

УДК 629.786.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ
СИСТЕМ ГРУППИРОВОК НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ ДЛЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СВЯЗИ «ONEWEB» И
«STARLINK»**

Өтебалиева Айнұр Қобландықызы

uainurak@gmail.com

Магистрант физико-технического факультета ЕНУ им. Л. Н. Гумилева,
Нур-Султан, Казахстан

Научный руководитель – к.т.н., профессор Бурамбаева Нурсауле Аманжоловна

Идея обеспечения доступа в Интернет из космоса в последние годы сильно возродилась, возникла новая волна предложений о создании крупных созвездий низкоорбитальных спутников (НОО) для обеспечения глобального широкополосного

доступа. В этой статье сравниваются два таких крупных спутниковых созвездия LEOStarlink и OneWeb. В статье представлено системная архитектура каждого из созвездий (как описано в их соответствующих документах FCC по состоянию на сентябрь 2018 года), подчеркивая сходства и различия между этими двумя системами.

В период с 2014 по 2016 год в общей сложности 11 компаний обратились в Федеральную комиссию по связи (FCC - Federal Communications Commission) с просьбой развернуть крупные созвездия на негеостационарных спутниковых орбитах (NGSO - Non-Geostationary satellite orbits) в качестве средства предоставления широкополосных услуг. Из 11 предложений, зарегистрированных в FCC, два находятся на продвинутой стадии разработки, полное развертывание которых запланированы на ближайшие годы: OneWeb, Starlink от SpaceX.

Созвездие OneWeb Ku+Ka-диапазона [1] включает 648 спутников в 18 круговых орбитальных плоскостях по 36 аппаратов в каждой на высоте 1200 км, каждая плоскость наклонена под углом 87° . При этом 588 аппаратов будут обеспечивать глобальное предоставление услуг связи, а 60 спутников будут находиться на орбитах в качестве резервных. На рис. 1 показана схема созвездия системы OneWeb.

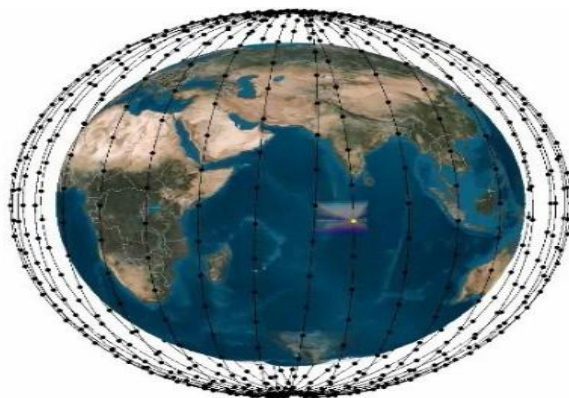


Рисунок 1 – Схема реализации созвездия системы OneWeb

Каждый спутник будет иметь полезную нагрузку с 16 идентичными, неуправляемыми пользовательскими лучами. След этих лучей гарантирует, что любой пользователь будет находиться в пределах прямой видимости по крайней мере одного спутника с углом возвышения более 55° градусов. Система OneWeb использует Ku-диапазон для связи с пользователями и Ka-диапазон для связи со шлюзами. В частности, диапазоны 10.7-12.7 и 12.75-14,5 ГГц будут использоваться для нисходящей и восходящей связи пользователей соответственно, в то время как диапазоны 17,8-20,2 ГГц и 27,5-30,0 ГГц будут использоваться для нисходящей и восходящей связи шлюза соответственно. Каналы в обратном направлении будут иметь полосу пропускания 125 МГц, в то время как каналы в прямом направлении будут иметь полосу пропускания 250 МГц.

