

М. Е. ИЛЬЧЕНКО<sup>1</sup>, Т. Н. НАРЫТНИК<sup>1</sup>, В. И. ПРИСЯЖНЫЙ<sup>2</sup>,  
С. В. КАПШТЫК<sup>2</sup>, С. А. МАТВИЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»*

<sup>2</sup> *Национальный центр управления и испытаний космических средств.*

<sup>3</sup> *Научно-производственный комплекс «Курс».*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ПОСТРОЕНИЮ ОРБИТАЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

*Рассмотрены вопросы построения низкоорбитальной спутниковой системы, предназначенной для предоставления услуг Интернета Вещей и адаптированной к особенностям услуг и систем Интернета Вещей. Рассматривая система обеспечивает формирование необходимой телекоммуникационной инфраструктуры на базе низкоорбитальной спутниковой системы широкополосного доступа, и расположенных на низкой околоземной орбите вычислительных средств, обеспечивающих проведение обработки информации устройств и систем Интернета Вещей, и выполнение необходимых вычислений. Для построения телекоммуникационной части спутниковой системы Интернета Вещей выбрана архитектура «распределенного спутника», которая позволяет с одной стороны обеспечить полную функциональность сложных телекоммуникационных систем, а с другой стороны - применять космические аппараты форм-фактора нано-спутник/куб-сат. Применение для построения спутниковой системы космических аппаратов типа куб-сат позволяет существенно сократить затраты на разворачивание системы и время разворачивания системы. Перспективным направлением развития систем Интернета Вещей является реализация концепции «туманных вычислений» для обработки информации устройств Интернета Вещей. Для реализации «туманных вычислений» предложено включить в состав каждого «распределенного спутника» отдельного спутника-вычислителя, и построить на основе спутников-вычислителей орбитальную распределенную вычислительную сеть. Рассмотрены вопросы обеспечения связности между спутниками-вычислителями в составе орбитальной распределенной вычислительной сети с помощью линий связи между распределенными спутниками с учетом особенностей орбитального построения спутниковой системы. Для обеспечения непрерывного предоставления услуг Интернета Вещей предложено создание и размещение на базе орбитальной вычислительной сети распределенной локализованной базы данных, показано направление передачи оперативной части локализованной распределенной базы данных с учетом движения космических аппаратов в орбитальной плоскости и вращения Земли. Представлены предложения о распределении избыточной вычислительной нагрузки, возникающей в отдельных регионах зоны обслуживания спутниковой телекоммуникационной системы, с привлечением ресурса соседних спутников-вычислителей в своей орбитальной плоскости и в соседних орбитальных плоскостях. Предложен алгоритм перемещения избыточной вычислительной нагрузки в приполярные и океанические районы.*

**Ключевые слова:** *низкоорбитальная система спутниковой связи; Интернет Вещей; распределенная вычислительная сеть*

### Введение

Интернет вещей (англ. Internet of Thing - IoT) занимает все более важное место в современных инфотелекоммуникационных технологиях. Согласно прогнозам аналитиков, в 2022 году объем мирового рынка IoT и связанных с ним технологий достигнет 1,2 трлн. дол. США при среднегодовом темпе роста 13,6 % [1]. Жизнь большого города и работа предприятия, взаимодействие человека и машины, общественные проекты и забота о благополучии каждого гражданина — все это будет про-

исходить на основе данных от «умных» датчиков и устройств [2]. Как заявляет компания Ericsson, в 2023 году количество подключенных к сотовым сетям устройств IoT составит 3,5 млрд. единиц [1]. Развитие IoT неразрывно связано с повышением спроса на пропускную способность телекоммуникационных систем, ориентированных на обеспечение IoT. Все большее внимание операторов и изготовителей спутниковых систем связи привлекает сегмент малых и сверхмалых космических аппаратов. К этому сегменту относятся нано-спутники (или куб-саты) (массой 1...10 кг), микро-спутники (мас-

сой 10...50 кг), мини-спутники (массой 50...500 кг). По оценкам компании SpaceWorks в ближайшие десять лет прогнозируется запуск 2800 нано/микро-спутников (массой 1...50 кг) [3]. Только в 2019 году прогнозируется, что количество запущенных космических аппаратов в этом сегменте рынка составит 294...393.

Целью данной работы является исследование подходов к созданию спутниковой системы связи, адаптированной к особенностям систем Интернета Вещей и реализующей концепцию «туманных» и «граничных вычислений» [4, 5].

### Туманные и граничные вычисления. Требования к системе связи IoT

Развитие технологий IoT сопровождается внедрением IoT-устройств в стационарные / неподвижные объекты и появлением большого количества мобильных IoT-устройств. Первоначально системы IoT ориентировались на использование облачных технологий обработки данных, однако внедрение мобильных IoT-устройств стимулировало поиск более эффективных решений.

Методом повышения эффективности систем IoT является перенос вычислительных мощностей к границам сети и реализация концепции «туманных вычислений» и «граничных вычислений» [4, 5]. В этом случае, в отличие от облачной архитектуры, обработка информации IoT-устройств осуществляется на нижних и промежуточных уровнях иерархической структуры информационной системы (рис. 1). Это позволяет освободить систему связи от передачи всего объема трафика от IoT-устройств, находящихся на нижнем иерархическом уровне системы, к центру облачных вычислений, который находится на верхнем иерархическом уровне, и в обратном направлении. При реализации концепции «туманных вычислений» и «граничных вычислений» на более высокие иерархические уровни передаются результаты обработки информации, что

сокращает объем передаваемой информации и повышает «ценность» этой информации.

Система связи, предназначенная для предоставления услуг IoT и поддерживающая концепцию «туманных вычислений» и «граничных вычислений», должна обладать вычислительными мощностями, расположенными как можно ближе к границе сети, и предоставлять эти мощности системам IoT [6]. Низкоорбитальная система спутниковой связи, предназначенная для обеспечения работы систем IoT, должна учитывать особенности реализации концепции «туманных вычислений» и «граничных вычислений» и предоставить потребителям IoT необходимые им вычислительные мощности. Таким образом задачу исследования можно определить следующим образом:

Определить возможность размещения вычислительных мощностей в составе орбитального сегмента и рассмотреть особенности функционирования вычислительных мощностей с учетом применения для их размещения наиболее простых архитектурных решений и конструктивных особенностей платформ космических аппаратов форм-фактора куб-сат или нано-спутник.

### Размещение вычислительной мощности в спутниковой системе на основе архитектуры распределенного спутника

В низкоорбитальной системе спутниковой связи, построенной на основе архитектуры «распределенного спутника» (рис. 2) [7], задача размещения вычислительных мощностей на границе системы может быть решена путем включения в состав каждого «распределенного спутника» отдельного оконечного спутника – спутника-вычислителя.

Спутник-вычислитель реализуется на основе платформы нано-спутника /куб-сата. Полезной нагрузкой такого спутника является вычислительный модуль.

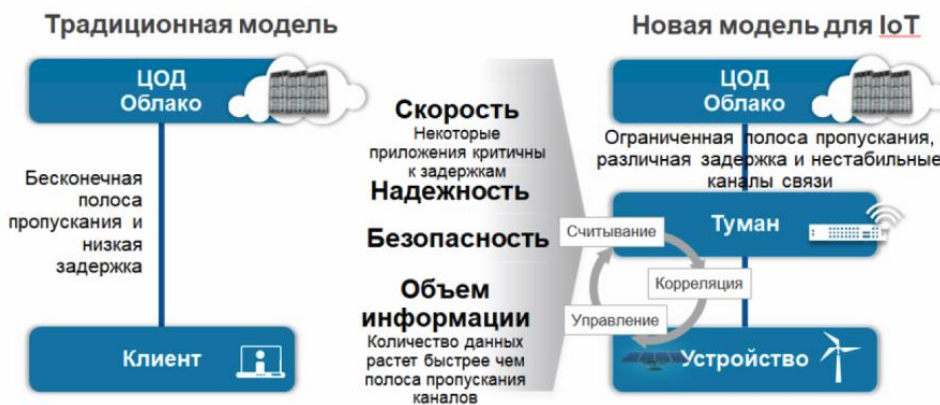


Рис. 1. Сравнение модели облачных и туманных вычислений для систем IoT [4]

