

# FUTURE CUBESAT SWARMS POSE SIGNIFICANT COMMUNICATIONS CHALLENGES

---

**ABSTRACT** | THERE IS AN INCREASING TREND TOWARDS USING CUBESAT SWARMS TO PERFORM EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND OBSERVATION MISSIONS. IN THE ARTICLE THE ADVANTAGES OF CUBESATS AND THE REASONS OF THEIR POPULARITY ARE CONSIDERED.

**Keywords:** *CubeSat swarm, communication system, low-Earth orbit (LEO), data rate, satellite cross-link, frequency, remote sensing*

**Ozan KARA,**  
PhD student, Koç University,  
Istanbul, Turkey

**Roger BIRKELAND,**  
PhD student, Norwegian University  
of Technology & Science,  
Trondheim, Norway

**Lihui (Lydia) ZHANG,**  
postgraduate student, Northampton,  
Massachusetts, USA

**Umuralp KAYTAZ,**  
PhD student, Koç University,  
Istanbul, Turkey

# РЕВОЛЮЦИОННЫЙ ВЫЗОВ РОЕВ CUBESAT



**Озан КАРА,**  
аспирант университета Коç,  
Стамбул, Турция



**Роджер БЕРКЛЭНД,**  
аспирант Норвежского научно-  
технологического университета,  
Тронхейм, Норвегия



**Лиуй (Лидия) ЧЖАН,**  
выпускница университета  
Нортгемптон, Массачусетс, США



**Умуральп КАЙТАЦ,**  
аспирант университета Коç,  
Стамбул, Турция

**АННОТАЦИЯ** | СУЩЕСТВУЕТ РАСТУЩАЯ ТЕНДЕНЦИЯ В ИСПОЛЬЗОВАНИИ РОЕВ CUBESAT ДЛЯ УЧЕБНЫХ, НАУЧНЫХ И НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ПОЛЕТОВ. В СТАТЬЕ РАССМАТРИВАЮТСЯ ДОСТОИНСТВА КУБСАТОВ И ПРИЧИНЫ ИХ ПОПУЛЯРНОСТИ.

**Ключевые слова:** *рой кубсатов, система связи, низкая околоземная орбита (НОО), скорость передачи данных, межспутниковая линия связи, частота, дистанционное зондирование*

Рои CubeSat (кубсатов) – это инновационные и экономичные орбитальные группировки малых космических аппаратов, обеспечивающие улучшенную автономную пространственную и временную разрешающую способность. Системы связи на основе роев CubeSat имеют существенные достоинства, такие как взаимодействие сетей связи, более высокая скорость передачи данных, экономия полосы частот, снижение частоты выхода из строя, способность обеспечивать глобальную зону покрытия и измерений. Эти спутники также имеют значимые преимущества по массе, объему и по ограничениям на мощность, а также в плане стандартизации политики лицензирования частот. В данной статье авторы предлагают к рассмотрению межспутниковую и внутриспутниковую архитектуру связи «интеррой» и «интраврой», основанную на применении роя низкоорбитальных МКА CubeSat с четырьмя основными типами каналов передачи данных.

Возрастающий спрос на орбитальные группировки МКА требует наличия эффективной архитектуры связи при решении научных задач, таких как картографирование гравитационного поля, отслеживание лесных пожаров, нахождение водных источников или обнаружение разносчиков болезней на Земле.

МКА CubeSat все чаще используют для учебных, научных и наблюдательных полетов благодаря их низкой стоимости и простоте изготовления. Компания SpaceWorks Enterprises, Inc. приводит подробные данные новейших обзоров и обозначает тенденции на рынке запусков наноспутников в своем прогнозе рынка nano- и микроКА на 2017 год (2017 Nano/Microsatellite Market Forecast) (рис. 1) [1]. В соответствии с данными за 2009–2016 годы, 42% произведенных nano- и ми-

кроспутников (включая кубсаты) находились в категории «Технология» и 43% – в категории «Наблюдение за поверхностью Земли/Дистанционное зондирование». Однако, согласно рыночному прогнозу компании SpaceWorks на 2017–2019 годы, первый показатель снижается до 14%, а второй – увеличивается до 64%.