Предполагается, что наземный сегмент будет состоять из 50 или более шлюзных наземных станций с десятью шлюзными антеннами длиной 2,4 м каждая. Что касается пользователя, система OneWeb была разработана для работы с параболическими антеннами 30–75 см, фазированными антенными решетками и другими антеннами с электронным управлением. Поскольку спутники не используют межспутниковую связь, услуги могут предоставляться только в тех регионах, где пользователи и наземная станция одновременно находятся в пределах прямой видимости (LoS - Line of sight) спутника.

Созвездие Starlink Ku+Ka-диапазона от SpaceX [2] включает в себя 4425 спутников, которые будут распределены по нескольким наборам орбит. Основная группировка, которая будет развернута первой, состоит из 1600 спутников, равномерно распределенных в 32 орбитальных плоскостях на расстоянии 1150 км с наклоном 53° (синий). Остальные 2825 спутников последуют во вторичном развертывании и будут распределены следующим

образом: набор из 32 плоскостей с 50 спутниками на расстоянии 1110 км и наклоном 53,8 ° (оранжевый), набор из 8 орбитальных плоскостей с 50 спутниками на расстоянии 1130 км и наклоном 74 ° (пурпурный), набор из 5 плоскостей с 75 спутниками на расстоянии 1275 км и наклоном 81 ° (черный) и набор из 6 орбитальных плоскостей с 75 спутниками на расстоянии 1325 км и наклоном 70 ° (желтый). На рисунке 2 изображена схема мега-созвездия Starlink. Различные наборы орбит представлены разными цветами.

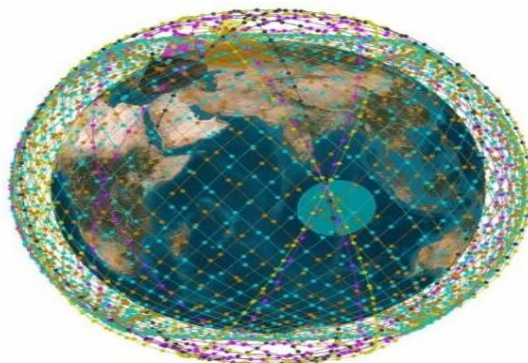


Рисунок 2 – Схема созвездия системы Starlink

SpaceX внесла изменения в свою заявку в 2018 году, понизив рабочую орбиту спутников до 550 км [3]. В таблице 1 приведен состав группировки, согласно последней заявки SpaceX в FCC от 17 апреля 2020 года [4] (заявка на данный момент еще не одобрена FCC):

Таблица 1

Состояние группировки Starlink на 24 марта 2021 года (заявка на данный момент еще не одобрена FCC)

Высота орбиты, км	Наклонение орбиты, градусов	Орбитальных плоскостей	Спутников в плоскости	Всего спутников	Выведено на орбиту	Сведено с орбиты
550	53	72	22	1584	1373	65
540	53.2	72	22	1584	0	
570	70	36	20	720	0	
560	97.5	6	58	348	0	
560	97.5	4	43	172	10	
Всего				4408	1383	65

Минимальный угол возвышения для пользовательского терминала составляет 40°, в то время как общая пропускная способность на спутник предполагается равной 17-23 Гбит / с, в зависимости от характеристик пользовательских терминалов. Кроме того, спутники будут также иметь оптические межспутниковые линии связи для обеспечения непрерывной связи, предоставления услуг над морем и смягчения последствий помех.

Наземный сегмент будет состоять из 3 различных типов элементов: станций слежения, телеметрии и команд (ТТ&С - tracking, telemetry and commands), антенн шлюзов и пользовательских терминалов. С одной стороны, станции ТТ&С будут малочисленны и распределены по всему миру, а их антенны будут иметь диаметр 5 м.

Система Starlink будет использовать Ku-диапазон для связи пользователей, а шлюзовая связь будет осуществляться в Ka-диапазоне. В частности, полосы частот 10,7-12,7 ГГц и 14,0-14,5 ГГц будут использоваться для нисходящей и восходящей связи пользователей соответственно, в то время как полосы частот 17,8-19,3 ГГц и 27,5-30,0 ГГц будут использоваться для нисходящей и восходящей связи шлюза соответственно.

