

А.А. Брусков

---

ВЗАИМОЗАВИСИМЫЕ МНОГОУРОВНЕВЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ СЕТИ:  
ФОРМАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

---

В этой статье разрабатывается новый подход, а также алгоритмические инструменты для моделирования и анализа живучести сетей с разнородными узлами, рассматривается их применение в космических сетях. Космические сети позволяют совместно использовать ресурсы космических аппаратов на орбите, такие как хранение, обработка и обмен данными. Каждый космический аппарат в сети может иметь различный состав и функциональность подсистем, что приводит к неоднородности узлов. Большинство традиционных анализов живучести сетей предполагают однородность узлов, поэтому не могут использоваться для анализа космических сетей. Предполагается, что гетерогенные сети могут быть смоделированы как взаимозависимые многоуровневые сети, что позволяет проводить анализ их живучести. Многоуровневый аспект фиксирует разбивку сети в соответствии с общими функциональными возможностями в различных узлах и позволяет создавать однородные подсети, в то время как аспект взаимозависимости ограничивает сеть для захвата физических характеристик каждого узла.

*Ключевые слова:* взаимозависимые многоуровневые сети, космические сети, отказы, сбои, деградация.

А.А. Bruskov

---

INTERDEPENDENT MULTILEVEL NETWORKS SURVIVABILITY  
MODELING AND ANALYSIS WITH APPLICATIONS IN SPACE NETWORKS

---

In this paper, we develop a new approach and algorithmic tools for modeling and analyzing the survivability of networks with heterogeneous nodes, and also consider their application in space networks. Space networks allow the sharing of spacecraft resources in orbit, such as data storage, processing, and exchange. Each spacecraft in the network may have a different composition and functionality of subsystems, which leads to heterogeneity of nodes. Most traditional network survivability analyses assume node homogeneity and as a result are not suitable for space network analysis. This work suggests that heterogeneous networks can be modeled as interdependent multi-level networks, allowing analysis of their survivability. The multi-level aspect captures the network breakdown according to the common functionality in different nodes and allows for the creation of homogeneous subnets, while the interdependence aspect restricts the network to capture the physical characteristics of each node.

*Keywords:* interdependent multi-level networks, survivability analysis, space networks, failures, failures, degradation.

*Введение*

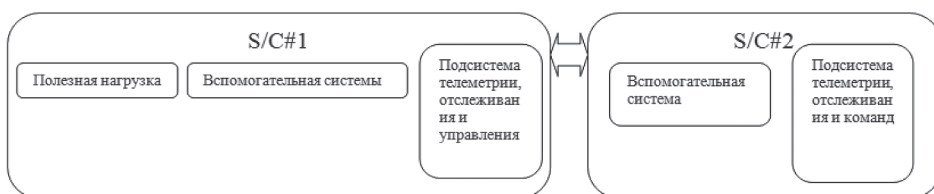
Одна из главных причин написания настоящей работы – оценка и сопоставление живучести дробной архитектуры с живучестью традиционного монолитного космического аппарата. Космические аппараты в космических сетях могут иметь различные компоненты из-за фракционирования функциональности, что приводит к неоднородности узлов [1]. Чтобы проиллюстрировать этот момент, рассмотрим простой пример космической сети, состоящей из двух сетевых космических аппаратов, которые могут подключаться к подсистеме телеметрии, отслеживания и команд другого космического аппарата в случае повреждения или отказа его собственной подсистемы телеметрии, отслеживания и ко-

**Брусков Артем Алексеевич**

преподаватель Технологического университета имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова (МГОТУ), город Королёв. Сфера научных интересов: системный анализ, управление и обработка информации. Автор 9 опубликованных научных работ.

bruskov.art@yandex.ru

манда (см. рис. 1). Беспроводная связь в космических сетях обеспечивает новый тип резервирования – функциональный, но не совмещенный – с помощью подсистемы телеметрии, отслеживания и команд между двумя космическими аппаратами в сети [2; 3].