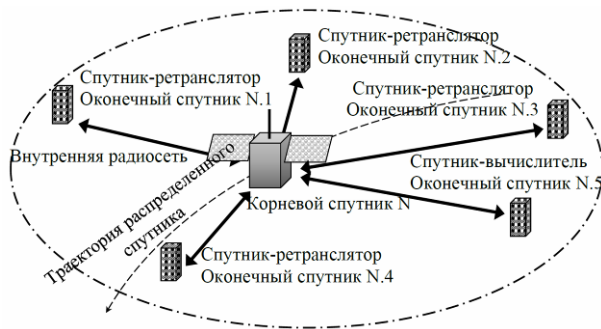


Рис. 2. Архитектура «распределенного спутника». Централизованная конфигурация

Концепция «распределенного спутника» позволяет перераспределить мощность, генерируемую бортовой системой электроснабжения нано-спутника, и направить ее на обеспечение работы полезной нагрузки. При этом отключается та часть бортовых потребителей, которые не используются после входа нано-спутника во внутреннюю радиосеть «распределенного спутника». К этим системам относятся, как минимум: приемо-передатчик бортовой командно-телеметрической радиолинии, радиолиния передачи информации полезной нагрузки (которая определяется функциональным назначением системы), бортовой приемник GPS. Все функции передачи командно-телеметрической информации и информации полезной нагрузки, измерения параметров движения нано-спутника и определения его положения на орбите выполняет внутренняя радиосеть «распределенного спутника».

Вычислительный модуль нано-спутника оснащен собственным процессором и памятью. Производительность ядра вычислительного модуля (вычислительная мощность) определяется на основе компромисса между следующими показателями:

– массово-габаритные показатели, мощность, потребляемая от бортовой системы электроснабжения платформы нано-спутника, и способность отводить тепло;

– количество устройств IoT в зоне обслуживания «распределенного спутника», объем и характеристики генерируемого ими двустороннего трафика;

– сложность алгоритмов обработки информации устройств IoT, находящихся в зоне обслуживания «распределенного спутника», объем необходимого программного обеспечения, ограничения по времени обработки информации IoT.

Вычислительный модуль может быть реализован на основе серийно выпускаемых одноплатных компьютеров (COTS-технология) и соответствующего базового программного обеспечения.

### Тракт передачи данных IoT-устройства

В низкоорбитальной системе спутниковой связи, предназначенной для предоставления услуг IoT, посылки IoT-устройств по линии вверх (от IoT-устройства к граничному или туманному вычислителю) и обратно передаются по составному тракту (рис. 3). В состав тракта входят: сеть радиодоступа между IoT-устройством и VSAT-терминалом, спутниковая радиолиния (радиолиния «земля-космос» или «космос-земля») между VSAT-терминалом и спутником-ретранслятором распределенного спутника, внутренняя радиосеть распределенного спутника.

Программное обеспечение услуги IoT находится на прикладном уровне согласно структуре уровней TCP/IP. Это программное обеспечение находится в составе IoT-устройства, которое является источником информации – датчиком, или приводом – исполнительным органом услуги IoT.

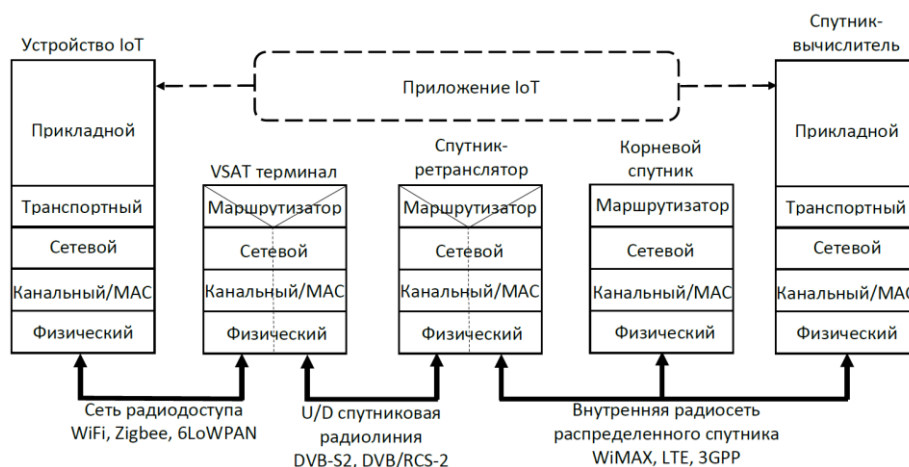


Рис. 3. структура тракта передачи посылок IoT-устройств на участке IoT-устройство – спутник-вычислитель

IoT-устройство – источник информации (датчик) формирует посылку IoT-устройства в соответствии с алгоритмом функционирования системы IoT. Посылка передается по внутренним интерфейсам через более низкие уровни: транспортный, сетевой, канальный, - к физическому уровню для передачи через радиointерфейс. Процедура инкапсуляции IoT-посылки определяется стандартом наземной сети радиодоступа. Наземная сеть может быть построена на основе стандартов, ориентированных на низкое энергопотребление терминальными устройствами, к примеру: WiFi, Zigbee, 6LoWPAN.

Центральная станция наземной сети доступа совмещена с VSAT-терминалом низкоорбитальной системы спутниковой связи. В VSAT-терминале производится маршрутизация посылок IoT-устройств и формирование /обработка транспортного потока линии «земля-космос» и «космос-земля» в соответствии с выбранной технологией функционирования VSAT-сети спутниковой связи. В качестве варианта реализации может рассматриваться стандарт DVB/RCS-2. Возможно и применение других технологий, предлагаемых разработчиками. Необходимо отметить, что, не смотря на различия в названиях предлагаемых технологий VSAT-сетей различных разработчиков, все они в прямом канале (в данном случае канал «космос-земля», или DownLink) используют стандарт DVB-S2 и его продолжение DVB-S2x. Отличия касаются только организации обратного канала (в данном случае канал «земля-космос», или Up-Link).

Спутник-ретранслятор из состава распределенного спутника принимает посылку IoT-устройства по линии «земля-космос» и транслирует ее во внутреннюю радиосеть. Спутник-ретранслятор обеспечивает преобразование формата потока по линии «земля-космос» и формат внутренней радиосети. Внутренняя радиосеть распределенного спутника учитывает особенности архитектуры распределенного спутника и может быть реализована на базе одного из стандартов сетей широкополосного доступа: WiMAX, LTE, 3GPP, - с учетом их адаптации. По внутренней радиосети посылка IoT-устройства поступает на маршрутизатор, который находится в полезной нагрузке корневого спутника (см. рис. 2) и далее в спутник-вычислитель, где производится обработка посылки и выполняются необходимые вычисления согласно алгоритму функционирования системы IoT. Результат обработки передается к IoT-устройству в обратном направлении.

Обобщенные результаты обработки посылок IoT-устройств передаются к центру облачных вычислений (см. рис. 1) по тракту, который включает спутник-вычислитель – корневой спутник – линия связи между спутниками – корневой спутник –

спутник-ретранслятор – VSAT-терминал центра облачных вычислений.

Время формирования отклика системы IoT с учетом спутникового сегмента и реализации «туманных» или «граничных» вычислений составляет:

$$T_{IoT} = t_{S-C} + t_{comp} + t_{C-R},$$

где  $t_{S-C}$  – задержка в передаче посылки IoT-устройства к спутнику-вычислителю;

$t_{comp}$  – время обработки запроса IoT-устройства в спутнике-вычислителе;

$t_{C-R}$  – задержка в передаче команды (результата обработки посылки) к исполнительному IoT-устройству.

Задержка в передаче посылки от IoT-устройства к спутнику-вычислителю в свою очередь составляет:

$$t_{S-C} = t_{IoT1} + t_{WiFi} + t_{VSATup} + t_{up} + t_{ST1} + t_{SN1} + t_{CS} + t_{SN2},$$

где  $t_{IoT1}$  – время формирования посылки в формате наземной сети радиодоступа;

$t_{WiFi}$  – задержка на передачу посылки в наземной сети радиодоступа;

$t_{VSATup}$  – задержка на маршрутизацию посылки и преобразование форматов в VSAT-терминале;

$t_{up}$  – задержка на передачу посылки по спутниковой радиолнии «земля-космос»;

$t_{ST1}$  – задержка на обработку и преобразование формата передачи посылки в спутнике-ретрансляторе;

$t_{SN1}$  – задержка на передачу посылки во внутренней радиосети;

$t_{CS}$  – задержка на маршрутизацию посылки в корневом спутнике;

$t_{SN2}$  – задержка на передачу посылки по внутренней радиосети к спутнику-вычислителю.

