

## Оценка проектных параметров группировки спутников интернета вещей на предельно низких орбитах

© Г.А. Щеглов, В.С. Таратонкина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

*Обеспечение качественной связью и высокоскоростным доступом к интернету в любой точке Земли — важнейшая задача, решение которой будет способствовать успешному развитию государственных и частных цифровых сервисов. Для помощи в этой работе представлена упрощенная методика оценки проектных параметров группировки информационных спутников интернета вещей 5G, размещаемой на предельно низкой орбите, высотой 200 км, и интегрированной в неназемную информационную сеть (Non Terrestrial Networks), в состав которой входит не только космический, но и авиационный сегмент. Продемонстрирована экспоненциальная зависимость общего количества спутников от допустимого угла места над горизонтом. Приведены результаты расчета рабочей высоты расположения атмосферных аппаратов, входящих в неназемную сеть. Показаны преимущества использования атмосферного сегмента сети: снижение потребляемой мощности на борту космического аппарата в 1,2 раза; увеличение длительности сеансов радиосвязи в 1,9 раза; сокращение размерности спутниковой группировки в 3,3 раза и уменьшение общей массы группировки в 3,4 раза по сравнению с сетью NTN, в которой не используется авиационный сегмент. Даны основные проектные параметры спутника, входящего в состав группировки.*

**Ключевые слова:** интернет вещей, Non Terrestrial Network, неназемная информационная сеть, спутниковая связь, технологии связи 5G, низкоорбитальный космический аппарат, предельно низкая орбита

**Введение.** В последние годы происходит интенсивное развитие интернета вещей (IoT) на базе технологии связи 5G. Под интернетом вещей понимается концепция сети передачи данных между физическими объектами («вещами») [1]. IoT — это вычислительная сеть физических объектов, оснащенная внутренними технологиями сбора и передачи информации в совокупности с устройствами и технологиями хранения и интеллектуальной обработки информации, а также устройствами и алгоритмами генерации управляющих воздействий [2].

Создание низкоорбитальной спутниковой группировки, поддерживающей связь 5G, обеспечит потребителей качественной связью и высокоскоростным доступом к Интернету в любой точке Земли. К главным особенностям сети 5G относятся высокая скорость передачи данных (1...2 Гбит/с), высокая пропускная способность, малая задержка сигнала (от 1 мс до 5 мс) [3]. В стандартах 3GPP для 5G выделены две полосы частот: FR1 (600...6000 МГц) и FR2 (24...100 ГГц). В Российской Федерации диапазон 5030...5091 МГц выделен для беспилотных авиационных систем [4].

Недостаток современных высокочастотных систем связи, в частности построенных по технологии 5G, — сильное затухание сигнала при передаче на большие расстояния. Для его преодоления предполагается, что группировка спутников будет интегрирована в телекоммуникационную систему, так называемую неназемную информационную сеть (англ. термин Non Terrestrial Network, NTN). Неназемные сети 5G NTN — это системы беспроводной связи, работающие над поверхностью Земли, включающие космические аппараты (КА) на различных орбитах, высотные платформы (атмосферные спутники, HAPS), а также беспилотные авиационные системы (БАС) [5]. Для Российской Федерации создание неназемных информационных сетей является актуальной задачей. В рамках выполнения поручения первого заместителя Председателя Правительства Российской Федерации от 1 декабря 2023 г. АО «ГЛОНАСС» и АНО «Платформа НТИ» подготовили Концепцию архитектуры «бесшовного цифрового неба», в которой, помимо прочего, предусматривается, что БАС объединены в новый тип критической информационной инфраструктуры как между собой, так и с искусственными спутниками, находящимися на низкой околоземной орбите [6, 7].

Объединение БАС и КА в единой системе позволит наиболее рационально обеспечить бесперебойное покрытие в отдаленных районах Земли, не имеющих доступа к традиционным наземным информационным сетям. Следует отметить, что можно реализовать несколько вариантов построения космического сегмента сетей NTN.

*Вариант 1:* построение NTN на базе космического сегмента. При этом предполагается создание мегаспутниковой группировки, включающей несколько тысяч КА, выполняющих функции орбитальных серверов, маршрутизаторов, коммутаторов и других элементов телекоммуникационной инфраструктуры. Дальность межспутниковой радиосвязи здесь сравнима с дальностью связи с такими элементами сети, как наземные объекты и БАС. Таким образом, любая «вещь» окажется погружена в глобальное информационное поле IoT космического сегмента. Недостаток данного варианта — высокая стоимость развертывания и поддержания в работоспособном состоянии большого количества относительно массивных КА с мощной энергетикой.

*Вариант 2:* построение NTN на базе наземной сети. В данном варианте предполагается создание ограниченной по численности группировки КА, причем дальность межспутниковой радиосвязи будет существенно большей, чем дальность связи с наземными объектами. Поскольку в этом случае КА должны обладать большой энергетикой для межспутниковой связи, более рационально погружать КА и БАС в информационное поле наземных пунктов связи, подключенных к существующим развитым телекоммуникационным сетям. При этом

спутники будут использоваться преимущественно в качестве ретрансляторов информации между наземными и воздушными клиентами сети. В данном варианте количество КА может колебаться от нескольких десятков до нескольких сотен, что делает космический сегмент экономически целесообразным, однако потребуются значительные затраты на создание глобального наземного сегмента с минимальными зонами ограниченного покрытия связью, где и будут востребованы данные со спутников.