**Рис. 1.** Упрощенное представление архитектуры космической сети

Каждый космический аппарат состоит из следующих подсистем:

- первый космический аппарат – S/C#1 – содержит все подсистемы, обычно находящиеся в космическом аппарате;
- второй космический аппарат – S/C#2 – состоит из подсистем телеметрии, отслеживания, команд и компонента поддерживающей подсистемы (эквивалентный компоненту в S/C#1). Необходимо обратить внимание, что S/C#2 не имеет компонента полезной нагрузки и рассматривается как резервная копия для подсистемы телеметрии, отслеживания и команд S/C#1.

Неоднородность узлов в космической сети на рисунке 1 не может быть зафиксирована и смоделирована традиционными средствами и представлениями анализа сети.

Цель исследования – разработка концепции взаимозависимых многослойных сетей и ее формальной математической характеристики.

### *1. Взаимозависимые многоуровневые сети: формальная характеристика*

#### **1.1. Общее определение взаимозависимых многоуровневых сетей**

На основе концепций взаимозависимости уровней в сети предлагается моделировать сеть с разнородными узлами в качестве взаимозависимой многоуровневой сети.

Представим терминологию, проиллюстрированную общей сетью, изображенной на рисунке 2, с четырьмя гетерогенными узлами, обозначенными  $\Lambda, \Phi, \Psi$  и  $\Omega$  с четырьмя возможными функциональными возможностями, обозначенными  $A, B, C$  и  $D$ .

*Суперузел* – гетерогенный узел сети, который может иметь различные функциональные возможности. Например,  $\Lambda$  является суперузлом, космический аппарат в космической сети также является суперузлом.

Взаимозависимые многоуровневые космические сети: формальная характеристика

Узел – компонент суперузла, представляющий одну функциональность. Например, окружность, обозначенная как А в Л, является узлом. Подсистема телеметрии, отслеживания и команд в космической сети также является узлом.

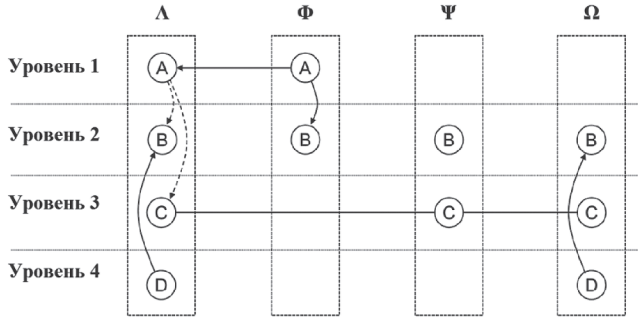


Рис. 2. Общее представление взаимозависимой многоуровневой сети

Слой – общность узлов, имеющих одинаковую функциональность. Все суперузлы в сети и все подсистемы телеметрии, отслеживания команд оставляют уровень, или слой.

Внутриуровневая связь – связь присутствует между двумя узлами на одном уровне, если есть соединение между этими узлами (например, поток данных или узел, который предоставляет ресурсы другому узлу). Линия связи внутри уровня может быть направлена от узла, который предоставляет ресурсы, к узлу-получателю, или может быть в виде двух противоположно направленных дуг, то есть оба узла предоставляют ресурсы другому узлу. Например, у слоя 1 (см. рис. 2) есть направленная связь внутри слоя, указывающая, что суперузел Ф предоставляет функциональность суперузлу Л. У слоя 3 есть две ненаправленные связи внутри слоя между узлами функциональности С (через суперузлы Л и Ψ и Ψ и Ω). Следует отметить, что на уровне 3 суперузел Л не предоставляет функции С суперузлу Ω, так как между ними нет явной внутриуровневой связи.

Сетевой слой – слой, имеющий внутриуровневые связи. Например, уровни 1 и 3 являются сетевыми, в то время как уровень 4 таковым не является.

Межуровневая связь – направленная связь, которая фиксирует взаимозависимости между функциональными возможностями в суперузле. В представленной статье взаимозависимость относится к передаче отказа и исследуются два пути распространения отказа – «эффект убийцы» и «эффект предшественника»:

– «эффект убийцы» представляет собой немедленную передачу отказа и символизируется на рисунке 2 сплошной дугой. Например, в суперузле Л отказ узла, представляющего функциональность D, немедленно приводит к отказу узла, представляющего функциональность B;

– «эффект предшественника» представляет задержанную передачу отказа и обозначен на рисунке 2 пунктирной дугой.