Величина задержки в передаче команды от спутника-вычислителя к исполнительному IoT-устройству  $t_{C-R}$  имеет аналогичные составляющие. Отличие состоит в замене параметра  $t_{up}$  параметром  $t_{down}$  – задержка на передачу команды по спутниковой радиолнии «космос-земля». Учитывая ограниченные размеры наземной сети радиодоступа, внутренней радиосети распределенного спутника, а также нормирование при разработке и изготовлении задержки в оборудовании формирования/обработки, преобразования форматов и маршрутизации информации, ряд составляющих суммарной задержки при передаче посылки/команды IoT-устройства можно считать минимальными, не оказывающими существенного

влияния на величину задержки. К ним относятся:  $t_{\text{IoT}}$ ;  $t_{\text{WiFi}}$ ;  $t_{\text{VSATup}}$ ;  $t_{\text{ST}_1}$ ;  $t_{\text{SN}_1}$ ;  $t_{\text{CS}}$ ;  $t_{\text{SN}_2}$ . Наибольшую неопределенность вносят  $t_{\text{up}}/t_{\text{down}}$ .

Задержки на передачу посылки IoT-устройства от VSAT-терминала к спутнику-ретранслятору распределенного спутника  $t_{\text{up}}$  или в обратном направлении  $t_{\text{down}}$  являются случайной величиной, которая зависит от геометрических соотношений между VSAT-терминалом и космическим аппаратом во время передачи посылки /команды управления, и составляет [8]

$$t_{\text{down}} \cdot t_{\text{up}} = \frac{(R+h) \cdot \sin \theta}{c \cdot \cos \beta},$$

здесь  $R$  – радиус Земли (принят 6371 км);

$h$  – высота орбиты космического аппарата;

$\theta$  – центральный угол между подспутниковой точкой и местом размещения VSAT-терминала;

$\beta$  – угол места луча VSAT-терминала в направлении космического аппарата;  $c$  – скорость света

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Центральный угол между подспутниковой точкой и местом размещения VSAT-терминала рассчитывается с использованием известных выражений [9]:

$$\theta = \arccos(\cos \Delta\lambda \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \psi),$$

где  $\Delta\lambda$  – относительная долгота подспутниковой точки и VSAT-терминала;

$\phi$  – широта подспутниковой точки;

$\psi$  – широта VSAT-терминала.

Величина времени задержки  $t_{\text{up}}/t_{\text{down}}$  является случайной величиной, которая зависит от высоты орбиты космического аппарата  $h$  и текущих значений центрального угла  $\theta$  и угла места  $\beta$ , и находится в пределах

$$\frac{h}{c} \leq t_{\text{down}} \cdot t_{\text{up}} \leq \frac{(R+h) \cdot \sin \theta_{\text{max}}}{c \cdot \cos \beta},$$

где  $\theta_{\text{max}}$  – максимальное значение центрального угла, определяемое зоной обслуживания космического аппарата;

$\beta_{\text{min}}$  – минимально допустимое значение угла места луча VSAT-терминала, определяемое в первую очередь требованиями по качеству обслуживания QoS в системе.

Для случая низкоорбитальной системы спутниковой связи можно принять, что задержка в передаче посылки/команды IoT-устройств распределена равномерно в данных пределах. Значения пределов для равномерного распределения в зависимости от

высоты орбиты низкоорбитальной системы спутниковой связи и ограничения минимального угла места луча VSAT-терминала приведены в таблице 1.

Таблица 1

Пределы изменения задержки на распространение в спутниковой радиолинии в тракте передачи посылки / команды IoT-устройств

Высота орбиты, км	Минимальная задержка, мс	Максимальная задержка, мс		
		$\beta_{\text{min}} = 40^\circ$	$\beta_{\text{min}} = 50^\circ$	$\beta_{\text{min}} = 60^\circ$
500	1,67	2,47	2,13	1,9
800	2,67	3,86	3,35	3,03
1100	3,67	5,2	4,56	4,13

### Орбитальная одноранговая распределенная вычислительная сеть

Орбитальный сегмент низкоорбитальной системы спутниковой связи для предоставления услуг IoT построен по традиционной для таких систем архитектуре [10, 11]. Орбитальный сегмент состоит из  $N$  орбитальных плоскостей, в каждой из которых размещены  $M$  распределенных спутников. Количество орбитальных плоскостей и распределенных спутников в каждой орбитальной плоскости зависит от высоты орбиты, географической широты границ зоны приоритетного / непрерывного обслуживания (зона сплошного покрытия), ограничений на минимальное значение угла места луча VSAT-терминала пользователя. Для повышения надежности функционирования и сокращения времени доставки информации в низкоорбитальных спутниковых системах связи применяются линии связи между спутниками, которые позволяют повысить оперативность обмена информацией между абонентами, находящимися в зонах обслуживания различных космических аппаратов. В низкоорбитальной системе спутниковой связи для систем IoT применяются линии связи между распределенными спутниками. Каждый распределенный спутник обеспечивает связь с двумя соседними распределенными спутниками в своей орбитальной плоскости и по одному распределенному спутнику в двух соседних орбитальных плоскостях [7].

Спутники-вычислители, входящие в состав «распределенных спутников» низкоорбитальной системы спутниковой связи для IoT, формируют одноранговую орбитальную распределенную вычислительную сеть для обеспечения работы систем IoT. Структура одноранговой орбитальной распределенной вычислительной сети приведена на рис. 4. Находящиеся на поверхности Земли устройства IoT используют вычислительную мощность спутника-вычислителя из состава «распределенного спутни-

ка», предоставляющего услуги связи в районе расположения IoT устройства в данный момент времени. Связность одноранговой орбитальной распределенной вычислительной сети обеспечивается с помощью комбинации внутренней радиосети распределенного спутника и сети линий связи между распределенными спутниками.

Как показано на рис. 4, связность с потребителями услуг IoT, находящимися на поверхности Земли, обеспечивают спутники-ретрансляторы. Маршрутизатор корневого спутника обеспечивает маршрутизацию информации во внутренней радиосети распределенного спутника и между внешними линиями связи между распределенными спутниками и абонентами внутренней радиосети. Спутник-вычислитель является абонентом внутренней радиосети и через маршрутизатор корневого спутника подключен к орбитальной одноранговой распределенной сети.

Как ранее уже упоминалось, принятая архитектура построения орбитального сегмента системы предполагает использование линий связи между распределенными спутниками [7]. Каждый распределенный спутник обеспечивает непосредственную связь с четырьмя соседними распределенными спутниками. На рис. 5 представлен граф связности орбитального сегмента низкоорбитальной системы спутниковой связи для IoT. Учитывая, что все орбитальные плоскости содержат одинаковое количество распределенных спутников, граф связности имеет прямоугольную решетчатую форму. Количество столбцов в графе соответствует количеству орби-

тальных плоскостей  $N$ . Количество строк в графе соответствует количеству распределенных спутников в каждой орбитальной плоскости  $M$ . Обозначение  $PC_{n,m}$  определяет  $m$ -й распределенный спутник в  $n$ -й орбитальной плоскости. Как видно из графа, каждый распределенный спутник непосредственно связан с четырьмя соседними распределенными спутниками. Так, спутник  $PC_{3,3}$  непосредственно связан со следующими спутниками:  $PC_{3,2}$  и  $PC_{3,4}$  в орбитальной плоскости 3, со спутником  $PC_{2,3}$  в орбитальной плоскости 2 и со спутником  $PC_{4,3}$  в орбитальной плоскости 4.