*Вариант 3:* построение гетерогенной NTN, что предполагает использование в равной степени всех сегментов NTN, а именно наземного, воздушного и космического. Сетевое оборудование (серверы, маршрутизаторы и пр.) по возможности следует размещать на максимальном количестве «вещей» в сети IoT: на КА, наземных станциях и транспорте (в том числе автомобилях, поездах, морских и речных судах и т. п.), воздушных судах (как беспилотных, так и пилотируемых). Параметры массы и энергопотребления спутников для такой группировки существенно зависят от параметров орбиты КА и параметров движения БАС, которые определяют дальность радиосвязи. В такой сети могут оказаться востребованными низкоорбитальные спутники IoT 5G, находящиеся на предельно низких орбитах, высотой 200...250 км, и обладающие следующими преимуществами:

- обеспечение потребителей бесперебойной связью с минимальными задержками и высокой пропускной способностью;
- снижение стоимости бортовой аппаратуры КА, так как малая высота полета уменьшает дозу радиационного воздействия и позволяет использовать для бортового оборудования общепромышленную электронику;
- решение проблемы космического мусора, поскольку захоронение КА происходит без дополнительных затрат за счет торможения в плотных слоях остаточной атмосферы.

Цель работы — исследование основных проектных параметров спутниковой группировки на предельно низких орбитах IoT 5G при ее интеграции в гетерогенную неназемную сеть NTN.

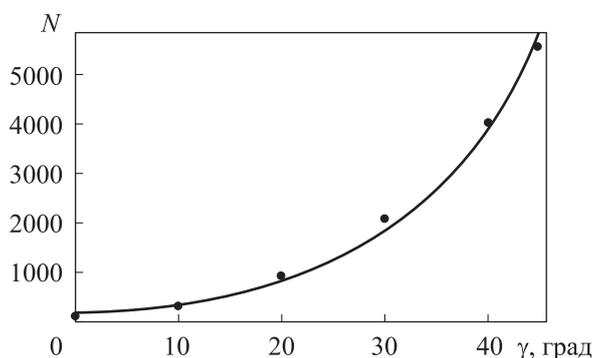
**Методика исследования.** В предыдущей работе авторов [8] была представлена упрощенная методика, пригодная для первичной оценки проектных параметров группировки информационных спутников IoT 5G. Она предполагает определение параметров рабочей орбиты, минимального количества КА в группировке и таких их параметров, как масса и энергопотребление.

Количество спутников в группировке определяется с учетом условия глобального покрытия земной поверхности зоной связи IoT 5G. При выборе проектных параметров спутниковой группировки нижним пределом ограничения являются скорость передачи данных и уровень сигнала, а верхним — будет энергопотребление КА [8].

Расчеты, проведенные с помощью разработанной методики, показали, что с увеличением допустимого угла места  $\gamma$  (угла возвышения спутника над горизонтом) общее количество аппаратов  $N$ , входящих в группировку, увеличивается по экспоненциальному закону (рис. 1):

$$N(\gamma) = \exp(5,142 + 0,078\gamma). \quad (1)$$

Результаты расчетов параметров группировки IoT, проведенных согласно указанной методике, для орбиты высотой 200 км представлены в табл. 1.



**Рис. 1.** Зависимость количества спутников группировки IoT  $N$  на предельно низкой орбите от допустимого угла места  $\gamma$

Таблица 1

**Параметры спутниковой группировки IoT на предельно низкой орбите**

Параметр	Значения параметра в зависимости от угла места $\gamma$ , град					
	0	10	20	30	40	45
Наклонение орбиты, град	76	83	86	87	88	88
Диаметр зоны видимости спутника, км	3154	1621	966	644	453	382
Количество орбитальных плоскостей	7	13	21	32	45	53
Количество спутников в орбитальной плоскости	13	25	42	63	89	105
Общее количество КА в группировке	91	325	882	2016	4005	5565

Увеличение общего количества спутников в группировке приводит к сокращению энергопотребления КА. При этом масса одного аппарата уменьшается, а суммарная масса группировки возрастает, что увеличивает затраты на ее развертывание и поддержание. Однако

большое число спутников может быть оправдано с точки зрения повышения надежности радиосвязи с наземными станциями в вариантах 1 и 2 построения сетей NTN.

Для того чтобы уменьшить количество спутников в космическом сегменте, предлагается ввести в сеть NTN дополнительную авиационную группировку, которая позволит минимизировать допустимый угол места. В составе авиационной группировки можно не только использовать отдельные специализированные БАС, но и установить сетевое оборудование на гражданские воздушные суда (как грузовые, так и пассажирские), аналогично известному решению Gogo [9, 10]. Воздушные суда движутся по строго определенным воздушным коридорам, и такой подход позволяет не только снизить стоимость проекта, но уже и обеспечить надежное покрытие интернетом 5G в пределах данных коридоров.

**Выбор проектных параметров КА для гетерогенной NTN.** В качестве проектного параметра рассмотрим высоту полета БАС —  $h_{\text{БАС}}$ , зависящую от высоты препятствий, в качестве которых в условиях плотной жилой застройки выступают дома, а за чертой города — лесные массивы. Максимальная высота деревьев в тайге по источникам [11, 12] составляет 70 м, средняя высота жилой застройки в мегаполисе — 24 этажа [13], где высота одного этажа лежит в диапазоне 2,8...3,3 м [14]. При расчетах примем высоту одного этажа 3,3 м и, следовательно, высоту 24-этажного дома 79,2 м.

Предположив, что угол места равен  $45^\circ$ , получим расстояние передачи сигнала в виде гипотенузы прямоугольного равнобедренного треугольника с катетом  $h_{\text{БАС}}$ . Тогда высоту траектории для размещения БАС можно определить по формуле

$$h_{\text{БАС}} = r/\sqrt{2}, \quad (2)$$

где  $r$  — расстояние, на которое передается сигнал, определяемое по методике [8].