Например, в суперузле Л отказ узла, представляющего функциональность А, может привести к отказу узлов, представляющих функциональность В и С, но не является немедленным (условное распространение отказа) (см. рис. 2).

Поскольку узел А в Л соединен с аналогичным узлом в Ф, суперузел Л потеряет функциональность А только в случае отказа обоих узлов или в случае отказа узла в Л и отказа

внутриуровневой линии связи на уровне  $l$  между  $\Lambda$  и  $\Phi$ . В действительности сеть для функциональных возможностей  $A$  позволяет выживать суперузлу  $\Lambda$  путем подключения к ресурсам другого суперузла ( $\Phi$ ). Следует отметить, что поскольку суперузел  $\Lambda$  не предоставляет ресурсов суперузлу  $\Phi$ , отказ функциональности  $A$  в суперузле  $\Phi$  немедленно распространяется на узел  $B$  через схему эффекта подавления.

Также необходимо отметить, что отказы узлов, представляющих функциональные возможности  $B$  и  $C$ , не оказывают влияния на другие функциональные возможности. Используемая схема взаимозависимости, аналогична описанному «эффекту убийцы». Однако два эффекта, представленные выше, неисчерпывающие, и другие механизмы каскадного отказа могут быть легко добавлены и реализованы.

Таким образом, представление взаимозависимой многоуровневой сети состоит из узлов, размещенных на нескольких уровнях, представляющих различные типы функциональных возможностей.

В пределах каждого уровня узлы образуют сеть путем соединения с другими узлами с направленными или неориентированными внутриуровневыми связями. Кроме того, межуровневые связи соединяют узлы между слоями для захвата физической реальности суперузлов и моделирования различных типов взаимозависимостей. Представленные в работе взаимозависимости (для анализа живучести) являются двумя примитивами распространения отказа, называемыми здесь «эффектом убийцы» и «эффектом предшественника».

Далее рассмотрим формальную математическую характеристику взаимозависимых многоуровневых сетей.

### 1.2. Формальное определение взаимозависимых многоуровневых сетей

Основываясь на исследовании [4], взаимозависимую многослойную сеть  $N$  можно определить как  $N(G_1, \dots, G_L, E_k, E_p)$ , где

$$\left\{ \begin{array}{l} L - \text{количество уровней} \\ \text{каждый из которых пронумерован последовательно от } 1 \text{ до } L \\ G_1, \dots, G_L - \text{графы на каждом слое} \\ \forall l \in [1, \dots, L], G_l = (V_l, E_l), \text{ где} \\ V_l - \text{множество } n_l \text{ вершин (или узлов) в } G_l \\ E_l - \text{множество рёбер (или звеньев) в } G_l \\ E_k - \text{множество межуровневых рёбер,} \\ \text{представляющих «эффект убийцы»} \\ E_p - \text{набор межуровневых кромок,} \\ \text{представляющих «эффект предшественника»} \end{array} \right. \quad (1)$$

Набор сетевых уровней  $E_R$  определяется как

$$E_R = \{l \in N_L^* | E_l \neq \emptyset\} \quad (2)$$

Взаимозависимые многоуровневые космические сети: формальная характеристика

Общее число узлов в  $N$  равно  $n = \sum_{l=1}^L n_l$ , и узлы пронумерованы однозначно и последовательно от 1 до  $n$ . Не имеет значения, какая вершина какую метку получает, важно только то, что каждая метка уникальна, чтобы можно было использовать метки для однозначного обозначения любой вершины [5].

Более практическое представление сети  $N$  возможно с помощью:

- 1) Классических матриц смежности  $A_1, \dots, A_L$  для соответствующих графов  $G_1, \dots, G_L$ ;
- 2) Межслойной матрицы  $C$ ;
- 3) Функции  $f$  отображения между двумя схемами нумерации узлов, описанными далее.