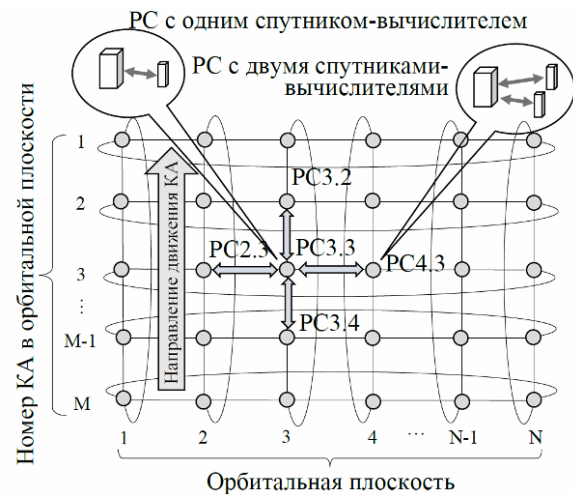


Рис. 5. Связность одноранговой орбитальной вычислительной сети

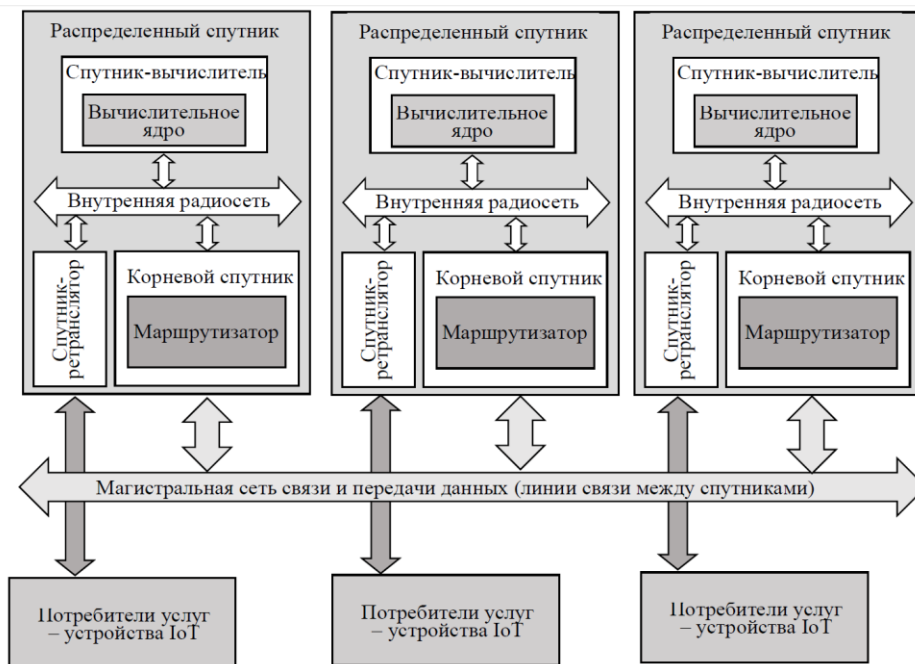


Рис. 4. Одноранговая орбитальная вычислительная сеть

Параметры связности одноранговой орбитальной вычислительной сети имеют важное значение при определении времени обработки посылки IoT-устройства при перераспределении вычислительной нагрузки, т.е. в случае, когда по различным причинам часть вычислительной нагрузки передается на обработку в спутники-вычислители других распределенных спутников.

Связность в одноранговой орбитальной вычислительной сети может быть описана с использованием модифицированной матрицы связности. Для приведенного на рис. 5 спутника-вычислителя, который входит в состав РС3.3 (3-й распределенный спутник в 3-й орбитальной плоскости) модифицированная матрица связности  $H$  имеет вид:

$$H_{3,3} = \begin{bmatrix} 4 & 3 & 2 & 3 & 4 & 5 & \dots & 5 \\ 3 & 2 & 1 & 2 & 3 & 4 & \dots & 4 \\ 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 3 & \dots & 3 \\ 3 & 2 & 1 & 2 & 3 & 4 & \dots & 4 \\ 4 & 3 & 2 & 3 & 4 & 5 & \dots & 5 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ 5 & 4 & 3 & 4 & 5 & 6 & \dots & 6 \end{bmatrix}$$

Модифицированная матрица связности имеет вид прямоугольной матрицы размерности  $M \times N$ , где  $M$  – количество распределенных спутников в одной орбитальной плоскости,  $N$  – количество орбитальных плоскостей. Каждый элемент матрицы определяет количество ретрансляций (скачков, хопов) для доставки посылки от заданного распределенного спутника. Для самого распределенного спутника значение элемента составляет 0.

Значение каждого элемента  $(m_i, n_i)$  относительно элемента  $(m_0, n_0)$  может быть рассчитано следующим образом:

$$h_{m,n} = \Delta_m + \Delta_n,$$

где  $\Delta_m$  и  $\Delta_n$  – соответственно разница в номере распределенных спутников в орбитальной плоскости и разница в номерах орбитальных плоскостей. С учетом графа связности, приведенного на рис. 5, эти разницы рассчитываются следующим образом:

$$\Delta_m = \begin{cases} |m_i - m_0| & \text{для } \Delta_m \leq N/2, \\ |M + m_i - m_0| & \text{для } \Delta_m > N/2, m_0 > m_i, \\ |M + m_0 - m_i| & \text{для } \Delta_m > N/2, m_i > m_0. \end{cases}$$

Значение  $\Delta_n$  рассчитывается аналогично.

При оценке задержки необходимо учитывать следующие соображения. Задержка в линиях связи между спутниками в одной орбитальной плоскости

$t_{IS}$  является практически постоянной и оценивается следующим выражением:

$$t_{IS} = \frac{2(R_e + h) \sin \frac{\Delta\phi}{2}}{c} = \frac{2(R_e + h) \sin \left( \frac{360^\circ}{2M} \right)}{c},$$

где  $R_e$  – радиус Земли (6371 км);

$h$  – высота орбиты;

$\Delta\phi$  – угловой разнос между распределенными спутниками в орбитальной плоскости;

$M$  – количество распределенных спутников в орбитальной плоскости;  $c$  – скорость света,  $3 \cdot 10^8$  м/с.

Задержка в линии связи между спутниками в соседних орбитальных позициях  $t'_{IS}$  изменяется в зависимости от широты подспутниковой точки обоих спутников. Расчет задержки учитывает фазирование распределенных спутников в соседних орбитальных плоскостях для обеспечения безопасного прохождения участка перехода с восходящего участка орбиты на нисходящий и в обратном направлении. Эта задержка изменяется в следующих пределах:

$$t'_{ISmin} = \frac{1}{2} t_{IS} = \frac{(R_0 + h) \sin \frac{\Delta\phi}{2}}{c},$$

$$t'_{ISmax} = \frac{2(R_0 + h)}{c} \times \sin \left[ \frac{1}{2} \arccos \left( \cos \frac{\Delta\phi}{2} \cdot \cos \frac{L}{R_0} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \right) \right],$$

где  $L$  – ширина зоны обслуживания одного распределенного спутника (размер зоны обслуживания поперек линии пути).

Для размеров зоны обслуживания распределенного спутника, приведенных в [10], величина задержки в линиях связи между распределенными спутниками приведена в таблице 2.

Таблица 2

Величина задержки на передачу в линиях связи между спутниками для низкоорбитальной системы спутниковой связи высотой 850 км

Угол места $\beta$ (град)	Ширина полосы обслуживания РС (км)	Количество РС в орбитальной плоскости	$t_{IS}$ (мс)	$t'_{ISmin}$ (мс)	$t'_{ISmax}$ (мс)
40°	1179	32	4,72	2,36	5,0
50°	855	48	3,15	1,57	3,59
60°	600	64	2,36	1,18	2,55

### Распределенная локализованная база данных

В памяти вычислительного модуля спутника-вычислителя хранится база данных, содержащая следующую информацию:

- данные по устройствам IoT, включая данные для идентификации устройств (MAC и IP адреса, тип и метод адресации), типы устройств, координаты устройств IoT (для стационарных устройств) и границ районов обслуживания для подвижных (мобильных) устройств IoT, константы, коэффициенты, прочие данные, поставляемые оператором системы IoT для обработки информации от конкретных устройств IoT;

- программное обеспечение для обработки информации IoT, обеспечивающее проведение вычислений для задач и услуг систем и средств IoT, характеристики производительности устройств IoT;

- результаты обработки информации IoT в реальном масштабе времени в привязке к каждому устройству;

- прочая информация.

База данных и, соответственно, память вычислительного модуля, делится на две части: консервативная часть и оперативная часть. Консервативная часть содержит информацию с длительным сроком хранения, актуальность которой сохраняется на период, который превышает один орбитальный период (период обращения спутника по орбите). Оперативная часть содержит результаты обработки информации IoT в режиме реального времени с учетом обеспечения точек восстановления базы данных в случаях отказа одного из элементов системы и частичной утраты информации оперативной части.