3. Сравнительная оценка

3.1. Орбитальные позиции и количество спутников в зоне прямой видимости

Как показано в таблице 2, обе системы имеют общее использование круговых орбит с одинаковыми радиусами и находятся в диапазоне 1000-1350 км. Однако в то время как OneWeb использует традиционную конфигурацию полярных орбит для обеспечения

глобального покрытия, как Starlink использует конфигурацию с несколькими орбитами, причем некоторые спутники размещены на наклонных орбитах для обеспечения покрытия более густонаселенных районов планеты, а другие расположены на полярных орбитах для обеспечения глобального покрытия.

Таблица 2

Орбитальные параметры систем

Система	Орбитальная плоскость	Количество орбит. плоскостей	Кол-во спутников на одной плоскости	Количество спутников
OneWeb	1200km (87.9°)	18	36	648
Starlink	1,150km (53°)	32	50	4425
	1,110km (53.8°)	32	50	
	1,130km (74°)	8	50	
	1,275km (81°)	5	75	
	1,325km (70°)	6	75	

Эти различия в орбитальных позициях, а также тот факт, что общее число спутников в созвездии сильно различается между конкурирующими системами, приводят к большим различиям в среднем числе спутников в пределах LoS для данного местоположения. На рисунке 3 показано среднее число спутников в пределах LoS (с учетом минимальных углов возвышения, указанных в заявках FCC) для различных значений широты. При полном развертывании системы Starlink более 20 спутников будут находиться в пределах LoS в самых населенных районах Земли.

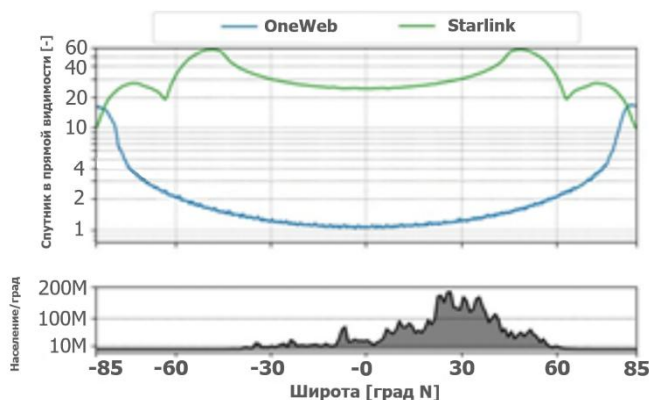


Рис. 3 – Количество спутников в прямой видимости в зависимости от широты

3.2. Распределение частот

На рисунке 4 показано распределение частот для двух систем. Для каждой системы и полосы частот верхняя строка представляет распределение RHCP (Right-handed circular polarization), а нижняя – распределение LHCP (Left-handed circular polarization). В таблице 3 сравниваются количество лучей, полоса пропускания на луч, общая полоса пропускания, выделенная для каждого типа канала связи, и коэффициент повторного использования частоты для каждого из лучей. Общая полоса пропускания на спутник вычисляется умножением полосы пропускания на тип луча на коэффициент повторного использования частоты, который был оценен на основе общей скорости передачи данных, сообщенной на спутник.

