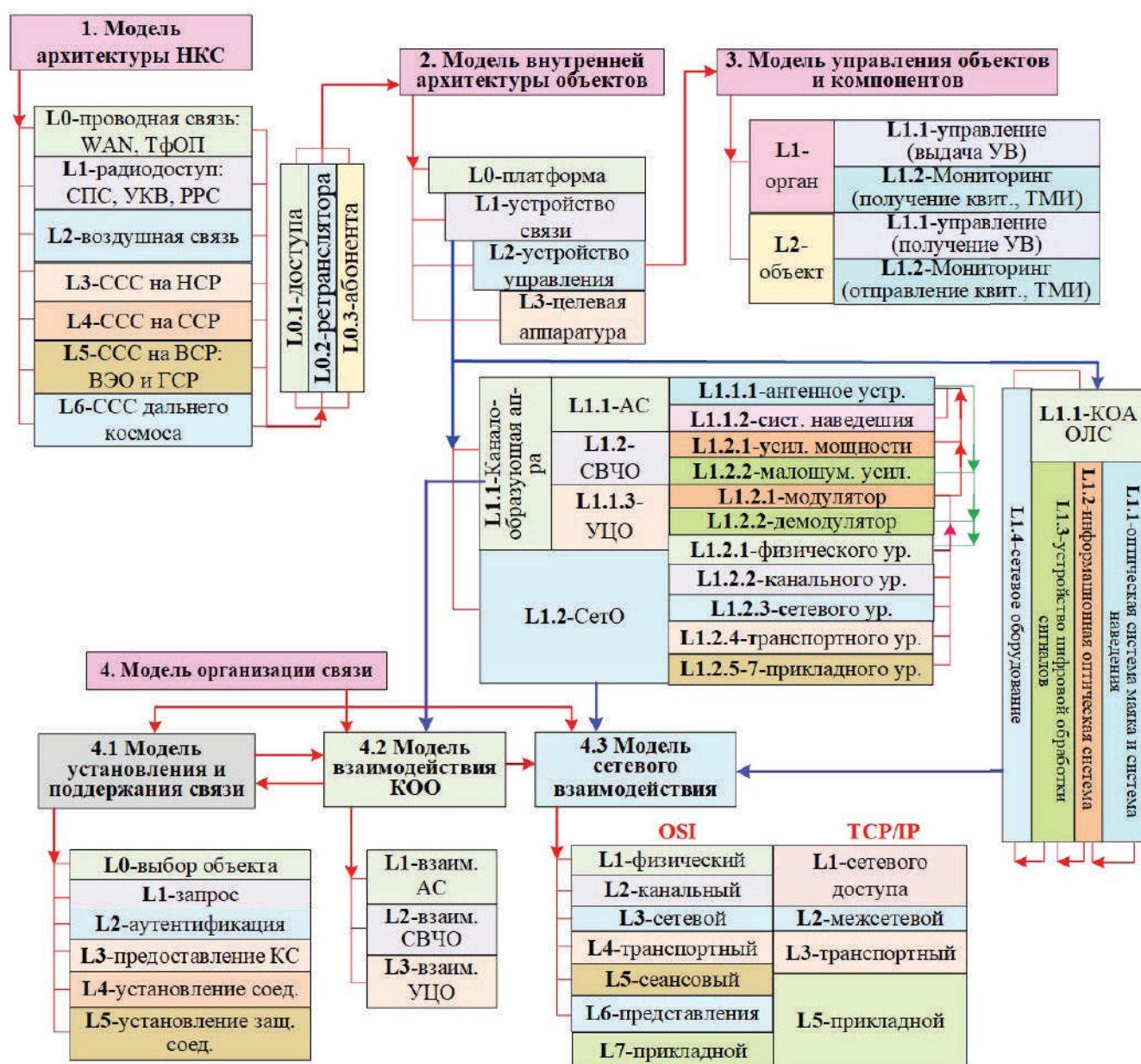
– L1 – наземные объекты сетей радиодоступа, а именно сетей подвижной связи и радиорелейных сетей интернет;

– L2 – объекты сетей воздушной связи с применением самолетов, беспилотных летательных аппаратов и аэростатов;