Учитывая постоянное движение спутников относительно поверхности Земли в низкоорбитальных спутниковых системах, в зависимости от ограничений угла места антенны терминала земной станции и высоты орбиты время «видимости» для спутника составляет от нескольких минут до 15-20 минут. По истечении этого времени спутник «выходит» из зоны видимости терминала земной станции и в зону видимости «входит» следующий спутник. Для обеспечения непрерывности предоставления услуги устройствам и системам IoT низкоорбитальная система спутниковой связи должна обеспечить передачу результатов предыдущих операций обработки информации от спутника-вычислителя из состава «уходящего» спутника к спутнику-вычислителю «приходящего» спутника.

База данных, хранящаяся в памяти вычислительных модулей орбитальной распределенной вычислительной сети, учитывает размещение устройств IoT на поверхности Земли и состоит из

совокупности локализованных баз данных. Основную часть локализованной базы данных составляет оперативная часть базы данных, поскольку именно эта часть «привязана» к устройствам IoT в данном районе. Для локализации базы данных «распределенные спутники» по линиям связи между спутниками производят передачу/обмен информацией о результатах обработки текущих запросов от устройств IoT в привязке к месту их размещения. На рис. 6 показана схема передачи информации в одной орбитальной плоскости для поддержания локализованной базы данных. Как видно из рис. 6, информация передается в направлении, противоположном направлению движения спутников в орбитальной плоскости.

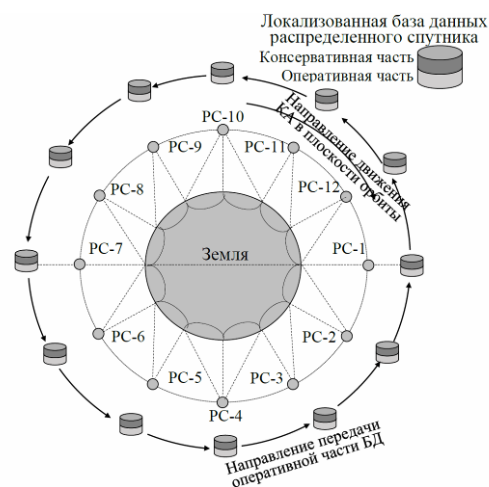


Рис. 6. Распределенная база данных одной орбитальной плоскости низкоорбитальной системы IoT

При рассмотрении маршрутизации трафика в низкоорбитальных спутниковых системах необходимо учитывать вращение Земли. Влияние вращения Земли возрастает при увеличении наклона орбиты спутниковой системы. Влияние вращения Земли, в частности, проявляется в том, что абоненты, находящиеся на границе зон обслуживания двух распределенных спутников, относящихся к соседним орбитальным плоскостям, постепенно переходят из полосы обслуживания одной орбитальной плоскости в полосу обслуживания другой орбитальной плоскости [11]. Для систем IoT это может привести к ситуации, когда передавшее посылку IoT-устройство не сможет получить команду, поскольку перейдет в зону действия полосы обслуживания соседней орбитальной плоскости, а спутники-вычислители в этой орбитальной плоскости не получат обновленной оперативной части локализованной базы данных. Вероятность такого события уве-



личивается по мере уменьшения широты IoT-устройств.

Для исключения утраты управления IoT-устройствами и обеспечения непрерывности предоставления услуги во всей зоне обслуживания орбитальная распределенная вычислительная сеть должна обеспечивать маршрутизацию части трафика оперативной части локализованной базы данных в соседние орбитальные плоскости в направлении вращения Земли для учета перемещения IoT-устройств между полосами обслуживания орбитальных плоскостей. На рис. 7 показан принцип распределения трафика оперативной части локализованной базы данных в орбитальной распределенной вычислительной сети.

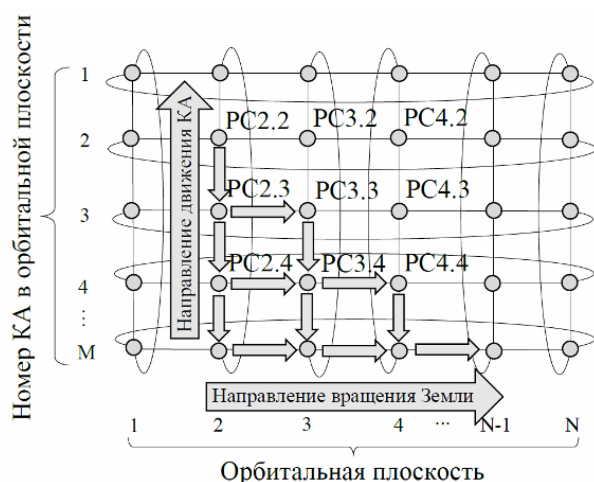


Рис. 7. Маршрутизация трафика IoT устройств в направлении вращения Земли

Оперативная часть локализованной базы данных передается от спутника-вычислителя из состава PC2.2 к спутнику-вычислителю PC2.3. Спутник-вычислитель из состава PC2.3 анализирует листинг IoT-устройств, попадающих в зону обслуживания PC2.3 и передает спутнику-вычислителю из состава PC3.3 в соседней орбитальной плоскости ту часть базы данных, которая касается IoT-устройств, которые перешли в полосу обслуживания соседней орбитальной плоскости. Остальная часть оперативной части локализованной базы данных продолжает циркуляцию в орбитальной плоскости 2 с учетом ее актуализации по результатам обработки текущих посылок IoT-устройств. Аналогично спутник-вычислитель из состава PC3.3 после обработки текущих посылок IoT-устройств из зоны обслуживания PC3.3 передает оперативную часть локализованной базы данных спутнику-вычислителю из состава PC3.4. Спутник-вычислитель из состава PC3.4 выполняет аналогичную процедуру распределения оперативной части локализованной базы данных.

## Распределение избыточной нагрузки и перетекание нагрузки в приполярные и океанические области

Учитывая природу IoT, основным требованием к системе IoT является минимизация вероятности отказа в обслуживании IoT-устройства (обработки посылки IoT-устройства). Реализация концепции «туманных» и «граничных» вычислений существенно снижает риск, связанный с передачей информации по составным каналам передачи данных большой протяженности. Стремление минимизировать вероятность отказа в обслуживании в системе IoT приводит к необходимости существенно увеличить вычислительную мощность космического сегмента. Компромисс между стоимостью орбитального сегмента и вероятностью отказа в обслуживании системы возможно найти на основе анализа особенностей трафика IoT-устройств.

Вопросам исследования трафика IoT систем и устройств посвящено достаточно много публикаций [14 - 18]. Несмотря на повышенное внимание к вопросам исследования трафика IoT систем и устройств подавляющая часть исследований ориентирована на рассмотрение функционирования сетей связи поколения LTE, 5G по передаче трафика IoT, на анализ трафика, формируемого IoT-устройствами города или кампуса, на анализ трафика IoT-устройств, формируемого под управлением различного программного обеспечения управления. Общим во всех исследованиях является применение для оценки трафика IoT систем и устройств методов и математического аппарата теории передачи трафика и систем массового обслуживания [14, 15, 18].

Также представляют интерес интегральные оценки объема трафика передачи данных в мобильных сетях и плотности IoT-устройств. По прогнозам, сети поколения 5G должны обеспечивать функционирование систем IoT с плотностью IoT-устройств до 1 млн. устройств на 1 км<sup>2</sup> [13]. Компания Ericsson констатирует, что в 4-м квартале 2018 года мировой объем трафика передачи данных составил 25,4 эксабайт (Eb), или  $2,54 \cdot 10^{19}$  байт [19].

Особенностью трафика IoT-устройств и систем является его неравномерность и зависимость от района (региона), времени суток и года. Можно прогнозировать существенное увеличение трафика при возникновении чрезвычайных ситуаций естественного или техногенного происхождения. Таким образом, низкоорбитальная спутниковая система связи для IoT должна предоставить механизмы для обработки пиковых нагрузок при резком увеличении трафика посылок IoT-устройств.

Важным достоинством распределенных вычислительных сетей является способность опера-

тивно наращивать вычислительные мощности при возникновении пиковых нагрузок за счет перераспределения вычислительной нагрузки на простаивающие/не загруженные вычислительные модули (компьютеры, процессоры) с помощью линий связи между распределенными спутниками. На рис. 8 показан принцип перераспределения вычислительной нагрузки в системе.