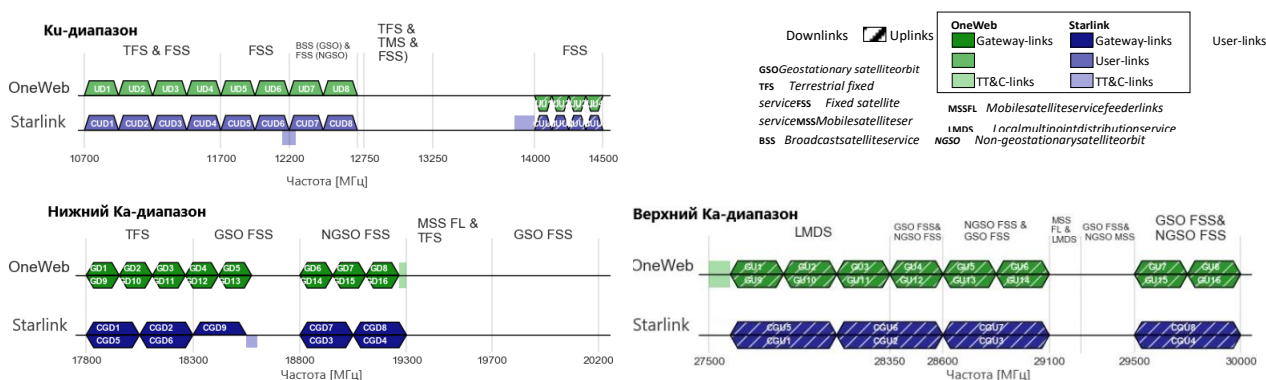


Рис. 4 – Распределение полос частот для двух спутниковых систем

С одной стороны, и Starlink, и OneWeb используют спектр Ku - диапазона для своих каналов связи спутник-пользователь (как восходящий, так и нисходящий), в то время как контакты спутник-земля осуществляются в нижнем (нисходящем) и верхнем (восходящем) диапазонах спектра Ка-диапазона. OneWeb использует поляризацию RHCP для нисходящих каналов пользователя и LHCP для восходящих каналов пользователя; Starlink использует RHCP как для восходящих, так и для нисходящих каналов, а LHCP используется для телеметрических данных. Кроме того, обе системы используют Ка-диапазон для своих шлюзовых каналов: OneWeb использует нисходящие каналы 155 МГц и восходящие каналы 250 МГц как в RHCP, так и в LHCP; Starlink использует нисходящие каналы 250 МГц и восходящие каналы 500 МГц, также как в RHCP, так и в LHCP.

Таблица 3

Сравнение распределения полосы пропускания для различных типов каналов связи и различных систем

	User links				Gatewaylinks								TT&C			
	Downlink		Uplink		Downlink		Uplink		Downlink		Uplink		Downlink	Uplink		
	BW _{CH}	# _{CH}	BW _{TOT}	k	BW _{CH}	# _{CH}	BW _{TOT}	k	BW _{CH}	# _{CH}	BW _{TOT}	k	BW _{CH}	# _{CH}	BW _{TOT}	k
Starlink	250	8	2,000	4-5	125	4	500	4-5	250	9	2,250	1	500	8	4,000	1
OneWeb	250	8	2,000	2	125	4	500	2	155	16	2,480	1	250	16	4,000	1
	MHz	-	MHz	-	MHz	-	MHz	-	MHz	-	MHz	-	MHz	-	MHz	-

BW_{CH} : Полоса пропускания канала
Общая пропускная способность

#_{CH}: Число каналов

k: Коэффициент повторного использования частоты

BW_{TOT} :

Система OneWeb имеет изогнутую трубчатую архитектуру, где каждый из 16 каналов нисходящей линии связи пользователя отображается на канал восходящей линии связи шлюза Ка-диапазона, и наоборот для обратного направления. Однако системная архитектура Starlink SpaceX позволяет осуществлять бортовую демодуляцию, маршрутизацию и повторную модуляцию, тем самым эффективно разделяя связи пользователей и шлюзов. Это позволяет: а) использовать различные спектральные эффективности в восходящих и нисходящих каналах связи, максимизируя общую пропускную способность своих спутников; б) динамически распределять ресурсы для пользовательских лучей; в) смягчать помехи путем выбора используемых полос частот. Благодаря этой развязке оценивается, что система Starlink может достичь спектральной эффективности, близкой к 5,5 (бит/с)/Гц в своих шлюзовых каналах, что может привести к повторному использованию частоты в 4-5 раз для пользовательских каналов.