Значения коэффициентов усиления антенн для базовых станций на Земле и для антенн на БАС приведены в [15, 16]. Уровень сигнала, дошедшего до БАС, оценивается согласно методике, описанной в [8], по шкале из [17]. Зависимость уровня сигнала от расстояния его передачи представлена на рис. 2. Примем его допустимое значение равным  $-50$  дБи, что соответствует надежному хорошему сигналу. Затем, исходя из уровня дошедшего сигнала, определяем расстояние его передачи.

Необходимое количество БАС, представленное в виде

$$N = S_0/S, \quad (3)$$

зависит от заданной заказчиком площади, которую необходимо покрыть связью  $S_0$ , и площади зоны видимости единичного БАС, вычисляемой по формуле

$$S = \pi R^2, \quad (4)$$

где радиус зоны покрытия определяется выражением

$$R = R_3 \left[ \frac{\pi}{2} - \gamma - \arcsin \left( \frac{R_3 \cos \gamma}{R_3 + h_{\text{БАС}}} \right) \right], \quad (5)$$

в котором  $R_3$  — радиус Земли,  $R_3 = 6378$  км;  $\gamma$  — угол места над горизонтом, град.



Рис. 2. Зависимость уровня сигнала от расстояния его передачи  $r$

Используя данные источника СП.42.13330.2016 [18], можно определить зависимость угла места над горизонтом и общее количество БАС в группировке от ширины улицы  $L$ . Максимальную высоту домов принимаем равной 24-этажному ( $H \approx 80$  м). Угол места вычислим по формуле

$$\gamma = \operatorname{tg} \frac{H}{L}. \quad (6)$$

Результаты расчета, представленные в табл. 2 и на рис. 3, показывают, что зависимость числа БАС от угла места над горизонтом имеет экспоненциальный вид:

$$N_{\text{БАС}}(\gamma) = \exp(0,158\gamma - 7,127). \quad (7)$$

Расчет проводился для покрытия сетью связи 5G города, который по площади равен Москве:  $S_0 = 2561,5$  км<sup>2</sup> [19]. Полученные данные показывают, что, например, для угла места 45° расстояние передачи сигнала будет  $r = 15000$  м (уровень сигнала — 49,5 дБм), рабочая высота

группировки  $h_{\text{БАС}} = 10\,607$  м, диаметр зоны видимости  $D = 21$  км, площадь зоны видимости БАС  $S = 346,4$  км<sup>2</sup>. Следовательно, для покрытия рассматриваемой площади потребуется 8 БАС.

Таблица 2

**Общее количество БАС в зависимости от угла места над горизонтом, диаметра и площади зоны видимости, а также от ширины улиц жилой застройки**

Ширина улицы $L$ , м	Угол места над горизонтом $\gamma$ , град	Диаметр зоны видимости БАС $D$ , км	Площадь зоны видимости БАС, км <sup>2</sup>	Количество БАС
10	82,9	2,6	5,5	469
14	80,1	3,7	10,8	239
18	77,3	4,8	17,9	144
19	76,6	5,1	20,0	128
22	74,6	5,8	26,7	96
23	74,0	6,1	28,9	89
43,5	61,5	11,5	103,9	25
47,5	59,3	12,6	124,1	21

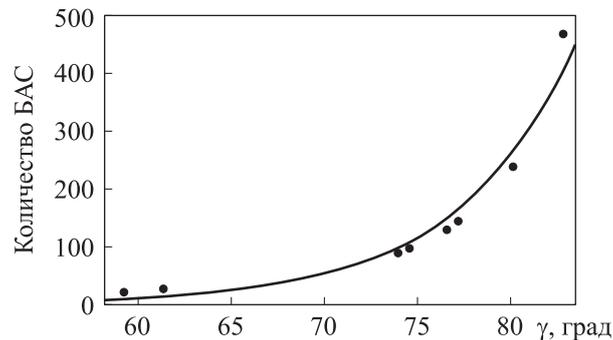


Рис. 3. Зависимость количества БАС  $N_{\text{БАС}}$  от угла места над горизонтом  $\gamma$

Рассмотрим изменение энергопотребления КА при введении БАС в сеть NTN с параметрами, показанными на рис. 4. Результаты расчетов, выполненных согласно [8], для спутника на орбите высотой 200 км, приведены в табл. 3. Частотный диапазон составляет 5030...5091 МГц. В расчетах используется средняя частота  $f = 5060,5$  МГц. В табл. 3 введены следующие обозначения:  $G_{rx}$  — коэффициент усиления приемной антенны;  $G_{tx}$  — коэффициент усиления антенны передатчика;  $P_{rx}$  — принимаемая мощность;  $P_{tx}$  — выходная мощность передатчика;  $U$  — затухание сигнала в атмосфере;  $R$  — дальность

передачи сигнала;  $P_a$  — мощность передатчика спутниковой антенны;  $P_{\text{потр}}$  — потребляемая мощность для передачи сигнала.