*МКА CubeSat все чаще используют для учебных, научных и наблюдательных полетов благодаря их низкой стоимости и простоте изготовления.*

Перспективные прогнозы SpaceWorks (рис. 2) показывают, что более 2400 nano- и микро-спутников могут быть запущены до 2023 года. Космическое сообщество работает над тем, чтобы сократить стоимость запуска наноспутника на орбиту. Общая стоимость конструирования одного МКА класса 1U CubeSat (10×10×10 см) составляет около 30 тысяч долларов, а минимальная стоимость запуска – 12 тысяч долларов. В рамках своей концепции малых ракет-носителей, которая может начать реализовываться к 2020 году, Boeing намерен снизить стоимость запуска до 300 тысяч долларов за вывод 45 кг полезной нагрузки на низкую околоземную орбиту (около семи тысяч долларов за килограмм) [2].

## СВЯЗЬ НА БАЗЕ КУБСАТОВ – НА ПЕРВЫЙ ВЗГЛЯД

Возрастающая потребность в решении задач наблюдения за поверхностью Земли и ее дистанционного зондирования посредством кубсатов подразумевает наличие эффективных и гибких подсистем связи и наземных станций с целью обеспечения эффективного глобального покрытия, сбора большего объема данных и оптимизации времени передачи данных со спутника на Землю. На данный момент большинство кубсатов на низкой околоземной орбите используют передатчики диапазонов UHF/VHF с максимальной скоростью передачи данных около 38 Кбит/с. Всего несколько кубсатов имеют передатчики S-диапазона с максимальной скоростью передачи данных порядка 10 Мбит/с. В дополнение: передатчики X-диапазона имеют скорость передачи данных около 500 Мбит/с, а передатчики K/Ku/Ka-диапазонов – скорость передачи данных до 1,2 Гбит/с, но такие передатчики более эффективны при их использовании в составе МКА типа CubeSat [3].

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Цель связанной архитектуры на основе МКА CubeSat состоит в доставке пользователям как можно большего объема целевых данных по различным районам Земли. В своей исчерпывающей работе «Классификация систем связи на основе МКА CubeSat по показателям качества» (Ranking CubeSat Communication Systems Using a Value-centric Framework) Клэнтон Крэйл утверждает, что, если мы хотим увеличить объем данных, поступающих на наземную станцию, нам необходимо увеличить время доступа и скорость передачи [4].



**Рис. 1** Тенденции на рынке наноспутников по целям

Крэйл также рассматривает альтернативные подходы, такие как использование большего количества наземных станций и межспутниковых линий с сетевой топологией для максимизации сбора данных. Увеличить число наземных станций довольно просто, но вместе с тем возникнет необходимость в разработке новых нормативных документов, привлечении новых сотрудников, в затратах на развертывание самих станций. С одной стороны, опция межспутниковой связи увеличивает время доступа, с другой стороны, возникает ряд технических трудностей, таких как переключение антенных лучей, доплеровский сдвиг частоты, необходимость применения направленных антенн, потеря в свободном пространстве и снижения скорости передачи данных [4].

Усиление антенны – еще один ключевой параметр для установления эффективной связной сети на основе МКА CubeSat. Антенна с высоким коэффици-

ентом усиления обеспечивает передачу большого объема данных. Коэффициент направленного действия антенны – это отношение плотности мощности направленной антенны к плотности мощности изотропного излучателя с той же общей мощностью излучения. Для повышения эффективности связи с использованием роя МКА CubeSat Эндрю Кеннеди дополнительно к направленным антеннам изучил двунаправленные антенные системы, применяемые в составе КА Iridium и Globalstar [5]. В то же время Скотт Шэйр в своей работе «Прошлый опыт и современные тенденции в вопросах связи и частоты в МКА CubeSat» (CubeSat Communication and Frequency Past Practice and Current Trends) [6] рассматривал альтернативные типы антенн, такие как стандартные плоские антенны для развертываемых антенн X и S-диапазонов, от компании Boeing, надувные антенны, разработанные в Массачусетском технологическом инсти-

*Усиление антенны – один из ключевых параметров для установления эффективной связной сети на основе МКА CubeSat. Антенна с высоким коэффициентом усиления обеспечивает передачу большого объема данных.*

туте (MIT), а также антенную решетку Ka-диапазона со скоростью передачи данных 100 Мбит/с, разработанную для ISARA. Существуют также инновационные проекты адаптивной (фазированной) антенны разработки Zanette et al [7], которая предлагает хорошие решения для кубсатов.