Узлы нумеруются от 1 до  $n$ . Данная схема нумерации упоминается в работе как «общая нумерация» и используется как первичная схема нумерации. Вводится дополнительная нумерация узлов для определения матриц смежности, называемая нумерацией слоев: для каждого уровня  $l$  узлы нумеруются последовательно от 1 до  $n_l$ . Функция  $f$  отображает метки  $k_o$  каждого узла в схеме «общая нумерация» в пару целых чисел  $(l, K_L)$ , где  $l$  – номер слоя, а  $K_L$  – метка узла в нумерации слоя. Обратите внимание, что индексы в схеме «общая нумерация» имеют подстрочный индекс  $o$ , в то время как индексы в схеме «нумерация слоев» имеют подстрочный индекс  $l$ . Поскольку слои и узлы в обеих схемах пронумерованы однозначно, функция  $f$  является биективной. Как следствие, также определяется функция обратного отображения  $f^{-1}$ .

Для каждого слоя  $l$  граф  $G_L$  может быть представлен ассоциированной матрицей смежности  $A_l = [a_{i_l j_l}^l]_{n_l \times n_l}$  так, что

$$\begin{cases} a_{i_l j_l}^l = 1, \text{ если имеется внутриуровневая линия связи,} \\ \quad \text{направленная от узла } j_l \text{ к } i_l \\ a_{i_l j_l}^l = 0 - \text{ в противном случае} \end{cases} \quad (3)$$

Таблица 1

**Параметры Вейбулла для времени отказа подсистем космического аппарата в случае подсистемы телеметрии, отслеживания и команд**

Функциональность	Параметр формы Вейбулла $\nu$	Параметр масштаба Вейбулла $\lambda$ (лет)
Подсистема телеметрии, отслеживания и команд	0,4650	47,770
Поддерживающая подсистема	0,5529	918,5
Полезная нагрузка	0,5921	30,150

«Межслойная» матрица  $C = [c_{i_o j_o}]_{n \times n}$  определяется следующим образом:

$$C_{i_0 j_0} = \begin{cases} 1, \text{ если имеется ребро от вершины } i_0 \text{ к } j_0, \\ \text{ принадлежащее } E_k \text{ («Эффект убийцы»)} \\ 2, \text{ если имеется ребро от вершины } i_0 \text{ к } j_0, \\ \text{ принадлежащее } E_k \text{ («Эффект предшественника»)} \\ 0 \text{ в противном случае} \end{cases} \quad (4)$$

$E_k$ ,  $E_p$  и  $E_L$  также могут быть определены из матриц смежности и межуровневой матрицы следующим образом:

$$E_k = \{(j, i) | C_{ij} = 1\}, \quad (5)$$

$$E_p = \{(j, i) | C_{ij} = 2\}, \quad (6)$$

$$E_L = \{PA_I \neq 0_{n_i \times n_i}\}. \quad (7)$$

В заключение отметим, что взаимозависимая многослойная сеть  $N$  может быть однозначно определена как  $N(G_1, \dots, G_L, E_k, \alpha_p)$  или  $N(A_1, \dots, A_L, C, f)$ , поскольку две характеристики эквивалентны.

Далее будем использовать оба варианта для рассмотрения некоторых преимуществ последних.

### 1.3. Иллюстрация взаимозависимых многоуровневых сетей

Предлагаемое представление проиллюстрируем использованием космической сети, представленной на рисунке 1, и ее взаимозависимой многоуровневой сетью, представленной на рисунке 3.