– L3 – сеть спутниковой связи на низкоорбитальных спутниках-ретрансляторах (НСР) и КА различного назначения на низкой орбите (НО);

– L4 – сеть спутниковой связи на среднеорбитальных спутниках-ретрансляторах (ССР) и КА различного назначения на средней орбите (СО);

Рисунок 1
Классификация моделей НКСС



— L5 — сеть спутниковой связи на высокоорбитальных спутниках-ретрансляторах (СР) (СР на высокоэллиптических орбитах и СР на геостационарных орбитах (ГСР)) и высокоорбитальных КА различного назначения;

— L6 — сеть спутниковой связи на объектах дальнего космоса, например, сеть СР вокруг Луны.

Каждый из уровней архитектуры состоит из следующих подуровней:

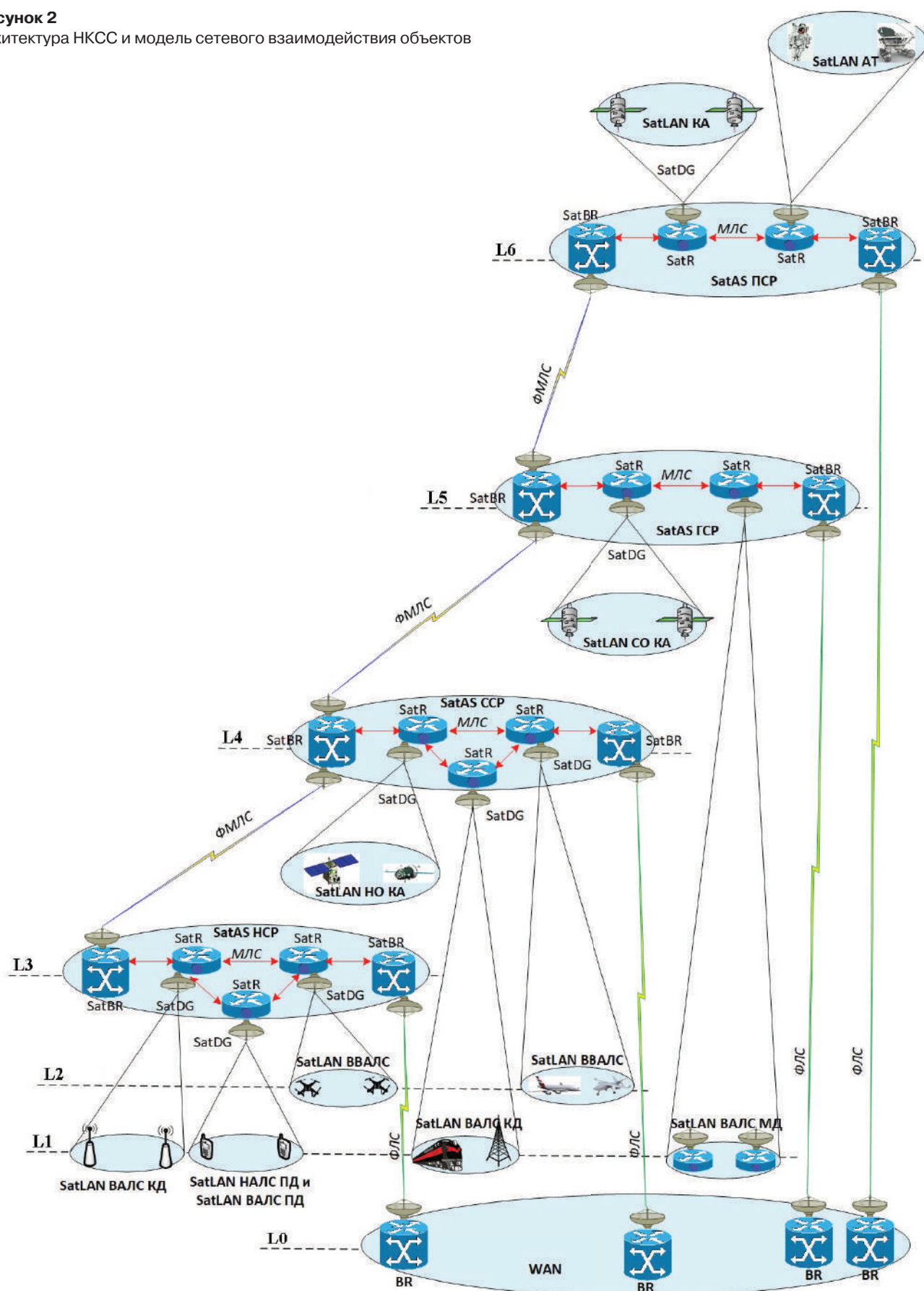
- X.1) — подуровень доступа;
- X.2) — подуровень ретранслятора;
- X.3) — подуровень абонента.