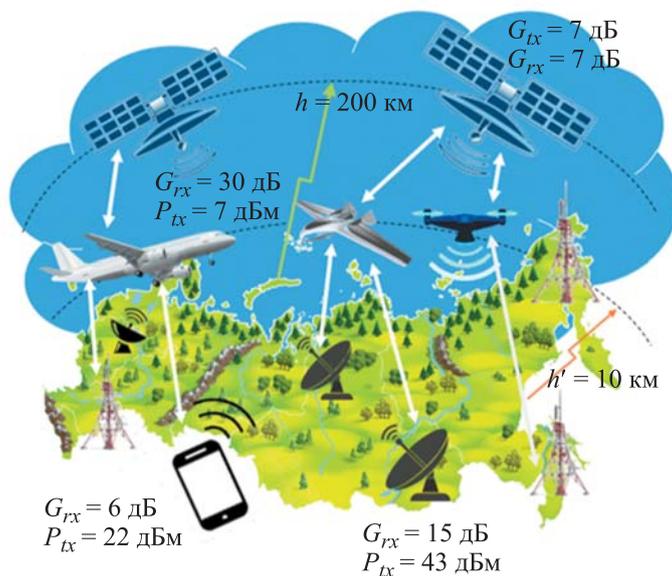


Рис. 4. Схема рассматриваемой гетерогенной NTN с дополнительными БАС

Таблица 3

Результаты расчета параметров каналов связи КА без БАС и с БАС

Параметры канала связи	Вариант сети NTN			
	без использования БАС		при введении БАС	
	Базовая станция–КА	Абонентский терминал–КА	КА–БАС	Абонентский терминал–БАС
<i>Исходные данные</i>				
$G_{rx}$ , дБ	7		30	
$G_{tx}$ , дБ	15	6	7	6
$P_{rx}$ , дБ·м	–		–100	–
$P_{tx}$ , дБ·м	43	22	–	22
$U$ , дБ	3			
$R$ , км	200		189,4	10,6
<i>Полученные результаты</i>				
$P_a$ , Вт	4,7	–	2,3–52,6	–
Уровень сигнала, дБ·м	–67	–75,8	–48,85	–46,5
$P_{\text{потр}}$ , Вт	13,7	–	6,7–152,7	–

В расчетах коэффициент усиления принимающей и передающей патч-антенн на КА принят равным 7 дБ — это среднее значение диапазона 5...9 дБ, согласно источнику [20]. Коэффициенты усиления антенн базовой станции и абонентского терминала (АТ) определены по методике из [15, 16].

Полученные результаты (см. табл. 3) показывают, что в случае использования канала связи «Базовая станция–КА» без применения БАС получен уровень  $-67$  дБ·м, что соответствует минимальному значению бесперебойной и надежной связи, но с небольшой скоростью передачи данных [17]. При прямой передаче сигнала с абонентского терминала на КА при указанных данных его уровень составляет  $-75,8$  дБ·м — при таком слабом сигнале [17] невозможно поддерживать надежное соединение. При введении в систему БАС уровень сигнала составляет  $-48,85$  дБ·м, что соответствует отличному сигналу.

При введении БАС в систему связи потребная мощность передатчика КА уменьшается в 2 раза вследствие сокращения расстояния передачи сигнала, а также за счет того, что на БАС могут размещаться передатчики, обладающие коэффициентом усиления сигнала [16], который больше, чем обычный абонентский терминал (см. табл. 3), сигнал которого будет доходить до КА нестабильно и с низкой скоростью без посредника в виде БАС. Сокращение потребной мощности передатчика КА приводит к снижению его энергопотребления. Следовательно, площадь, масса солнечных батарей (СБ) и масса КА уменьшаются. Это позволит введением дополнительной массы топлива продлить срок эксплуатации КА. Еще одно преимущество данного варианта NTN — уменьшение в канале радиосвязи КА–БАС значения угла места до нуля, как показано на рис. 5, что даст возможность существенно сократить размерность группировки.

Пусть потребляемая мощность передатчика на БАС составляет  $P_{\text{потр}} = 145$  Вт при следующих параметрах:  $P_a = 47$  Вт [16]; потери

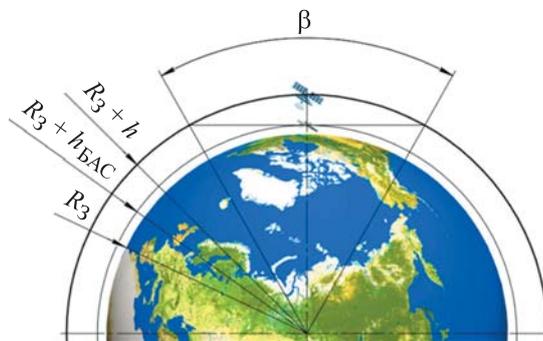


Рис. 5. Расчетная схема для определения угла  $\beta$

в антенно-фидерном устройстве  $\eta_{\text{в}} = 0,85$ ,  $\eta_{\text{м}} = 0,75$ ,  $\eta_{\text{г}} = 0,9$ ; коэффициент усиления приемной антенны  $Q = 1$ , взятые из [8]. Потребляемая мощность для приема сигнала составляет примерно  $10^{-8}$  Вт и при расчетах не учитывается. На борту БАС должно быть минимум три пары антенн (одна на прием и одна на передачу): пара антенн для связи с наземными абонентами и пара антенн для связи с другими БАС и две антенны для связи с КА. Тогда суммарное энергопотребление составит  $3 \cdot 145 = 435$  Вт.

При введении БАС в систему допустимый угол места  $\gamma$  уменьшается. На рис. 5 видно, что данный угол может стать отрицательным. Однако в работе введено предположение, что угол уменьшается с изначальных  $\gamma = 10^\circ$  до минимального значения  $\gamma = 0^\circ$ . С изменением величины угла места  $\gamma$  будет происходить изменение длительности сеанса радиосвязи. Для низких круговых орбит время прохождения КА зоны радиовидимости  $t_{\text{з.рв}}$  рассчитаем по формуле [21]

$$t_{\text{з.рв}} = \frac{T}{2\pi} \cdot \arccos\left(\frac{\cos\beta}{\cos\theta}\right), \quad (8)$$

где  $T$  — период обращения КА;  $\beta$  — угловой радиус зоны обзора поверхности Земли с КА;  $\theta$  — минимальное угловое расстояние от наблюдателя до плоскости орбиты КА, лежащее в диапазоне  $0 \leq \theta \leq \beta$ .