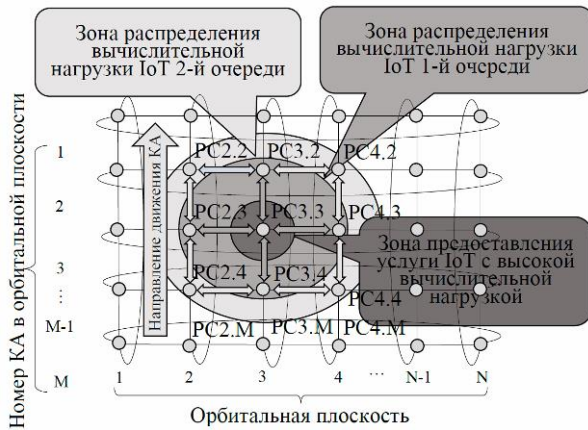


Рис. 8. Иллюстрация принципа перераспределения вычислительной нагрузки в орбитальной вычислительной сети

Орбитальная распределенная вычислительная сеть использует это свойство распределенной сети для предоставления услуг IoT в районах с высокой плотностью IoT-устройств и в условиях резкого увеличения трафика. Когда нагрузка на спутник-вычислитель приближается к предельной производительности вычислительного модуля, либо превышает его, часть нагрузки передается на спутники-вычислители других «распределенных спутников» по линиям связи между спутниками.

При перераспределении вычислительной нагрузки необходимо учитывать особенность функционирования IoT-устройств и их требования по оперативности обработки информации / формирования команд управления для исполнительных IoT-устройств. Как было показано в разделе 3 основной составляющей времени задержки передачи посылки IoT-устройства является задержка на распространение сигнала в линии «земля-космос». Максимальная величина этой задержки зависит от высоты орбиты и принятого в системе минимального угла места луча антенны VSAT-терминала. Эта задержка может достигать 5,3 мс (см. табл. 1). Таким образом в двустороннем канале задержка может составлять до 10,5 мс. Это значение определяет минимально возможное гарантированное время обработки посылки IoT-устройства и получения команды управления.

В условиях высокой нагрузки / интенсивного роста трафика спутник-вычислитель формирует очередь на обработку посылок IoT-устройств. Очередь формируется с учетом приоритетности обслуживания.

Наивысший приоритет присваивается посылкам IoT-устройств с минимальным временем ожидания. Допустимое время ожидания для таких устройств не может превышать времени двустороннего обмена между IoT-устройством и соседним распределенным спутником с учетом задержки на распространение в линии связи между распределенными спутниками (см. табл. 2). Так для системы с высотой орбиты приблизительно 800-850 км эта задержка не может превышать 17,72 мс. Посылки IoT-устройств с допустимым временем отклика не более 17,72 мс обрабатываются непосредственно спутником-вычислителем распределенного спутника, в зоне обслуживания которого находится IoT-устройство (на рис. 8 это PC3.3).

Посылки IoT-устройств, для которых допустимое время задержки получения команды управления позволяет передать посылку на обработку спутнику-вычислителю соседнего распределенного спутника получают первый приоритет в обслуживании. Величина задержки для таких IoT-устройств может составлять от 17,72 мс до 27,72 мс для тех же условий. В этом случае посылки передаются на обработку от PC3.3 к PC2.3, PC4.3, PC3.4, PC3.2, как это показано на рис. 8. Эти спутники-вычислители входят в зону распределения вычислительной нагрузки 1-й очереди.

Аналогично формируется 2-я зона распределения вычислительной нагрузки.

При выборе направления маршрутизации избыточной вычислительной нагрузки / маршрутизации избыточного трафика играет величина задержки на распространение по линии связи между распределенными спутниками. Как видно из таблицы 2 в направлении вдоль орбитальной плоскости задержка является практически неизменной. В линиях связи между соседними орбитальными плоскостями величина задержки изменяется от максимального значения, которое наблюдается для экваториальных районов (части орбиты) и превышает задержку для линии связи в одной орбитальной плоскости, до минимального значения в приполярной области орбиты, которое в два раза меньше задержки для одной орбитальной плоскости.

Существует еще одна закономерность в распределении IoT-устройств по регионам, что напрямую связано с распределением трафика IoT-устройств и вычислительной нагрузкой для орбитальной распределенной вычислительной сети. Анализ данных по темпам роста парка / глубине

проникновения IoT-устройств и темпам роста мобильного трафика [19] позволяет предположить, что для низкоорбитальной системы связи для IoT будут существовать районы / регионы с повышенной вычислительной нагрузкой. Можно предположить, что плотность IoT-устройств в каждом регионе напрямую связана с плотностью населения. Следовательно, районы наибольшей плотности населения будут приблизительно соответствовать районам наибольшей вычислительной нагрузки.

На рис. 9 условно показаны районы с наибольшей плотностью населения, к которым отнесены: восточное побережье США, Центральная и Западная Европа, Индия, Юго-Восточные районы Китая. Вычислительная нагрузка, формируемая IoT-устройствами в этих районах будет превышать вычислительные возможности спутников-вычислителей.

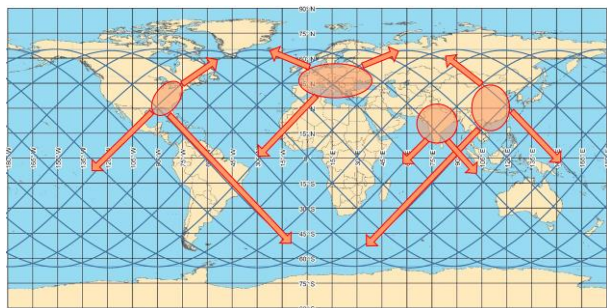


Рис. 9. Перетекание вычислительной нагрузки в приполярные и океанические районы

Одновременно с этим существуют районы с минимальной вычислительной нагрузкой, или районы, где вычислительная нагрузка вообще отсутствует. К этим районам относятся приполярные районы и океанические районы. Локально вычислительная нагрузка также будет минимальной для районов пустынь и высокогорных массивов. Для наращивания вычислительной мощности низкоорбитальной распределенной вычислительной системы в районах с высокой вычислительной нагрузкой часть нагрузки, допускающая задержку в обработке, переносится в приполярные и океанические районы, как это показано на рис. 9. Перенос вычислительной нагрузки осуществляется с учетом приоритетности посылок IoT-устройств, которая определяется на основе допустимого / приемлемого времени обработки информации и формирования управляющих команд для IoT-устройств – исполнительных органов.

## Заключение

1. Концепция «распределенного спутника» в централизованной архитектуре позволяет построить низкоорбитальную систему связи Интернета Вещей,

которая адаптирована к особенностям функционирования систем Интернета Вещей и реализует концепцию «туманных» и «граничных» вычислений.

2. Спутниковая орбитальная распределенная вычислительная сеть является составной частью низкоорбитальной спутниковой системы связи для предоставления услуг IoT, отражающая особенности IoT и реализующая концепции «туманных вычислений» и «граничных вычислений».

3. Архитектура «распределенного спутника» позволяет оперативно наращивать вычислительные возможности космического сегмента системы и обеспечивать перераспределение вычислительной нагрузки, что позволяет использовать вычислительные средства с ограниченной вычислительной производительностью, и тем самым снизить стоимость таких устройств.

4. Использование линий связи между распределенными спутниками позволяет реализовать преимущества одноранговой вычислительной сети для перераспределения вычислительной нагрузки, вызванной высокой плотностью размещения IoT-устройств в отдельных регионах, а также возникновением чрезвычайных ситуаций природного или техногенного происхождения.

5. Предложен критерий для приоритетности обслуживания посылок / запросов IoT-устройств, основанный на учете особенностей орбитального построения космического сегмента системы и ориентированный на минимизацию вероятности отказа в обслуживании.

## Литература

1. 2018 Roundup of Internet of Things. Forecasts and Market Estimates / Louis Columbus [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2018/12/13/2018-roundup-of-internet-of-things-forecasts-and-market-estimates/#4537a2537d83>. – 15.05.2019.
2. Никитин, А. А. Интернет вещей – один из глобальных трендов [Текст] / А. А. Никитин // Электросвязь. – 2018. - №1. – С. 30-39.
3. 2800 microsatellites to launch over next five years: SpaceWorks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://satelliteprome.com/news/2800-microsatellites-to-launch-over-next-five-years-spaceworks/>. – 15.05.2019.
4. Туманные вычисления. Fog Computing. Опубликовано 06.03.2018. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.tadviser.ru/index.php/Статья:Туманные\\_вычисления\\_%28Fog\\_computing%29](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Туманные_вычисления_%28Fog_computing%29). – 15.05.2019.
5. Проферансов, Д. Ю. К вопросу о туманных вычислениях и интернете вещей [Текст] / Д. Ю. Проферансов, И. Е. Сафонова // Образовательные ресурсы и технологии. – 2017. – №4 (21). – С. 30-39.