Модель архитектуры НКСС и модель сетевого взаимодействия объектов изображена на рис. 2.

На рис. 2 использованы следующие обозначения: BR (Boundary Router) — земной граничный маршрутизатор наземной глобальной вычислительной сети; SatAS (Satellite Autonomous System) — спутниковая автономная система спутниковой глобальной вычислительной сети; SatBR (Satellite Boundary Router) — спутниковый граничный маршрутизатор спутниковой автономной системы; SatDG (Satellite Default Gateway) — спутниковый шлюз по умолчанию; SatLAN (Satellite Local Area Network) — спут-

Рисунок 2

Архитектура НКСС и модель сетевого взаимодействия объектов



никовая локальная вычислительная сеть; SatWAN (Satellite Wide Area Network) — спутниковая глобальная вычислительная сеть; SatR (Satellite Router) — спутниковый маршрутизатор; WAN (Wide Area Network) — наземная глобальная вычислительная сеть; АТ — абонентский терминал; ВАЛС — высокоскоростная абонентская линия связи; ВВАЛС — воздушная высокоскоростная абонентская линия связи; КД — коллективный доступ; МЛС — межспутниковая линия связи; НАЛС — низкоскоростная абонентская линия связи; ПД — персональный доступ; ПСР — планетарный спутник-ретранслятор; ФЛС — фидерная линия связи; ФМЛС — фидерная межспутниковая линия связи.

МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕЙ АРХИТЕКТУРЫ ОБЪЕКТОВ НКСС И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЕЁ КОМПОНЕНТОВ

Модель внутренней архитектуры объектов НКСС и взаимодействия её компонентов (систем, узлов, блоков, модулей), состоит из следующих уровней и подуровней:

- 0-й уровень (L0) — платформа;
- 1-й уровень (L1) — устройство связи, например, у КА это бортовая информационная система, у СР это бортовой ретрансляционный комплекс (БРК), уровень устройств связи состоит из подуровней:
 - 1.1 — антенная система, включая там, где она есть, систему наведения на остроуправляемых антеннах;
 - 1.2 — высокочастотное оборудование, состоящее из подуровней:
 - 1.2.1 — подуровень усилителей мощности передающего тракта;
 - 1.2.2 — подуровень малошумящих усилителей приемного тракта;
 - 1.3 — устройство цифровой обработки сигналов (модемов), состоящее из подуровней:
 - 1.3.1 — подуровень модулятора;
 - 1.3.2 — подуровень демодулятора;
 - 1.3.3 — подуровень сетевого оборудования (сетевая карта, коммутатор, маршрутизатор);
- 2-й уровень (L2) — устройство управления, например на КА — это бортовой комплекс управления (БКУ), а у АТ — это контролер;
- 3-й уровень (L3) — целевая аппаратура (ЦА).

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ И КОМПОНЕНТАМИ ОБЪЕКТОВ НКСС

Модель управления объектами и компонентами объектов НКСС, состоит в общем случае из следующих уровней:

- 0-й уровень (L0) — потребитель информации;
- 1-й уровень (L1) — орган управления, состоящий из подуровней:
 - 1.1 — формирование и отправка управляющих воздействий (УВ);

- 1.2 — получение и анализ квитанций, телеметрической информации;
- 2-й уровень (L2) — субъект управления, состоящий из подуровней:
 - 2.1 — получение и исполнение УВ;
 - 2.2 — формирование и отправка квитанций и телеметрической информации.