3.3. Характеристики луча излучения

Учитывая различия в полезной нагрузке спутников на борту каждой из систем, лучи на каждом из спутников также имеют значительные различия с точки зрения возможностей, формы и площади покрытия. В таблице 4 приведены сводные характеристики луча для двух систем.

Сравнение характеристик луча двух систем

Userbeam-Downlink			Gatewaybeam-Downlink			Userbeam-Uplink			Gatewaybeams -Uplink		
	Starlink	OneWeb	Starlink	OneWeb		Starlink	OneWeb	Starlink	OneWeb		
#Лучи	>= 8	16	9	16	-	#Лучи	>= 8	16	8	16	-
Управляемый	Yes	No	Yes	Yes	-	Управляемый	Yes	No	Yes	Yes	-
Формируемый	Yes	No	No	No	-	Формируемый	Yes	No	No	No	-
Площадь	2,800	75,000	780	3,100	km ²	Площадь	2,800	75,000	780	3,100	km ²
BW (ПП)	250	250	250	155	MHz	BW (ПП)	125	125	500	250	MHz
EIRP (ЭИИМ)	36.71	34.6	39.44	38	dBW	EIRP (ЭИИМ)	37.1	-	41	-	dB
Maxgain (Макс КУ)	37.1	-	41	-	dB	Maxgain (Макс КУ)	9.8	-1	13.7	11.4	dB/K
Поляризация	RHCP	RHCP	R/LHCP	R/LHCP	-	Поляризация	RHCP	LHCP	R/LHCP	R/LHCP	-

Starlink имеет индивидуально формируемые и управляемые лучи, в отличие от OneWeb, которая имеет только фиксированные лучи. StarlinkSpaceX использует лучи круглой формы, в то время как система OneWeb использует высокоэллиптические лучи. Также стоит обратить внимание на различия с точки зрения площадей, охватываемых каждым спутником и лучами: каждый из лучей OneWeb занимает приблизительно площадь поверхности 75 000 км²; лучи Starlink имеют площадь покрытия ~2800 км².

В данной работе представлено сравнение технической архитектуры двух крупных созвездий спутников OneWeb и Starlink в низкой околоземной орбите для обеспечения глобальной широкополосной связи. После описания архитектуры космического и наземного сегментов для каждой из систем было подробно сравнены некоторые дополнительные аспекты каждого созвездия.

И OneWeb, и Starlink стремятся обеспечить глобальную связь через глобальную спутниковую группировку, соединяющую всех и везде. Это приведет к тому, что общее число проектируемых новых широкополосных спутников составит около 20 000, или же их число может вырасти до 50 000 с дополнительными спутниками SpaceX, причем каждая спутниковая группировка будет предназначена для облучения Земли на одинаковых частотах с использованием одной и той же технологии фазированных решеток. Эксплуатационные расходы Starlink минимальны, учитывая, что они строят спутники внутри компании. Конкуренция между ними жесткая, но SpaceX, похоже, лидирует в гонке с 1318 своими спутниками на низкой околоземной орбите, в то время как OneWeb имеет только 146 из запланированных 648 спутников, вращающихся вокруг Земли.

Список использованных источников

1. WorldVu Satellites Limited, OneWeb Ka-band NGSO constellation FCC filing SAT-LOI-20160428-00041, (2018/09/12).
2. Space Exploration Holdings, LLC, SpaceX Ka-band NGSO constellation FCC filing SAT-LOA-20161115-00118, (2018/09/12).
3. SpaceX. [Application for Fixed Satellite Service by Space Exploration Holdings, LLC SAT-MOD-20190830-00087 / SATMOD2019083000087](#), отчетFCC, (2019/08/30).
4. SpaceX. [Application for Fixed Satellite Service by Space Exploration Holdings, LLC SAT-MOD-20200417-00037 / SATMOD2020041700037](#), отчетFCC, (2020/04/17).