6. Туманные вычисления (Fog Computing), как составная часть 5G. Опубликовано 24.07.2018. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://shalaginov.com/2018/07/24/4510/>. – 15.05.2019.

7. Создание архитектуры «распределенного спутника» для низкоорбитальных информационно-телекоммуникационных систем на основе группировки микро- и наноспутников [Текст] / М. Е. Ильченко, Т. Н. Нарытник, Б. М. Рассомакин, В. И. Присяжный, С. В. Капитык // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – № 2(146). – С. 33-43.

8. Столлингс, В. Беспроводные линии связи и сети [Текст] : пер. с англ. / В. Столлингс. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 640 с.

9. Maral, G. *Satellite communications systems* [Text] / Gerard Maral, Michel Bousquet. – 5-th ed. – John Wiley & Sons Ltd, 2009. – 713 p.

10. Coverage Area Formation for a Low-Orbit Broadband Access System with Distributed Satellites [Text] / Teodor Narytnik, Boris Rassamakin, Vladimir Prisyazhny, Sergii Kapshtyk // *UkrMiCo-2018*.

11. Gavish, B. *The impact of satellite altitude on the performance of LEOS based communication systems* [Text] / Bezalel Gavish, Joakim Kalvenes // *Wireless Networks*. 1998. – No. 4. – P. 199–213.

12. Туманные вычисления спускают облачный функционал на землю – Cisco [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.cisco.com/c/ru\\_ru/about/press/press-releases/2015/08-13d.html](https://www.cisco.com/c/ru_ru/about/press/press-releases/2015/08-13d.html). – 15.05.2019.

13. 1 Million IoT Devices per Square Km- Are We Ready for the 5G Transformation? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://medium.com/clx-forum/1-million-iot-devices-per-square-km-are-we-ready-for-the-5g-transformation-5d2ba416a984>. – 15.05.2019.

14. Лоднева, О. Н. Анализ трафика устройств интернета вещей [Текст] / О. Н. Лоднева, Е. П. Ромасевич // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. – 2018. – Т. 14, № 1. – С. 149-169.

15. Ромасевич, Е. П. Исследование агрегированного трафика беспроводных IoT устройств [Текст] / Е. П. Ромасевич // *Современные информационные технологии и ИТ-образование* – 2017. – Т. 13, № 3. – С. 122-128.

16. Method for Handling Massive IoT Traffic in 5G Networks [Text] / Safdar Nawaz Khan Marwat, Yasir Mehmood, Ahmad Khan, Salman Ahmed, Abdul Hafeez, Tariq Kamal and Aftab Khan // *Sensors*. – 2018. – No. 18. – P. 3966. DOI: 10.3390/s18113966.

17. Smart Home IoT Traffic Characteristics as a Basis for DDoS Traffic Detection [Text] / Ivan Cvitić, Dragan Peraković, Marko Periša, Mate Botica // *MMS 2018, November 06-08, Dubrovnik, Croatia*. Copyright © 2018 EAI. DOI: 10.4108/eai.6-11-2018.2279336.

18. Characterizing and Classifying IoT Traffic in Smart Cities and Campuses [Text] / Arunan Sivanathan, Daniel Sherratt, Hassan Habibi Gharakheili, Adam

Radfordy, Chamith Wijanayake, Arun Vishwanathz and Vijay Sivaraman // *Conference: IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS) Ericsson Mobility Report. Q4 2018 Update*. © Ericsson 2019. DOI: 10.1109/INFCOMW.2017.8116438.

19. Нарытник, Т. М. Перспективні середньо-орбітальні та низькоорбітальні системи супутникового зв'язку [Текст] / Т. М. Нарытник, С. В. Капитик, В. Г. Сайко // *Цифрові Технології*. – 2018. – № 23. – С. 39-58.

## References

1. 2018 Roundup of Internet of Things. Forecasts and Market Estimates / Louis Columbus. Available at: <https://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2018/12/13/2018-roundup-of-internet-of-things-forecasts-and-market-estimates/#4537a2537d83> (Accessed 15.05.2019).

2. Nikitin, A. A. Internet veshhej – odin iz global'nyh trendov [Internet of things – one of global trends]. *Jelektrosvjaz'*, 2018, no.1, pp. 30-39.

3. 2800 microsattellites to launch over next five years: SpaceWorks. Available at: <http://satelliteprome.com/news/2800-microsattellites-to-launch-over-next-five-years-spaceworks/> (Accessed 15.05.2019)

4. Tumannye vychislenija. Fog Computing. [Fog Computing] Posted on 06.03.2018. Available at: [www.tadviser.ru/index.php/Статья:Туманные\\_вычисления\\_%28Fog\\_computing%29](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Туманные_вычисления_%28Fog_computing%29) (Accessed 15.05.2019)

5. Proferansov, D. Ju., Safonova I. E. K voprosu o tumannyh vychislenijah i internete veshhej [To a question of fog computing and the Internet of things]. *Obrazovatel'nye resursy i tehnologii*, 2017, no. 4 (21), pp. 30-39.

6. Tumannye vychislenija (Fog Computing), kak sostavnaja chast' 5G. [Fog computing (Fog Computing) as component 5G]. Posted on 24.07.2018. Available at: <https://shalaginov.com/2018/07/24/4510/> (Accessed 15.05.2019)

7. Il'chenko, M. E., Narytnik, T. N., Rassomakin B. M., Prisyazhnyj, V. I., Kapshtyk, S. V. Sozdanie arhitektury «raspredelennogo sputnika» dlja nizkoorbitalnyh informacionno-telekommunikacionnyh sistem na osnove gruppirovki mikro- i nanosputnikov Creation of the architecture of "Distributed Satellite" for low-orbital information-telecommunication systems based on the grouping of micro and nanosatellites]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2018, no. 2(146), pp. 33-43.

8. William, S. *Wireless Communications and Networking*. Prentice Hall. Upper Sable River, New Jersey 07458. (Russ. ed.: Stollings, V. *Besprovodnye linii svjazi i seti*. Moscow, Izdatel'skij dom «Vil'jams» Publ., 2003. 640 p.)

9. Maral, G., Bousquet, M. *Satellite communications systems*. 5-th ed. John Wiley & Sons Ltd, 2009. 713 p.

10. Narytnik, T., Rassamakin, B., Prisyazhny, V., Kapshtyk, S. Coverage Area Formation for a Low-Orbit Broadband Access System with Distributed Satellites. *UkrMiCo-2018*.

11. Gavish, B., Kalvenes, J. The impact of satellite altitude on the performance of LEOS based communication systems. *Wireless Networks*, 1998, no. 4, pp. 199–213.

12. *Tumannye vychisleniya spuskajut oblachnyj funkcional na zemlju – Cisco* [Fog Computing lower cloudy functionality on the ground – Cisco]. Available at: [https://www.cisco.com/c/ru\\_ru/about/press/press-releases/2015/08-13d.html](https://www.cisco.com/c/ru_ru/about/press/press-releases/2015/08-13d.html) (Accessed 15.05.2019)

13. *1 Million IoT Devices per Square Km- Are We Ready for the 5G Transformation?* Posted on Mar, 2019. Available at: <https://medium.com/clx-forum/1-million-iot-devices-per-square-km-are-we-ready-for-the-5g-transformation-5d2ba416a984> (Accessed 15.05.2019)

14. Lodneva, O. N., Romasevich, E. P. Analiz trafika ustrojstv interneta veshhej [Analysis of the Internet of things devices traffic]. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie*, 2018, vol. 14, iss. 1, pp. 149-169.

15. Romasevich, E.P. Issledovanie agregirovanogo trafika besprovodnyh IoT ustrojstv [Research of the wireless IoT of devices aggregated traffic]. *Sov-*

*remennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 122-128.

16. Marwat, Safdar Nawaz Khan., Mehmood, Yasir., Khan, Ahmad., Ahmed, Salman., Hafeez, Abdul., Kamal, Tariq., Khan, Aftab. Method for Handling Massive IoT Traffic in 5G Networks. *Sensors*, 2018, no. 18, pp. 3966. DOI: 10.3390/s18113966.