## ОДИНОЧНЫЙ КА ИЛИ РОЙ?

Рой МКА CubeSat демонстрирует на низкой околоземной орбите улучшенные возможности межспутниковой и нисходящей связи, представляя собой мало-затратную архитектуру и многофункциональную научную платформу. Одиночный космический аппарат имеет несколько недостатков в сравнении с роем спутников: ограниченная зона покрытия, неизменяемые измерения времени, ограниченные возможности модернизации, высокая штучная себестоимость. Рой же обеспечивает коррелированные во времени измерения, резервируемую надежность, изменяемые во времени измерения, масштабируемое покрытие Земли, гибкость, низкую себестоимость, масштабируемую систему связи. Архитектура в виде роя МКА также увеличивает частоту их попадания в зону видимости сети наземных станций, что позволяет получить географически рассредоточенные измерения.

## КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РОЯ МКА CUBESAT

Предложено несколько концепций применения роя наноспутников. Полеты по программам ARMADA и HiDEF были предложены в NASA в 2009 году в контексте гелиофизических полетов с целью изучения в малом масштабе физики плазмы в ионо- и термосфере. Полет по программе ARMADA задействует рой из 20–100 космических аппаратов на псевдослучайных орбитах с использованием GPS-приемников с радиозатмением. Проект HiDEF разработан как рой из 90 космических аппаратов на околоземной полярной орбите для мониторинга электрического поля и термосферной плотности полярного нижнего слоя термосферы и ионосферы [9]. Полет по программе ELISA

был спроектирован Европейским космическим агентством (ESA) для обнаружения гравитационных волн. Программа полета предусматривает один материнский и два дочерних спутника, которые должны быть развернуты на трех разных орбитах. Связь между материнским космическим аппаратом и наземными станциями будет осуществляться по радиолинии X-диапазона [2].

В дополнение к предложенным концепциям существует еще несколько функциональных программ полетов, таких как EDSN (Edison Space Network) и Iridium, на базе роя МКА CubeSat. EDSN включает рой из восьми кубсатов на низкой околоземной орбите высотой 450–550 км. Каждый космический аппарат в рое осуществляет сбор космических данных о погоде и обменивается ими с другими аппаратами в УВЧ-диапазоне со скоростью 9,6 Кбит/с. После обмена данными по межспутниковой линии материнский спутник передает научные данные на наземную станцию, используя S-диапазон. Так, для сравнения, хотя это не кубсаты, система Iridium насчитывает 66 штатных спутников в 6 плоскостях по 11 аппаратов в каждой на полярной низкой околоземной орбите на высоте 780 км [5]. Каждая полезная нагрузка имеет скорость передачи данных до 100 Кбит/с на 90 % орбиты и < 1 Мбит/с для оставшихся 10 % [10].

## ВЫБОР ЧАСТОТЫ И ЛИЦЕНЗИРОВАНИЕ

Университеты и негосударственные учреждения предпочитают использовать любительские радиочастоты для кубсатов из-за низкой стоимости, более простых регуляторных процессов и более короткого подготовительно-наладочного периода. Существует тенденция повышения

несущей частоты сигнала и скорости передачи данных вследствие точных измерений в ходе наблюдения за поверхностью Земли и дистанционного зондирования на низкой околоземной орбите. С увеличением частоты с УВЧ до Ка-диапазона также растет возможность повышения скорости передачи данных.

Финансируемые государством кубсаты, использующие американские частоты для радилюбителей, могут нарушать правила радиоловительской службы связи и правила Национальной телекоммуникационной информационной администрации (NTIA). Фонд национальной науки (NSF) провел исследование с целью найти подходящий государственный диапазон частоты для кубсатов, и, возможно, этот диапазон удовлетворит необходимость в эффективной модуляции и схемах кодирования для кубсатов [6].