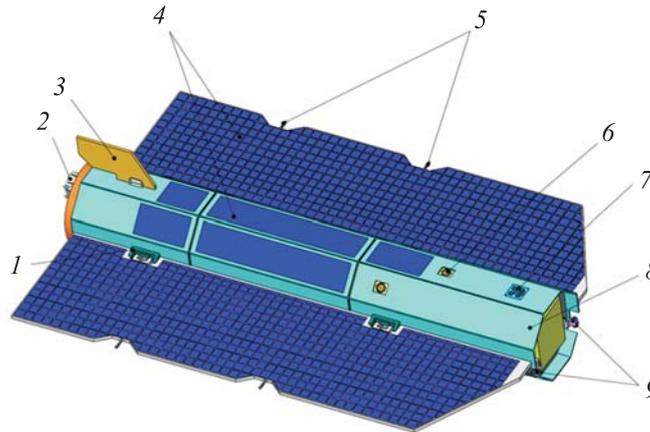
Угол  $\beta$  определим по формуле (см. рис. 5):

$$\beta = 2 \arccos\left(\frac{R_3 + h_{\text{БАС}}}{R_3 + h}\right), \quad (9)$$

где  $h = 200$  км — высота орбиты группировки.

При расчете принимаем  $\theta = 0$  для определения максимальной длительности сеанса радиосвязи. При  $\gamma = 10^\circ$  получаем  $\beta = 14^\circ 36'$ ;  $t_{\text{з.рв}} = 3,6$  мин, при  $\gamma = 0$  —  $\beta = 27^\circ 34'$   $t_{\text{з.рв}} = 6,8$  мин. Следовательно, при введении БАС в систему связи длительность сеанса радиосвязи увеличивается в 1,9 раза. Как следует из рис. 5, дальность радиосвязи в канале КА-БАС существенно изменяется — от 189,4 км до 1567 км. Соответствующие значения мощностей  $P_{\text{а}}$  и  $P_{\text{потр}}$  приведены в табл. 3. Меньшие значения наблюдаются в том случае, когда КА находится в зените и дальность равна высоте полета КА, составляющей 200 км, из которой вычитается высота полета БАС 10,6 км. Большие значения соответствуют случаю, когда КА находится на горизонте при  $\gamma = 0$ .

**Прототип низкоорбитального спутника связи.** На основании проведенных расчетов был определен облик низкоорбитального спутника связи, показанный на рис. 6. В качестве прототипа был выбран известный низкоорбитальный КА GOCE [22] массой 1050 кг, запущенный в 2009 г. на круговую орбиту высотой 250 км, на которой он просуществовал в течение 20 месяцев, поддерживая ее высоту с помощью электрореактивной двигательной установки (ЭРДУ).



**Рис. 6.** Предполагаемый облик низкоорбитального спутника связи:

- 1 — узел крепления и привод поворота панели солнечной батареи (4 шт.); 2 — ЭРДУ;  
3 — стабилизатор (2 шт.); 4 — панель солнечной батареи; 5 — спиральная антенна  
(4 шт.); 6 — солнечный датчик (3 шт.); 7 — патч-антенна (4 шт.); 8 — корпус КА;  
9 — звездный датчик (2 шт.)

Расчет проектных параметров спутника связи проводился согласно методике [8]. Высота круговой орбиты была принята равной 200 км. Сила сопротивления атмосферы на данной высоте, отнесенная к площади миделева сечения, не превышала  $40 \text{ мН/м}^2$  [23]. Для того чтобы преодолеть тормозящее воздействие остаточной атмосферы на КА, предполагается установить корректирующую ЭРДУ. Анализ литературных источников показал, что в данном случае при учете необходимого запаса может быть использована, например, ЭРДУ КМ-88, обладающая удельным импульсом 2100 с и тягой 72 мН [24]. Возможен также вариант применения прямоточного электрореактивного двигателя [23]. Главными потребителями электрической энергии на борту КА являются радиосистемы и ЭРДУ. На основании общей потребляемой мощности данных систем рассчитывается площадь солнечных панелей и выполняется массовый анализ КА, результаты которого приведены в табл. 4.

Как следует из данных табл. 4, масса КА для двух рассмотренных вариантов построения сети NTN различается незначительно — на 3,5 %. Входящие в состав группировки КА относятся к классу мини-

спутников массой от 100 кг до 500 кг. Такие КА при разворачивании группировки могут быть выведены на рабочие орбиты в ходе относительно небольшого количества специализированных кластерных пусков ракетами-носителями среднего класса.

Таблица 4

**Результаты массового анализа низкоорбитального КА**

Масса, кг	Вариант построения сети NTN	
	КА с БАС	КА без БАС
Двигательная установка	10,8	12,4
Оборудование энергоустановки	30	
Полезная нагрузка	80	
Система электроснабжения	90	96
Система обеспечения теплового режима	15,4	16,5
Радиотехническая система	2	
Бортовой комплекс управления	80	
Конструкция	43,6	45,4
Топливо	43,8	47
Баки	4,4	4,7
<i>Суммарная масса КА</i>	400	414

Для восполнения группировки КА при ее эксплуатации могут быть использованы носители легкого и сверхлегкого классов. Параметры спутниковой группировки приведены в табл. 5.

Как следует из данных табл. 5, для группировки КА при построении сети NTN с использованием БАС в качестве серверов-ретрансляторов потребуется существенно меньшее число КА. В таком варианте построения сети NTN число КА в 3,3 раза меньше, чем в случае без использования БАС, и в 6,6 раз меньше, чем в случае низкоорбитальной сети широкополосного доступа в Интернет One-Web. Относительно небольшой срок службы КА может быть компенсирован невысокой стоимостью аппаратов, обеспечиваемой за счет использования общепромышленной электронной компонентной базы, которая достаточно устойчиво функционирует на предельно низкой околоземной орбите. При этом за счет применения готовых компонентов, имеющих на рынке решений цифровой связи (так называемых COTS-компонентов), может быть достигнута унификация аппаратуры связи и элементов телекоммуникационной инфраструктуры, устанавливаемых на наземных, воздушных и космических сегментах сети NTN, что повысит экономические показатели системы в целом.