17. Cvitić, Ivan., Peraković, Dragan., Periša, Marko., Botica, Mate. Smart Home IoT Traffic Characteristics as a Basis for DDoS Traffic Detection. *MMS 2018, November 06-08, Dubrovnik, Croatia*. Copyright © 2018 EAI. DOI: 10.4108/eai.6-11-2018.2279336

18. Sivanathan, Arunan., Sherratt, Daniel., Gharakheili, Hassan Habibi., Radford, Adam., Wijenayake, Chamith., Vishwanathz, Arun., Sivaraman, Vijay. Characterizing and Classifying IoT Traffic in Smart Cities and Campuses. *Conference: IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS) Ericsson Mobility Report. Q4 2018 Update*. © Ericsson 2019. DOI: 10.1109/INFOCOMW.2017.8116438.

19. Naritnik, T. M., Kapshtik, S. V., Sajko, V. G. Prspektivni sredn'oorbital'ni ta niz'koorbital'ni sistemi suputnikovogo zv'jazku [Promising medium-orbit and low-orbit satellite communications systems]. *Cifrovi Tehnologii – Digital Technology*, 2018, no. 23, pp. 39-58.

*Поступила в редакцию 6.07.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДХОДІВ ДО ПОБУДОВИ ОРБІТАЛЬНОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

*М. Ю. Ільченко, Т. М. Наритник, В. І. Присяжний, С. В. Капитик, С. А. Матівенко*

Розглянуті питання побудови низькоорбітальної супутникової системи, яка призначена для надання послуг Інтернету Речей і адаптована до особливостей послуг та систем Інтернету Речей. Розглянута система забезпечує формування необхідної телекомунікаційної інфраструктури на базі низькоорбітальної супутникової системи широкопasmового доступу, і розташованих на низькій навколоземній орбіті обчислювальних засобів, які забезпечують проведення обробки інформації пристроїв та систем Інтернету Речей, і виконання необхідних обчислень. Для побудови телекомунікаційної частини супутникової системи Інтернету Речей вибрана архітектура «розподіленого супутника», яка дозволяє з одного боку забезпечити повну функціональність складної телекомунікаційної системи, а з іншого боку - використовувати космічні апарати форм-фактору нано-супутник/куб-сат. Використання для побудови супутникової системи космічних апаратів типу куб-сат дозволяє суттєво скоротити витрати на створення і час на розгортання системи. Перспективним напрямком розвитку систем Інтернету Речей є реалізація концепції «туманних обчислень» для обробки інформації пристроїв Інтернету Речей. Для реалізації «туманних обчислень» запропоновано включити до складу кожного «розподіленого супутника» окремих супутник-обчислювач, та побудувати на основі супутників-обчислювачів орбітальну розподілену обчислювальну мережу. Розглянуті питання забезпечення зв'язності між супутниками-обчислювачами у складі орбітальної розподіленої обчислювальної мережі за допомогою ліній зв'язку між розподіленими супутниками із врахуванням особливостей орбітальної побудови супутникової системи. Для забезпечення безперервного надання послуг Інтернету Речей запропоновано створення і розміщення на базі орбітальної обчислювальної мережі розподіленої локалізованої бази даних, показано напрямки передачі оперативної частини локалізованої розподіленої бази даних із врахуванням руху космічних апаратів в орбітальній площині та обертання Землі. Представлені пропозиції щодо розподілення надлишкового обчислювального навантаження, яке виникає в окремих регіонах зони обслуговування супутникової телекомунікаційної в системі, із залученням ресурсу сусідніх супутників-обчислювачів в своїй орбітальній площині і в сусідніх орбітальних площинах. Запропоновано алгоритм переміщення надлишкового обчислювального навантаження в приполярні та океанічні райони.

**Ключові слова:** низькоорбітальна система супутникового зв'язку; Інтернет Речей; розподілена обчислювальна мережа

**RESEARCH OF APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF THE ORBITAL COMPUTING NETWORK FOR THE SATELLITE SYSTEM OF INTERNET OF THINGS*****M. Ilchenko, T. Narytnyk, V. Prysyzhny, S. Kapshtyk, S. Matvienko***

There are considered issues of building a Low-Earth-Orbit Satellite System designed to provide the Internet of Things services and adapted to the features of the services and systems of the Internet of Things. The considered system provides the creation of the necessary telecommunication infrastructure based on the Low-Earth-Orbit Broadband Access Satellite System and places Computational Facilities into the Low-Earth-Orbit for to ensure the processing of Internet of Things devices and systems information, and perform computations. The architecture of a "Distributed Satellite" was chosen to construct the telecommunications part of the Internets of Things Satellite System. The chosen architecture allows, on the one hand, to ensure the full functionality of complex telecommunication systems, and on the other hand, to use spacecraft of the form factor nano-satellite / cub-sat. The using of the cube-sat spacecraft for development of the satellite-based system allows to significantly reduce the cost of development of the system and the time of the system deploying. A promising direction in the development of the Internet of Things systems is the implementation of the concept of "Fog Computing" for processing Internet of Things information. To implement "Fog Computing", it was proposed to include into the composition of each "Distributed Satellite" a separate Satellite-Computer and to build an Orbital Distributed Network based on Satellite-Computers. The issues of the inter-satellite connectivity are considered taking into account ensuring the connection between Satellites-Computers in the framework of the Orbital Distributed Computer Network using inter-satellite links between Distributed Satellites, the characteristics of the orbital construction of the Satellite System Constellation. It was proposed to create and deploy the Distributed Localized Database based on the Orbital Distributed Computer Network, for to ensure the continuous provision of Internet of Things services, taking into account the movement of spacecraft in the orbital plane and the rotation of the Earth. It was shown the direction of transmission of the operational part of a Localized Distributed Database. Proposals are made on the distribution of the excess computational load arising in certain regions of the satellite telecommunications system's service area, involving the resource of neighboring satellite computers in its orbital plane and neighboring orbital planes. An algorithm is proposed for moving the excess computational load to the polar and oceanic regions.

**Keywords:** LEO Satellite Communication System; Internet of Things; Distributed Computer Network.

**Ильченко Михаил Ефимович** – д-р техн. наук, проф., академик Национальной академии наук Украины, заслуженный деятель науки и техники, лауреат Государственных премий в области науки и техники Украинской ССР, СССР и Украины, проректор по научной работе НТУУ КПИ им. Игоря Сикорского.

**Нарытник Теодор Николаевич** – канд. техн. наук, академик Украинской академии наук, лауреат Государственных премий в области науки и техники Украинской ССР, СССР и Украины, директор СП «Институт электроники и связи Украинской академии наук»; вед. науч. сотр., проф. каф. телекоммуникаций Института телекоммуникационных систем НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского».

**Присяжный Владимир Ильич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, начальник Национального Центра Управления и Испытаний Космических Средств.

**Капштык Сергей Владимирович** – канд. техн. наук, помощник начальника Национального Центра Управления и Испытаний Космических Средств.

**Матвиенко Сергей Анатольевич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Главный конструктор Научно-производственного комплекса «Курс».

**Ilchenko Mykhailo** – DrS on Engineering, professor, academician of National Academy of Sciences of Ukraine, Honored Scientist of Ukraine, Laureate of State Prize of the Ukrainian SSR, the USSR and Ukraine in science technology, vice-rector on scientific work of The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", e-mail: ilch@kpi.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-3459-4949, Scopus Author ID: 55405562100, ResearcherID: B-7941-2017, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=3IouLEoAAAAJ>

**Narytnyk Theodore** – PhD, Academician of the Ukrainian Academy of Sciences; Laureate of State Prizes in the field of science and technology of the Ukrainian SSR, USSR and Ukraine, director of the Institute of Electronics and Communications Ukrainian Academy of Sciences", Leading Research Associate, Professor of the Telecommunications Department of the Institute of Telecommunication Systems of The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", e-mail: director@mitris.com, ORCID Author ID: 0000-0002-1755-9412, Scopus Author ID: 6507483403.

**Prysyzhny Vladimir** – PhD, Laureate of State Prizes in the field of science and technology of the Ukraine, Head of the National Space Facility Control and Testing Center, e-mail ncvvkz@spacecenter.gov.ua.

**Kapshtyk Sergii** – PhD, assistant to Head of the National Space Facility Control and Testing Center, e-mail: sergii.kapshtyk@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-3509-8015, ResearcherID: V-2572-2019.

**Matvienko Sergey** – PhD, senior scientific researcher, Chief Designer of the Research and Production Complex "Course", e-mail: matvienko\_2005@ukr.net. ORCID Author ID: 0000-0002-9727-810X.