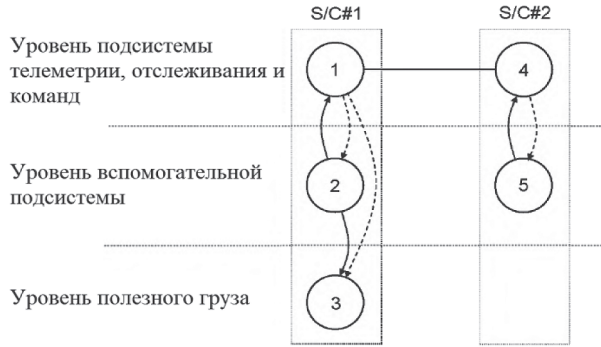
Два космических аппарата являются частью сети и представлены двумя суперузлами. Три идентифицированными функциональными возможностями в этом конкретном космической сети являются полезная нагрузка, подсистемы телеметрии, отслеживания и команда, а также вспомогательные подсистемы. Создадим три слоя для представления каждой из этих функциональных возможностей (см. рис. 3). Отказ вспомогательных подсистем ведет к немедленному отказу всего космического аппарата, что, в свою очередь, приводит к недоступности других узлов (подсистемы телеметрии, отслеживания и команда, полезная нагрузка) в различных слоях, принадлежащих этому космическому аппарату. Следовательно, он подпадает под тип взаимозависимости «эффект убийцы» внутри суперузла. Отказ подсистемы телеметрии, отслеживания и команд не обязательно приводит к немедленному отказу космического аппарата [6]. Функциональное резервирование на подсистему телеметрии, отслеживания и команд может обеспечить выживание космического аппарата, если он подключится к подсистеме телеметрии, отслеживания и команд другого космического аппарата [7]. Это возможно, если на уровне подсистемы телеметрии, отслеживания и команд функционирует как связь с другим узлом подсистемы телеметрии, отслеживания и команд, так и этот узел подсистемы телеметрии, отслеживания и команд [8].

Следовательно, отказ узла подсистемы телеметрии, отслеживания и команд подпадает под тип взаимозависимости «эффект предшественника». В результате мы имеем:

– в случае S/C#1 отказ узла «поддерживающие системы» делает недоступным как узел «подсистемы телеметрии, отслеживания и команд», так и узел «полезная нагрузка» через «эффект убийцы» (см. рис. 3).

Взаимозависимые многоуровневые космические сети: формальная характеристика

– в случае S/C#2 отказ узла «поддерживающие системы» делает недоступным узел «подсистемы телеметрии, отслеживания и команд» через «эффект убийцы». Узел «подсистемы телеметрии, отслеживания и команд» делает недоступным узел «поддерживающие подсистемы» через «эффект предшественника» (см. рис. 3).



**Рис. 3.** Взаимозависимое многоуровневое сетевое представление для примера космической сети

Для этого конкретного случая взаимозависимой многоуровневой сетью является  $N(G_1, G_2, G_3, E_k, E_p)$ , где

$G_1 = (V_1, E_1)$ , где  $V_1 = \{1, 4\}$  и  $E_1 = \{(1, 4), (4, 1)\}$  – граф для уровня подсистемы телеметрии, отслеживания и команд;

$G_2 = (V_2, E_2)$ , где  $V_2 = \{2, 5\}$  и  $E_2 = \emptyset$  – граф для уровня «поддерживающих подсистем»;

$G_3 = (V_3, E_3)$ , где  $V_3 = \{3\}$  и  $E_3 = \emptyset$  – граф для слоя «полезной нагрузки»;

$$E_k = \{(2, 1), (2, 3), (5, 4)\};$$

$$E_p = \{(1, 2), (1, 3), (4, 5)\};$$

$E_R = \{1\}$ , поскольку только уровень 1 имеет внутриуровневые связи.

Альтернативное представление  $N(A_1, A_2, A_3, C, f)$  примера космической сети приведено следующим образом (см. рис. 4, 5):

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Матрицы смежности  $A_2$  для уровня «поддерживающие подсистемы» (уровень 2) и  $A_3$  для уровня «полезная нагрузка» (уровень 3) тривиальны, так как в этих уровнях нет внутриуровневых связей:

$$A_2 = 0_{2 \times 2} \text{ и } A_3 = 0_{1 \times 1}. \tag{9}$$

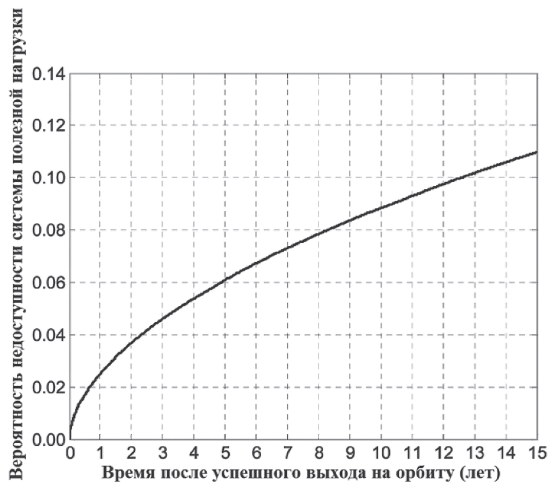
Межслойная матрица C является следующей:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Общая схема нумерации может быть выбрана для облегчения представления взаимозависимых многоуровневых сетей, в частности межслойной матрицы  $C$ . Если общая нумерация выбрана так, что узлы, принадлежащие одному и тому же космическому аппарату, нумеруются последовательно, узлы 1, 2 и 3 принадлежат  $S/C\#1$ , а узлы 4 и 5 –  $S/C\#2$ . Таким образом, межслойная матрица  $C$  может быть уменьшена до блочной диагональной формы:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & & \\ 2 & 0 & 0 & 0_{3 \times 2} & \\ 2 & 1 & 0 & & \\ & & & 0 & 1 \\ 0_{2 \times 3} & & & 2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

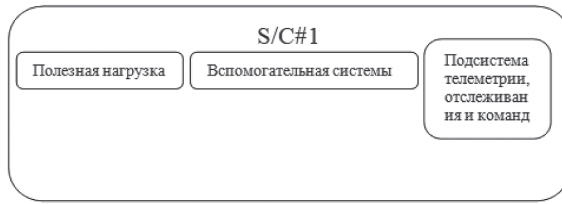
По мере увеличения количества космических аппаратов в космической сети рост межслойной матрицы может быть уменьшен с помощью этой схемы нумерации, поскольку необходимо заполнить только блоки вокруг диагонали [9]. Кроме того, с вычислительной точки зрения это может позволить сохранить матрицу в виде дефицитной матрицы и сохранить память во время моделирования [10, 11].



**Рис. 4.** Выходная вероятность неготовности системы полезной нагрузки с функциональным резервированием подсистемы телеметрии, отслеживания и команд



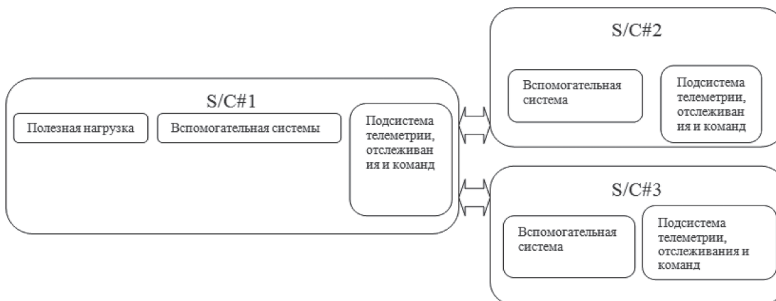
Традиционная монолитная архитектура:



Космическая сеть из двух космических аппаратов:



Космическая сеть из трех космических аппаратов:



**Рис. 5.** Космические архитектуры с различными уровнями избыточности подсистемы телеметрии, отслеживания и команд

Наконец, функция  $f$  отображения для примера космической сети, задается следующим образом.

– На уровне подсистемы телеметрии, отслеживания и команд, нумерованном уровне  $1$ , узлу  $1$  в общей нумерации присваивается номер уровня  $1$ , в то время как узлу  $4$  в общей нумерации присваивается номер уровня  $2$  (рис. 6).

Ниже представлены результаты сравнения вероятностей недоступности системы полезной нагрузки для архитектуры одного, двух и трех космических аппаратов (рис. 7) и график влияния несовершенного беспроводного канала (рис. 8).

– На уровне «вспомогательные подсистемы», нумеруемом уровне  $2$ , узлу  $2$  в общей нумерации присваивается номер уровня  $1$ , в то время как узлу  $5$  в общей нумерации присваивается номер уровня  $2$ .