## Параметры спутниковой группировки

Параметр	Вариант сети NTN	
	КА с БАС	КА без БАС
Высота орбит группировки, км	200	
Число орбитальных плоскостей, шт.	7	13
Число КА в каждой плоскости, шт.	14	25
Общее количество КА в группировке, шт.	98	325
Время существования группировки, лет	5	
Потребляемая мощность, Вт	2856	3427
Площадь солнечных батарей, м <sup>2</sup>	6,8	8,16
Запас характеристической скорости для коррекции высоты орбиты, км/с	2,41	2,49
Площадь миделя одного КА, м <sup>2</sup>	0,4	0,42
Период обращения КА, мин	88,5	
Время нахождения КА, мин:	37,4	
в тени Земли		
в зоне радиосвязи	6,8	3,6
Масса, кг:		
одного КА	400	414
всех КА в группировке	39 200	134 550

**Заключение.** Проведенное исследование показывает, что рациональная группировка информационных спутников интернета вещей 5G, размещаемая на предельно низких орбитах, должна быть подсистемой (сегментом) более общей надсистемы — наземной сети Non Terrestrial Networks, наряду с другими ее подсистемами, образующими наземный и воздушный (атмосферный) сегменты. Общее количество космических аппаратов на рабочей орбите экспоненциально растет с увеличением угла места над горизонтом. Введение в систему связи атмосферных аппаратов позволит за счет обнуления угла места при связи со спутником создать минимальную космическую группировку, включающую менее сотни КА. Атмосферный сегмент сети NTN может включать как серверы-ретрансляторы, размещаемые на специализированных БАС, так и серверы-ретрансляторы на борту гражданских воздушных судов, которые движутся по отведенным им воздушным коридорам. Рабочая высота группировки авиационных средств составит 10,6 км, потребляемая мощность радиопередатчиков — 145 Вт. Дополнительным положительным эффектом будет оснащение всех указанных воздушных судов связью 5G. Преимуществами использования атмосферного сегмента сети NTN являются сокращение потребляемой мощности на борту космического аппарата

в 1,2 раза, увеличение длительности сеансов радиосвязи в 1,9 раза, сокращение размерности спутниковой группировки в 3,3 раза и уменьшение общей массы группировки в 3,4 раза по сравнению с сетью NTN, которая не использует авиационный сегмент.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yung K.L., Ip A.W.H., Fatos Xhafa, Tseng K.K. *IoT and Spacecraft Informatics (Aerospace Engineering)*. Elsevier, 2022. 376 p.
- [2] Промышленный интернет вещей. *Агентство промышленного развития Москвы*. URL: <https://apr.moscow/content/data/5/03%20Промышленный%20интернет%20вещей.pdf> (дата обращения: 15.10.2023).
- [3] *Сети 5G в России* — технология и ее внедрение. URL: <https://5g-russia.ru/> (дата обращения: 12.11.2023).
- [4] Кабмин закрепил решение о распределении радиочастот для системы управления БПЛА. *ТАСС*. URL: <https://tass.ru/ekonomika/18791761> (дата обращения: 15.11.2023).
- [5] Non Terrestrial Networks (NTN). *Rohde & Schwarz*. URL: [https://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/cellular-standards/5g-test-and-measurement/non-terrestrial-networks-ntn/non-terrestrial-networks-ntn\\_256719.html](https://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/cellular-standards/5g-test-and-measurement/non-terrestrial-networks-ntn/non-terrestrial-networks-ntn_256719.html) (дата обращения: 30.05.2024).
- [6] «Бесшовное цифровое небо» упростит интеграцию гражданских авиабеспилотников. *АвиаПОРТ*. 19.04.2024, 16:54. URL: <https://www.aviaport.ru/news/besshovnoe-tsifrovoye-nebo-uprostit-integratsiyu-grazhdanskikh-aviabespiilotnikov/> (дата обращения: 30.05.2024).
- [7] В Москве открыли общественное пространство для развития дронов и частного космоса. *Фонд НТИ*. 13.04.2024. URL: [https://nti.fund/about/news/?ELEMENT\\_ID=3767](https://nti.fund/about/news/?ELEMENT_ID=3767) (дата обращения: 30.05.2024).
- [8] Щеглов Г.А., Таратонкина В.С. Оценка проектных параметров группировки информационных спутников IoT 5G. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-7-2289>
- [9] *Gogo Business Aviation*. URL: <https://www.gogoair.com/> (дата обращения: 30.05.2024).
- [10] Gogo eyes 3Q 2024 for 5G shipments as chip problem bites. *runwaygirlnetwork* 13.11.2023 URL: <https://runwaygirlnetwork.com/2023/11/gogo-third-quarter-2024-5g-chip/> (дата обращения: 30.05.2024).
- [11] Анучин Н.П. *Лесная таксация*. 5-е изд. Москва, Лесная промышленность, 1982, 552 с.
- [12] Загреев В.В., Гусев Н.Н., Мошкалев А.Г., Селимов Ш.А. *Лесная таксация и лесоустройство*. Москва, Экология, 1991, 384 с.
- [13] Названа средняя высота новостроек в России. *ЦИАН* URL: <https://www.cian.ru/novosti-nazvana-srednjaja-vysota-novostroek-v-rossii-313522/> (дата обращения: 08.01.2024).
- [14] Сколько высота одного этажа? Нормы для многоквартирных и индивидуальных домов. *Строй-Бетон*. URL: [https://vostokstroy-belebey.ru/strojka-i-remont/vysota-etazha-zhilogo-doma.html?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F](https://vostokstroy-belebey.ru/strojka-i-remont/vysota-etazha-zhilogo-doma.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F) (дата обращения: 08.01.2024).
- [15] Мовчан А.К., Рогожников Е.В., Дмитриев Э.М., Новичков С.А., Лаконцев Д.В. Расчет ослабления сигнала сетей сотовой связи 5G для частот диапазона FR1.