Модель управления космической системой дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с применением сети СР изображена на рис. 3 и имеет следующие уровни иерархии взаимодействия и управления:

- уровень 0 (L0), на котором объектом управления является заказчик и потребитель целевой информации (ЦИ), который формирует заявку, отправляет её в ЦОИ и получает результат исполнения;
- уровень 1 (L1), на котором органами управления являются ЦУП, ЦУС и ЦОИ, состоят из подуровней:
 - подуровень 1.1, на котором ЦОИ является органом управления по отношению к целевой аппаратуре КА, СР, ЦУП и ЦУС в плане осуществления целевой задачи. ЦОИ планирует и осуществляет выполнение целевой задачи. ЦОИ на основании заявки, полученной от ЦУП баллистической информации (начальные условия (НУ) моделирования движения КА) и получаемой постоянно от ЦУП телеметрической информации ЦА, формирует рабочую программу (включая зоны радиообзора космических аппаратов ДЗЗ) для целевой аппаратуры КА. После получения целевой информации ЦОИ осуществляет её обработку и предоставление заказчику;
 - подуровень 1.2, на котором ЦУС является органом управления по отношению к БРК СР и ГСР, бортовым информационным системам КА, наземным станциям и ЦУП в плане осуществления доставки информации. Кроме того, ЦУС является субъектом управления по отношению к ЦОИ;
 - подуровень 1.3, на котором ЦУП является объектом управления по отношению к командно-измерительным системам (КИС), КА, СР и ГСР и субъектом управления по отношению к ЦОИ и ЦУС в плане осуществления задач управления с целью обеспечения выполнения целевой задачи;
- уровень 2 (L2) — универсальная земная станция (УЗС) является субъектом управления по отношению к ЦУС, ЦОИ и ЦУП и объектом управления по отношению к КА и СР. УЗС получают из ЦУС начальные условия и рассчитывают целеуказания (ЦУ) для остроуправляемых антенн, получают ЦИ и телеметрическую информацию (ТМИ) от КА, СР и ГСР, а также осуществляют ретрансляцию УВ на СР и КА;
- уровень 3 (L3) — СР являются субъектом управления по отношению к ЦУП, ЦУС и УЗС и объектом

управления по отношению к КА при осуществлении связи. СР получают от УЗС и от соседних СР начальные условия, рассчитывают ЦУ для остронаправленных антенн, получают ЦИ и ТМИ от КА и СР, а также ретранслируют управляющие воздействия на СР и КА;

— уровень 4 (L4) — КА являются субъектом управления по отношению к ЦУП, ЦУС, ЦОИ, УЗС и СР при осуществлении связи. КА получают от УЗС и СР начальные условия и рассчитывают ЦУ для остронаправленных антенн. Затем КА осуществляют формирование и выдачу целевой информации, формирование и выдачу ТМИ на УЗС или СР, когда они находятся вне ЗРВ УЗС.

На рис. 3 использованы следующие обозначения: КПл — космическая платформа; РК — радиокомплекс.

КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ В НКСС

Комплекс моделей организации связи (информационная) в НКСС состоит из следующих моделей:

1) модель установления и поддержания связи, содержит уровни:

- L0 — выбор объекта для отправки запроса на установление связи;
- L1 — запрос на установление связи;
- L2 — аутентификация;
- L3 — предоставление канала связи;
- L4 — установление соединения;
- L5 — установление защищенного соединения;

2) модель взаимодействия каналообразующего оборудования состоит из уровней:

- L1 — взаимодействие антенных систем;
- L2 — взаимодействие высокочастотного оборудования;
- L3 — взаимодействие устройств цифровой обработки сигналов;

3) модель сетевого взаимодействия:

3.1) в общем случае модель сетевого взаимодействия описывается открытой моделью сетевого взаимодействия (open systems interconnection (OSI) model), состоящей из следующих уровней:

- L1 — физический уровень;
- L2 — канальный уровень;
- L3 — сетевой уровень;
- L4 — транспортный уровень;
- L5 — сеансовый уровень;
- L6 — уровень представления;
- L7 — прикладной уровень;

3.2) модель сетевого взаимодействия стека протоколов TCP/IP описывается четырьмя уровнями:

- L1 — уровень сетевого доступа, состоящий из физического и канального подуровней;
- L2 — межсетевой уровень;
- L3 — транспортный уровень;
- L4 — прикладной уровень.