– На уровне «полезная нагрузка», нумерованном уровне  $3$ , узлу  $3$  в общей нумерации присваивается номер уровня  $1$ . Тогда функция отображения  $f$

$$\begin{cases} f(1) = (1,1) \\ f(2) = (2,1) \\ f(3) = (3,1) \\ f(4) = (1,2) \\ f(5) = (2,2) \end{cases} \quad (12)$$

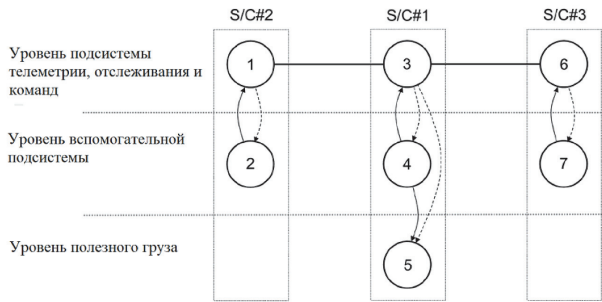


Рис. 6. Взаимозависимое многоуровневое сетевое представление космической сети с 3 космическими аппаратами для функционального резервирования подсистемы телеметрии, отслеживания и команд

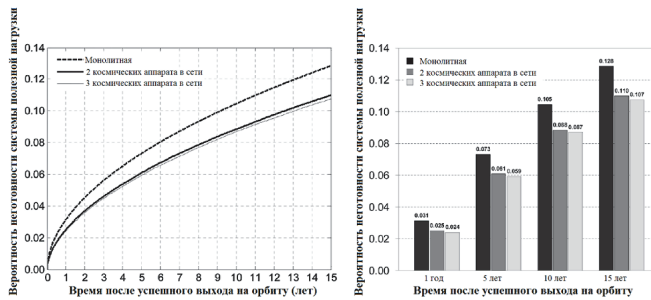


Рис. 7. Сравнение вероятностей недоступности системы полезной нагрузки для архитектуры одного, двух и трех космических аппаратов

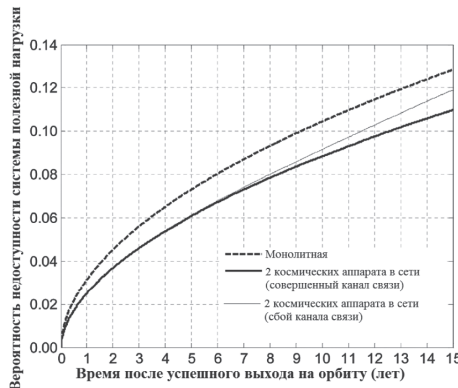


Рис. 8. Влияние несовершенного беспроводного канала

### Заключение

Представлен новый подход к определению космических сетей. Исследование мотивировано, с одной стороны, предполагаемыми ограничениями традиционного анализа живучести сети, которые предполагают по большей части однородность узлов (или некоторые вариации одной и той же функции), с другой – растущим интересом к космическим сетям, в которых различные узлы (космические аппараты) могут совместно использовать различные ресурсы на орбите с соседними космическими аппаратами.

Предлагаемый подход основан на идее отображения сети с разнородными узлами во взаимозависимую многоуровневую сеть. Многослойный аспект фиксирует разбивку сети в соответствии с общими функциональными возможностями в различных узлах и допускает появление однородных подсетей, в то время как аспект взаимозависимости ограничивает сеть для захвата физических характеристик каждого узла.

Формальные определения представления взаимозависимой многоуровневой сети были разработаны в поддержку анализа живучести рассматриваемой сети.

Подход и разработанные инструменты могут быть применены в случае космических сетей, которые состоят из нескольких сетевых космических аппаратов, совместно использующих орбитальные ресурсы, – подсистемы телеметрии, отслеживания и команда, центральной вычислительной машины и подсистемы обработки данных.