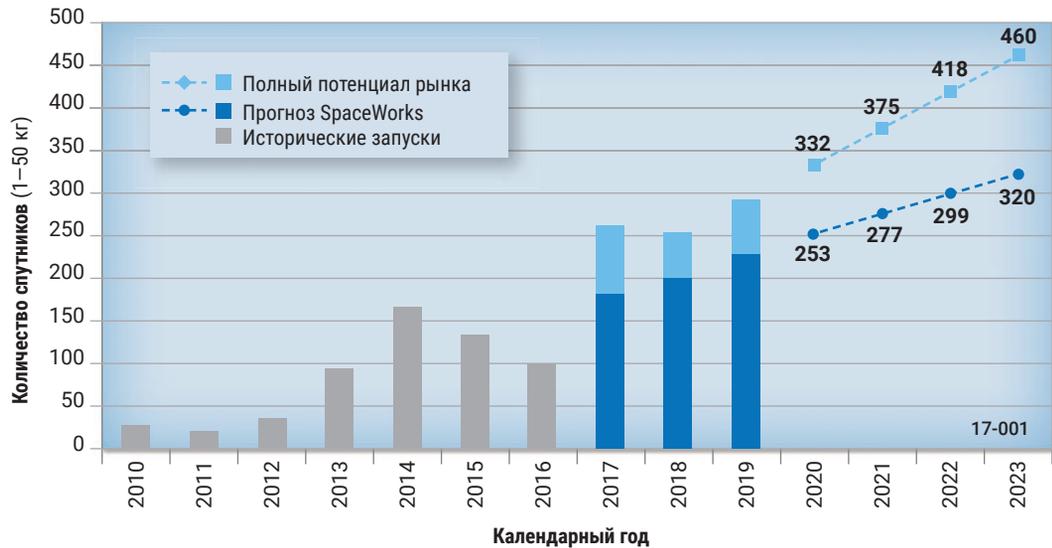
## НИЗКООРБИТАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА «ИНТРАРОЙ»

Для обеспечения устойчивой связи в первую очередь должна быть рассмотрена орбитальная группировка, получившая название «интрарой». Орбитальная группировка «интрарой» – это кубсаты, образующие единый рой МКА на орбите\*. В составе зарегистрированного роя находится один материнский спутник, немного крупнее по габаритам и мощнее по техническим возможностям по сравнению с дочерними спутниками. Он функционирует как магистральный провайдер для обеспечения связи с различными наземными станциями.

Отдельные кубсаты связываются друг с другом и с магистральным провайдером, используя радиолинии связи на традиционных частотах, но магистральный провайдер использует

\* В отечественной литературе это баллистически-связанная группа МКА (прим. переводчика).

**Рис. 2** Запуск наноспутников: история и прогноз



оптические линии связи в свободном пространстве, которые «становятся все более и более интересными в качестве вспомогательных или альтернативных по отношению к связи в радиочастотных диапазонах» [12].

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ «ИНТРАРОЙ»

Оптическая связь рассматривается в рамках архитектуры «интрарой» как средство расширения диапазона частот, снижения проблемности в области использования спектра и безопасности, а также как средство удовлетворения потребности в высокоскоростной и надежной связи. До тех пор, пока эти требования не выполняются в рамках технологии CubeSat, оптическая связь может осуществляться более крупным материнским спутником. Кроме того, эффективность оптической связи ухудшается под влиянием сильных замираний в результате турбулентности показателя преломления и возникновения помех по причине облачности, снегопада и дождя в атмосфере [12].

### НИЗКООРБИТАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА «ИНТЕРРОЙ»

Более крупная связанная сеть, состоящая из низкоорбитальных кубсатов, получившая название «интеррой», представляет собой «рой роев». «Интеррой» – это совокупность различных роев кубсатов, одновременно находящихся на орбите.

Архитектура сети типа «интеррой» будет основываться на радиорелейной связи космического базирования с использованием каналов оптической и/или радиочастотной связи между магистральными провайдерами в каждом рое и различными наземными станциями. Поэтому каждый кубсат, находящийся на орбите, должен быть зарегистрирован в рое для обеспечения доступа к сети. В рамках архитектуры «интеррой» рекомендуется использовать устойчивые к задержке сети (DTN) для минимизации потери данных и повышения надежности действующих линий связи.

Устойчивая к задержке сеть независима от времени и пред-

назначена для эффективной работы на экстремальных дальностях, например на дальности связи между роем спутников на орбите и наземной станцией.

### В ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОБ АРХИТЕКТУРЕ ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК «ИНТРАРОЙ» И «ИНТЕРРОЙ»