- Доклады ТУСУР, 2022, т. 25, № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-oslableniya-signala-setey-sotovoy-svyazi-5g-dlya-chastot-diapazona-fr1/viewer> (дата обращения: 20.12.2023).
- [16] Фокин Г.А. Обзор моделей радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами. *Труды учебных заведений связи*, 2018, т. 4, № 4, с. 85–101. DOI: 10.31854/1813-324X-2018-4-4-85-101
- [17] Мощность сигнала и радиус работы. *Urouter* URL: <https://urouter.ru/how-it-works/signal-strength-and-range.html> (дата обращения: 04.12.2022).
- [18] СП 42.13330.2016. *Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054209> (дата обращения: 13.01.2024).
- [19] Москва. *Большая российская энциклопедия*. URL: <https://bigenc.ru/c/moskva-a34bd2> (дата обращения: 13.01.2024).
- [20] Патч-антенна 3G, 4G, Wi-Fi. *3G-Aerial*. URL: <https://3g-aerial.biz/konstruktsii-antenn/odnapravlennyye-antenny/patch-antenna> (дата обращения: 12.01.2024).
- [21] Чеботарев В.Е., Косенко В.Е. *Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения*. Красноярск, 2011, 488 с.
- [22] GOCE (Earth Explorer 1) *Gunter's Space Page*. URL: [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/goce.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/goce.htm) (дата обращения: 13.01.2024).
- [23] Erofeev A.I., Nikiforov A.P., Popov G.A. et al. Air-breathing ramjet electric propulsion for controlling low-orbit spacecraft motion to compensate for aerodynamic drag. *Solar System Research*, 2017, vol. 51, pp. 639–645. <https://doi.org/10.1134/S0038094617070048>
- [24] АО ГНЦ «Центр Келдыша». URL: <https://keldysh-space.ru/nashadeyatelnost/raketno-kosmicheskaya-deyatelnost/raketnye-dvigateli/> (дата обращения: 07.11.2023).

Статья поступила в редакцию 03.06.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Щеглов Г.А., Таратонкина В.С. Оценка проектных параметров группировки спутников интернета вещей на предельно низких орбитах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 8. EDN MCBVMH

**Щеглов Георгий Александрович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [shcheglov\\_ga@bmstu.ru](mailto:shcheglov_ga@bmstu.ru)

**Таратонкина Вера Сергеевна** — студент-дипломник специалитета кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [taratonkinavs@student.bmstu.ru](mailto:taratonkinavs@student.bmstu.ru)

## Evaluating design parameters of the IoT satellite constellation in the extremely low orbits

© G. A. Shcheglov, V. S. Taratonkina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The task of providing high-quality communication and high-speed Internet access anywhere on Earth is nowadays of utmost importance in successful development of the public and private digital services. The paper presents a simplified methodology for assessing design parameters of a constellation of the 5G Internet of Things information satellites positioned in an extremely low orbit at the altitude of 200 km and integrated into the non-terrestrial information network. Such network includes not only the space, but also the airborne segments. The paper demonstrates exponential dependence of the total number of satellites on the permissible elevation angle above the horizon. It presents results of computing the operation altitude for the atmospheric airborne vehicles included in the non-terrestrial network and shows advantages of introducing the network atmospheric segment. They include: reducing power consumption on board a spacecraft by 1.2 times; increase in the radio communication session duration by 1.9 times; reducing the satellite constellation size by 3.3 times; as well as reduction in the constellation total mass by 3.4 times compared to the Non-Terrestrial Network (NTN), which is not using the airborne segment. Main design parameters of a satellite included in the constellation are provided.*

**Keywords:** *Internet of Things, Non-Terrestrial Network, non-terrestrial information network, satellite communications, 5G communication technologies, low-orbit spacecraft, extremely low orbit*

### REFERENCES

- [1] Yung K.L., Ip A.W.H., Fatos Xhafa, Tseng K.K. *IoT and Spacecraft Informatics (Aerospace Engineering)*. Elsevier, 2022, 376 p.
- [2] Promyshlennyi internet veschey [Industrial Internet of Things]. *Agentstvo promyshlennogo razvitiya Moskvy — Moscow Industrial Development Agency*. Available at: <https://apr.moscow/content/data/5/03%20Промышленный%20интернет%20вещей.pdf> (accessed October 15, 2023).
- [3] *Seti 5G v Rossii — tekhnologiya i ee vnedrenie* [5G networks in Russia – technology and its implementation]. Available at: <https://5g-russia.ru/> (accessed November 12, 2023).
- [4] Kabmin zakrepil reshenie o raspredelenii radiochastot dlya sistemy upravleniya BPLA [The Cabinet of Ministers fixed the decision on distribution of radio frequencies for the UAV control system]. *TASS*. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/18791761> (accessed November 15, 2023).
- [5] Non Terrestrial Networks (NTN). *Rohde & Schwarz*. Available at: [https://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/cellular-standards/5g-test-and-measurement/non-terrestrial-networks-ntn/non-terrestrial-networks-ntn\\_256719.html](https://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/cellular-standards/5g-test-and-measurement/non-terrestrial-networks-ntn/non-terrestrial-networks-ntn_256719.html) (accessed May 30, 2024).
- [6] “Besshovnoe tsifrovoe nebo” uprostit integratsiyu grazhdanskikh aviabesilotnikov [“The seamless digital sky” will simplify integration of the civilian UAVs]. *AviaPort*. 19.04.2024, 16:54 Available at: <https://www.aviaport.ru/news/besshovnoe-tsifrovoe-nebo-uprostit-integratsiyu-grazhdanskikh-aviabesilotnikov/> (accessed May 30, 2024).