МОДЕЛЬ УСТАНОВЛЕНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ СВЯЗИ

Вариантами организации сеансов связи (СС) с КА могут быть:

- 1) осуществление СС по заранее составленному плану;
- 2) осуществление СС без заранее составленного плана по запросу в режиме реального времени.

Установление связи без планирования осуществляется в автоматическом режиме, в то время как установление связи с планированием СС реализуется при участии операторов ЦУП и ЦУС.

Для осуществления связи с КА при планировании СС необходимо наличие командной радиолинии, организуемой бортовой и наземной КИС, а для связи с КА без планирования СС необходимо применение низкоскоростной радиолинии служебной связи.

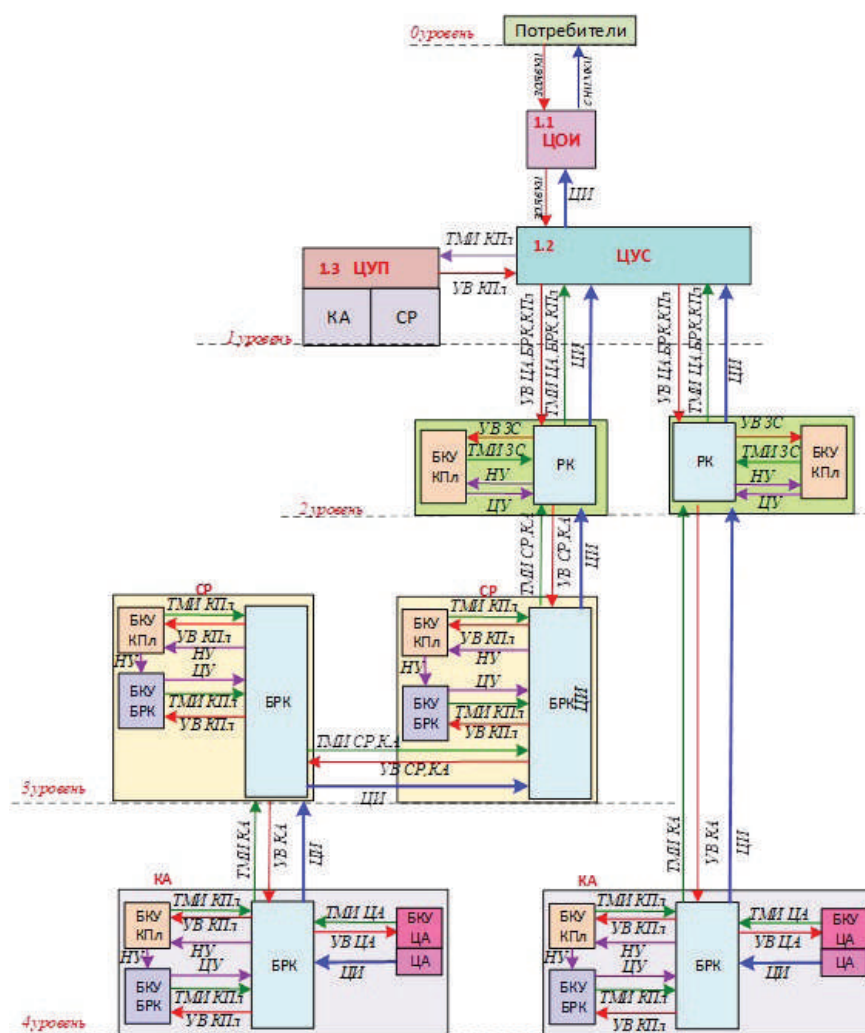
Модель установления и поддержания связи с КА при планировании сеансов связи состоит из следующих уровней:

- L0 — инициализация программы работы, включающая подуровни:
 - L0.1 — составление программы СС;
 - L0.2 — расчет ЦУ антенн;
- L1 — выбор объекта ретрансляции, в роли которого могут выступать УЗС и СР, для установления связи (осуществляется оператором ЦУС), состоит из подуровней:
 - L1.1 — оценка состояния атмосферы для атмосфернозависимых диапазонов в линиях связи борт—Земля;
 - L1.2 — оценка текущей аппаратной загрузки;
 - L1.3 — оценка продолжительности СС;
 - L1.4 — выбор УЗС или СР для установления связи;
- L2 — взаимное наведение и слежение остронаправленных антенных систем в высокоскоростных линиях связи;
- L3 — установление соединения в открытом канале связи, состоит из подуровней:
 - L3.1 — формирование и отправка команды бортовой или наземной КИС на установление связи;
 - L3.2 — аутентификация;
 - L3.3 — установление соединения;
- L4 — установление защищенного соединения;
- L5 — установление сетевого взаимодействия автоматизированного рабочего места оператора ЦОИ и ЦА на уровне приложений модели OSI (*Примечание: при пропадании соединения, в зависимости от причины перерыва связи, осуществляется переход к нулевому, первому, второму третьему или четвертому уровням*).

При осуществлении связи с КА без планирования СС сначала устанавливается связь в служебном канале связи, а затем при необходимости передачи

Рисунок 3

Модель управления в космической системе ДЗЗ с применением сети спутников-ретрансляторов



высокоскоростной информации происходит установление связи в высокоскоростном информационном канале связи.

Модель установления и поддержания связи КА и СР без планирования СС в служебном канале связи состоит из уровней:

- L0 – КА и СР осуществляют расчет прогноза собственного орбитального движения:
 - L0.1 – КА и СР осуществляют прием навигационных сигналов ГЛОНАСС;
 - L0.2 – КА и СР рассчитывают прогноз собственного орбитального движения;

(Примечание: при осуществлении связи со стационарной УЗС координаты УЗС должны храниться в базе данных бортовой навигационной системы КА)

- L1 – выбор СР или УЗС для установления связи:
 - L1.1 – оценка состояния атмосферы – для атмосферно-зависимых диапазонов в линиях связи борт–Земля;
 - L1.2 – оценка продолжительности СС;
 - L1.3 – выбор СР или УЗС для установления связи;
- L2 – запрос на входение в связь состоит из:
 - L2.1 – опровка запроса на входение в связь, организованной

на малонаправленную или всенаправленную антенную систему;

- L2.2 – оценка текущей аппаратной загрузки СР или УЗС и ответ на запрос в НАЛС;
- L2.3 – осуществление аутентификации в НАЛС;
- L2.4 – установление защищенного соединения в НАЛС;
- L3 – расчет ЦУ для систем наведения бортовой аппаратуры оптической линии связи:
 - L3.1 – взаимный обмен прогнозами орбитального движения между КА и СР или сообщение УЗС;
 - L3.2 – расчет ЦУ для систем наведения терминалов бортовой аппаратуры оптической линии связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное выше описание классов моделей формирует системный подход к описательной модели построения и функционирования спутникового интернета. Например:

- когда происходит взаимное наведение остроуправленных антенн, то используется модель взаимодействия каналообразующего оборудования на уровне взаимодействия антенных систем;
- когда передающее устройство излучает радиосигналы, а приемное устройство их принимает, то используется модель взаимодействия каналообразующего оборудования на уровне взаимодействия высокочастотного оборудования;
- когда модем осуществляет демодуляцию и декодирование принимаемых радиосигналов, то используется модель взаимодействия каналообразующего оборудования на уровне взаимодействия устройств цифровой обработки сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пантелеймонов, И.Н.** Методика расчета показателей эффективности системы управления полетом космических аппаратов / И.Н. Пантелеймонов, А.Ю. Потюпкин, В.М. Траньков и др. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 11. – С. 55–65.
2. **Пантелеймонов, И.Н.** Пути повышения эффективности системы управления полетом космического аппарата / И.Н. Пантелеймонов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2019. – Т. 6, Вып. 2. – С. 80–89.
3. **Пантелеймонов, И.Н.** Модель перспективной системы связи для передачи информации космического мониторинга на наземный комплекс приема и обработки информации / И.Н. Пантелеймонов, В.В. Филатов, В.С. Алешин и др. // Известия высших учебных заведений. Машино-
- строение. – 2019. – № 12. – С. 61–76.
4. **Мырова, Л.О.** Модель перспективной системы управления полетом космических аппаратов / Л.О. Мырова, И.Н. Пантелеймонов, А.В. Пантелеймонова и др. // Космонавтика и ракетостроение. – 2019. – Вып. 6(111). – С. 68–80.
5. **Пантелеймонов, И.Н.** Основные направления концепции организации связи в системе спутниковой связи на низкоорбитальных спутниках-ретрансляторах / И.Н. Пантелеймонов, А.А. Монастыренко, А.В. Белозерцев и др. // Труды НИИР. – 2021. – № 1. – С. 33–40.
6. **Пантелеймонов, И.Н.** Модель системы связи с объектами, расположенными на орбите и поверхности планет Солнечной системы или их спутников / И.Н. Пантелеймонов, А.Ю. Потюпкин, В.И. Ковалев и др. // Электросвязь. – 2020. – № 1. – С. 22–26.
7. **Пантелеймонов, И.Н.** Основные перспективные направления системного проектирования сетей и систем спутниковой связи / И.Н. Пантелеймонов, Л.О. Мырова, И.Х. Яхин и др. // Электросвязь. – 2022. – № 8. – С. 8–17.
8. **Гладков, И.А.** Архитектурные решения защиты канала удаленного управления работой модема в сетях спутниковой связи / И.А. Гладков, И.Н. Пантелеймонов, В.И. Корниенко и др. // Труды НИИР. – 2015. – № 1. – С. 12–18.
9. **Пантелеймонов, И.Н.** Архитектура и алгоритм работы бортового маршрутизатора в сетях подвижной персональной спутниковой связи с зональной регистрацией абонентов / И.Н. Пантелеймонов // Труды НИИР. – 2018. – № 3–4. – С. 11–19.

Получено 20.05.24

Методика приоритизации трафика в спутниковых каналах связи на базе искусственного интеллекта. Часть II. Анализ потерь пакетов

Ф.Х. До, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), аспирант; do.hf@sut.ru

А.А. Березкин, СПбГУТ, доцент, к.т.н.; berezkin.aa@sut.ru

А.В. Бородин, СПбГУТ, доцент, к.т.н.; borodko.av@sut.ru

Р.В. Киричек, СПбГУТ, ректор, профессор, д.т.н.; kirichek@sut.ru

УДК 621.396.946

DOI: 10.34832/ELSV.2024.56.7.002

Аннотация. В исследовании представлен подход к построению спутниковых коммуникационных сетей, основанный на искусственном интеллекте для повышения эффективности спутниковой связи путем динамического прогнозирования и приоритизации трафика. Инновационный подход заключается в использовании моделей искусственного интеллекта, а именно, многослойных перцептронов, для точного определения различных типов трафика, который затем организуется в очереди в соответствии с назначенными уровнями приоритета для передачи по спутниковым коммуникационным сетям. Во второй части статьи произведен подробный сравнительный анализ коэффициента потерь пакетов исходя из предложенной методики приоритизации трафика на основе искусственного интеллекта в сетях спутниковой связи.

Ключевые слова: спутниковая связь, искусственный интеллект, QoS, приоритизация трафика, потери пакетов.

В первой части статьи (см. «Электросвязь», 2024, № 6) было дано подробное описание методики использования искусственного интеллекта (ИИ) для улучшения работы спутниковых систем связи. Эти системы имеют важное значение для глобальной связи [1], но управление трафиком в них представляет собой нетривиальную задачу из-за того, что по входящим каналам к ним проходят все типы трафика,

включая онлайн-видеотрансляции, телефонные вызовы и просмотры веб-страниц, часто от одних и тех же источников и без достоверного указания типа услуги в соответствующем поле передаваемых пакетов [2]. Использование методов ИИ помогает решить проблему классификации трафика и делает возможным приоритизацию обслуживаемых пакетов в соответствии с определенным искусственным ин-