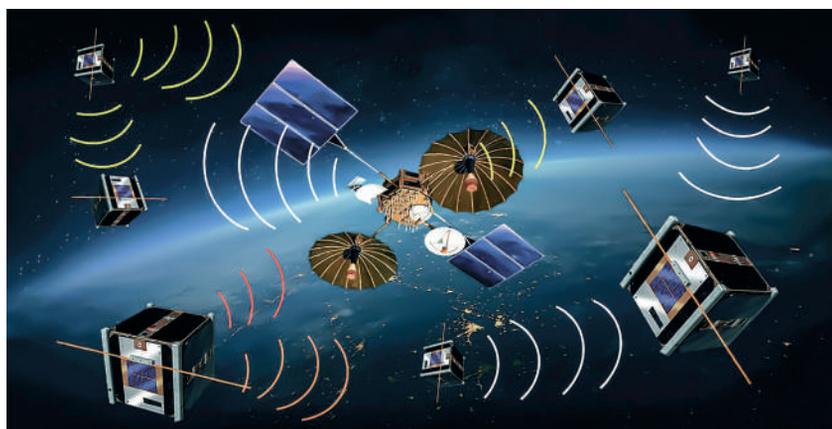
Для обеспечения непрерывного информационного потока в архитектуре типа «рой кубсатов» необходимы полноценные и надежные протоколы. Протоколы управления доступом к среде (MAC), которые контролируют порядок использования частот и выделение диапазона частот в устойчивых к задержке сетях, были тщательно проанализированы для сценариев подводной беспроводной связи. Тем не менее проект MAC-протокола пока является открытым для научных исследований. Главными трудностями для передачи данных в рамках архитектуры типа «рой кубсатов» являются ограничения по ресурсу, рациональное использование энергии (например,

при столкновении сообщений, при отводе тепла, при формировании служебной информации), стабильность топологии сети и информационный трафик.

## ЧЕТЫРЕХСЕГМЕНТНАЯ АРХИТЕКТУРА

Предложенная архитектура связной сети для роя кубсатов состоит из четырех основных типов линий связи: кубсат – земля, рой – земля, кубсат – кубсат, рой – рой. Канал передачи данных кубсат – кубсат действует между различными спутниками или узлами роев. Канал передачи данных рой – рой формируется в первую очередь между материнскими или специальными центральными узловыми спутниками отдельных роев, чтобы установить связь в рамках архитектуры «интеррой».

Хотя материнские спутники будут функционировать как главные источники информации на линиях связи «вверх» и «вниз» с наземными станциями посредством канала связи рой – земля, отдельные кубсаты из состава роя также способны передавать и получать данные с наземных станций через канал связи кубсат – земля, когда это необходимо. Каждому кубсату в глобальной сети может быть присвоен идентификационный номер. Главная сеть состоит из нескольких наземных станций. Далее, множественные рои кубсатов, состоящие из отдельных сетей меньшего масштаба (внутри каждого роя), могут иметь структуру, аналогичную сети Интернет. По большому счету, может существовать бесконечное число спутников и наземных станций, способных войти в космическую сеть и получить к ней доступ, так же, как новое электронное устройство может получать доступ к Интернету в течение того времени, пока эта услуга оплачивается или существует доступ к беспроводной сети.



Модель внутриспутниковой архитектуры связи «интрайрой»

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Согласно рекомендации рабочей группы Консультативного совета SGAC «Рои КА CubeSat – сети связи и политические проблемы» (CubeSat Swarms – Communication Networks and Policy Challenges), сеть на основе роя кубсатов должна иметь архитектуру, аналогичную сети Интернет, так чтобы каждый спутник в сети имел свой уникальный адрес. В этой связи Консультативную группу по взаимодействию между агентствами (IOAC) и Международный союз

по телекоммуникациям – сектор по стандартизации телекоммуникаций в составе ИТУ (ITU-T) следует рассматривать как органы, способные стандартизировать протоколы космической сети и присваивать каждому кубсату сетевой адрес.

Стандартизация весьма важна для обеспечения наибольшей совместимости, взаимодействия, безопасности, повторяемости и качества системы. Рабочая группа предложила, чтобы каждому кубсату в глобальной сети был присвоен идентификационный номер, и ожидается, что операторы спутниковой связи выполнят это требование. Взамен операторам будет обеспечена упрощенная регистрация, высокая скорость по нисходящему каналу, равные приоритеты на передачу данных.

Также рабочая группа предложила организовать сеть таким образом, чтобы пользователь мог зарегистрировать свое устройство для получения доступа. Это будет очень похоже на то, как смартфон подключается к сети Wi-Fi; пользователь должен будет ввести свой пароль и начать использовать сеть для получения доступа к своему кубсату. Это значительно сократит время регистрации спутников.