### Литература

1. Брусков А.А. Структура программы комплексных испытаний электротехнических систем космических аппаратов // Проблемы и перспективы студенческой науки. 2019. № 2 (6). С 6–7.
2. Брусков А.А. Определение объема комплексных электрических испытаний наноспутников // Инновационные аспекты социально-экономического развития региона: сборник статей по материалам участников X Ежегодной научной конференции аспирантов «МГОТУ» (Королев, 14 мая 2020 г.). М.: Научный консультант, 2020. 554 с.
3. Брусков А.А. Анализ надежности различных систем космических аппаратов // Информационно-технологический вестник. С 34–46. ISSN 2409-1650.
4. Kurant M, Thiran P (2006) Layered Complex Networks. *Phys Rev Lett* 96(13).
5. Xu X-L, Qu Y-Q, Guan S, Jiang Y-M, He D-R (2011) Interconnecting Bilayer Networks. *Europhys Lett* 93.
6. Albert R, Barabási A-L (2002) Statistical Mechanics of Complex Networks. *Rev Mod Phys* 74(1): 47–97.
7. Brown O, Eremenko P (2006) The Value Proposition for Fractionated Space Architectures. Proceedings of the AIAA Space 2006 Conference, San Jose, CA, 19–21 September 2006, AIAA-2006-7506.
8. Brown O, Eremenko P (2006) Fractionated Space Architectures: A Vision for Responsive Space. Proceedings of the 4th Responsive Space Conference, Los Angeles, CA, 24–27 April 2006, RS4-2006-1002.
9. Crucitti P, Latora V, Marchiori M (2004) Model for Cascading Failures in Complex Networks. *Phys Rev E* 69(4).

10. Newman M.E.J. (2010) *Networks, an Introduction*. New York, NY: Oxford University Press.
11. Zio E, Sansavini G (2001) Modeling Interdependent Network Systems for Identifying Cascade-Safe Operating Margins. *IEEE T Reliab* 60(1): 94–101.

### References

1. Bruskov A.A. (2019) *Struktura programmy kompleksnyh ispytaniy elektrotekhnicheskikh sistem kosmicheskikh apparatov* [The structure of the program for complex tests of electrical systems of spacecraft]. *Problemy i perspektivy studencheskoj nauki*, no. 2 (6), pp. 6–7 (in Russian).
2. Bruskov A.A. (2020) *Opreделение ob'ema kompleksnyh elektricheskikh ispytaniy nanospunikov, Innovacionnye aspekty social'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona: sbornik statej po materialam uchastnikov X Ezhegodnoj nauchnoj konferencii aspirantov «MGOTU» (Korolev, 14 maya 2020 g.)* [Determination of the scope of complex electrical tests of nanosatellites: Innovative aspects of the socio-economic development of the region: a collection of articles based on the materials of the participants of the X Annual scientific conference of graduate students “MGOTU” (Korolev, May 14, 2020)]. Moscow, Nauchnyj konsul'tant Publishing, 554 p. (in Russian).
3. Bruskov A.A. *Analiz nadezhnosti razlichnyh sistem kosmicheskikh apparatov* [Analysis of the reliability of various systems of spacecraft]. *Informacionno-tehnologicheskij vestnik*, pp. 34–46 (in Russian). ISSN 2409-1650
4. Kurant M., Thiran P. (2006) Layered Complex Networks. *Phys Rev Lett* 96(13).
5. Xu X.-L., Qu Y.-Q., Guan S., Jiang Y.-M., He D.-R. (2011) Interconnecting Bilayer Networks. *Europhys Lett* 93.
6. Albert R. Barabási A-L (2002) Statistical Mechanics of Complex Networks. *Rev Mod Phys* 74(1): 47–97.
7. Brown O., Eremenko P. (2006) The Value Proposition for Fractionated Space Architectures. Proceedings of the AIAA Space 2006 Conference, San Jose, CA, 19–21 September 2006, AIAA-2006-7506.
8. Brown O., Eremenko P. (2006) Fractionated Space Architectures: A Vision for Responsive Space. Proceedings of the 4th Responsive Space Conference, Los Angeles, CA, 24–27 April 2006, RS4-2006-1002.
9. Crucitti P., Latora V., Marchiori M. (2004) Model for Cascading Failures in Complex Networks. *Phys Rev E* 69(4).
10. Newman M.E.J. (2010) *Networks, an Introduction*. New York, NY: Oxford University Press.
11. Zio, Sansavini G. (2001) Modeling Interdependent Network Systems for Identifying Cascade-Safe Operating Margins. *IEEE T Reliab* 60(1): 94–101.