- [7] V Moskve otkryli obshchestvennoe prostranstvo dlya razvitiya dronov i chastnogo kosmosa [Public space was opened in Moscow for the development of drones and private space]. *Fond NTI — NTI Fund*. 13.04.2024. Available at: [https://nti.fund/about/news/?ELEMENT\\_ID=3767](https://nti.fund/about/news/?ELEMENT_ID=3767) (accessed May 30, 2024).
- [8] Shcheglov G.A., Taratonkina V. S. Otsenka proektnykh parametrov gruppirovki informatsionnykh sputnikov IoT 5G [Design parameters evaluation of the IoT 5G information satellites constellation]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-7-2289>
- [9] *Gogo Business Aviation*. Official site. Available at: <https://www.gogoair.com/> (accessed May 30, 2024).
- [10] Gogo eyes 3Q 2024 for 5G shipments as chip problem bites. *Runwaygirlnetwork*. 13.11.2023. Available at: <https://runwaygirlnetwork.com/2023/11/gogo-third-quarter-2024-5g-chip/> (accessed May 30, 2024).
- [11] Anuchin N.P. *Lesnaya taksatsiya* [Forest taxation]. 5th ed. Moscow, Lesnaya Promyshlennost Publ., 1982, 552 p.
- [12] Zagreev V.V., Gusev N.N., Moshkalev A.G., Selimov SH.A. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo* [Forest taxation and forest management]. Moscow, Ekologiya Publ., 1991, 384 p.
- [13] Nazvana srednyaya vysota novostroek v Rossii [Average height of new buildings in Russia is indicated]. *TsIAN*. Available at: <https://www.cian.ru/novosti-nazvana-srednjaja-vysota-novostroek-v-rossii-313522/> (accessed January 8, 2024).
- [14] Skolko vysota odnogo etazha? Normy dlya mnogokvartirnykh i individualnykh domov [How high is one floor? Standards for the tenement and individual houses]. *Stroy-Beton*. Available at: [https://vostokstroy-belebey.ru/strojka-i-remont/vysota-etazha-zhilogo-doma.html?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F](https://vostokstroy-belebey.ru/strojka-i-remont/vysota-etazha-zhilogo-doma.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F) (accessed January 08, 2024).
- [15] Movchan A.K., Rogozhnikov E.V., Dmitriev E.M., Novichkov S.A., Lakontsev D.V. Raschet oslableniya signala setey sotovoy svyazi 5G dlya chastot diapazona FR1 [Calculation of signal attenuation of 5G cellular networks for frequencies of the FR1 band]. *Doklady TUSUR — Proceedings of TUSUR University*, 2022, vol. 25, no. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-oslableniya-signala-setey-sotovoy-svyazi-5g-dlya-chastot-diapazona-fr1/viewer> (accessed December 20, 2023).
- [16] Fokin G.A. Obzor modeley radiokanala svyazi s bespilotnymi letatelnyimi apparatami [Survey of radio communication channel models for unmanned aerial vehicles]. *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi — Proceedings of Telecommunication Universities*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 85–101. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2018-4-4-85-101>
- [17] Moshchnost signala i radius raboty [Signal strength and operating radius]. *Urouter*. Available at: <https://urouter.ru/how-it-works/signal-strength-and-range.html> (accessed December 4, 2024).
- [18] *SP 42.13330.2016. Gradostroitelstvo. Planirovka i zastroyka gorodskikh i sel'skikh poseleniy* [SP 42.13330.2016. Urban development. Urban and rural planning and development]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456054209> (accessed January 13, 2024).
- [19] *Moskva. Bolshaya rossiyskaya entsiklopediya* [Moscow. The Great Russian Encyclopedia]. Available at: <https://bigenc.ru/c/moskva-a34bd2> (accessed January 13, 2024).

- [20] Patch-antenna 3G, 4G, Wi-Fi [3G, 4G, Wi-Fi patch antenna]. *3G-Aerial*. Available at: <https://3g-aerial.biz/konstruktsii-antenn/odnonapravlennye-antenny/patch-antenna> (accessed January 12, 2024).
- [21] Chebotarev V.E., Kosenko V.E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of design of the information support spacecraft]. Krasnoyarsk, 2011, 488 p.
- [22] GOCE (Earth Explorer 1). *Gunter's Space Page*. Available at: [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/goce.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/goce.htm) (accessed January 13, 2024).
- [23] Erofeev, A.I., Nikiforov, A.P., Popov, G.A. et al. Air-Breathing Ramjet Electric Propulsion for Controlling Low-Orbit Spacecraft Motion to Compensate for Aerodynamic Drag. *Solar System Research*, 2017, vol. 51, pp. 639–645. <https://doi.org/10.1134/S0038094617070048>
- [24] *AO GNTs «Tsentr Keldysha»* [State Scientific Center of the Russian Federation “Keldysh Research Center”]. Available at: <https://keldysh-space.ru/nashadeyatelnost/raketno-kosmicheskaya-deyatelnost/raketnye-dvigateli/> (accessed November 7, 2023).

**Shcheglov G.A.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: [shcheglov\\_ga@bmstu.ru](mailto:shcheglov_ga@bmstu.ru)

**Taratonkina V.S.**, Diploma Student, Department of Aerospace Systems specialty, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: [taratonkinavs@student.bmstu.ru](mailto:taratonkinavs@student.bmstu.ru)