*Важно спроектировать систему связи для более высокой скорости передачи данных, которая бы соответствовала энергетическому потенциалу кубсатов.*



Модель внутриспутниковой архитектуры связи «интраарой»

## К РАССМОТРЕНИЮ

Высокоскоростная связь по программам полета роя кубсатов может радикально изменить процесс наблюдения за Землей. Оптическая связь способна открыть области применения, где необходима большая полоса частот. Следующей целью для оптической нисходящей линии связи может стать увеличение скорости до 100 Мбит/с. Для сравнения: с Марса данные с орбитального летательного аппарата передаются со скоростью 6 Мбит/с. Кубсаты могут использовать X-диапазон, чтобы уменьшить размер и вес приемопередатчика. Адаптивная антенная решетка также может стать удачным технологическим решением для более эффективной нисходящей передачи данных.

Важно спроектировать систему связи для более высокой скорости передачи данных, которая бы соответствовала энергетическому потенциалу кубсатов. Еще одним значимым фактором являются потери в атмосфере. Низкоорбитальные спутники CubeSat претерпевают наименьшие потери, когда находятся прямо над наземной станцией, и наибольшие – когда видны только на малых высотах над горизонтом: в этих худших условиях сигнал проходит под более острым углом по отношению к горизонту и подвергается более серьезным атмосферным потерям. Таким образом, предложенная схема связи может совмещать радиочастотную и оптическую связь и энергосберегающую модуляцию. Также предполагается, что нерегулируемый многостанционный доступ может быть рассмотрен как общая архитектура для программ полетов роя спутников.

Наконец, протоколы, разработанные для автономных сетей (например, сенсорных сетей, автономных аппаратов и так далее), могут быть использованы для разбиения роя, создания и поддержания будущих применений согласно концепции «Интернет для всех».

## References



1. <http://spaceworkseng.com/spaceworks-releases-2017nanomicrosatellite-market-assessment/>
2. **R. Radhakrishnan, W. W. Edmonson, F. Afghah, R. M. Rodriguez-Osorio, F. Pinto and S. C. Burleigh.** Survey of Inter-Satellite Communication for Small Satellite Systems: Physical Layer to Network Layer View; IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 4, pp. 2442-2473, Fourth quarter 2016.
3. Small Spacecraft Technology State of Art, Mission Design Division Staff, NASA Ames Research Center, NASA/TP-2014-216648/REV1, July 2014.
4. **Crail, B. Clayton.** Ranking CubeSat Communication Systems Using a Value-centric Framework; MBA and MSc in Aeronautics and Astronautics Thesis, MIT, June 2013.
5. **Kennedy, Andrew Kitrell.** Resource Optimization Algorithms for an Automated Coordinated CubeSat Constellation; MSc in Aeronautics and Astronautics Thesis, MIT, August 2015.
6. **Schuire, Scott.** CubeSat Communication and Frequency Past Practice and Current Trends; NASA Goddard Space Flight Center, June 2014.
7. **Zanette, Luca;** Reyneri, Leonardo; Bruni, Giuseppe. Communication and Mutual Physical Position Estimation System for CubeSat; 8th European CubeSat Symposium, Londra, 7-9 September 2016, pp. 57-58.
8. EDSN: Edison Demonstration for SmallSat Networks Overview, Small Spacecraft Technology Program, Space Technology Mission Directorate, NASA.
9. **Spangelo, Sara C.** Modeling and Optimizing Space Networks for Improved Communication Capacity; PhD Thesis, University of Michigan, 2013.
10. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/iridium-next>.
11. **Kara, Ozan, et al.** Communication Architecture and International Policy Recommendations Enabling the Development of Global CubeSat Space Networks. IAC 2015, IAC2015 Jerusalem, Israel.
12. **Henniger, H., Wilfert, O.** An Introduction to Free-space Optical Communications. Radioengineering, Vol. 19, No. 2, June 2010, pp. 203-212.
13. **Schier James.** Future of Space Communication. Human Spaceflight Knowledge Sharing Forum, NASA Space Communications and Navigation, November 2016.

© ROOM

© Ozan Kara, Roger Birkeland, Lihui (Lydia) Zhang, Umuralp Kaytaz, 2018

### История статьи:

впервые опубликована в журнале ROOM #1(15) 2018.

Печатается с разрешения редакции

Принята к публикации: 07.05.2018

Перевод: Клименко А. Н.

Конфликт интересов: отсутствует

### Для цитирования:

Озан Кара, Роджер Берклэнд, Лиуи (Лидия) Чжан, Умуральп Кайтаз. Будущие рои CubeSat бросают серьезные вызовы в области связи // Воздушно-космическая сфера. 2018. №2(95). С. 58-65.