



Кафедра 611Б «Системный анализ и проектирование космических систем»



Современное состояние и перспективы развития аэрокосмической техники

Существующие и перспективные многоспутниковые группировки

**д.т.н., с.н.с. Ключников В.Ю.
(ЦНИИ машиностроения)**

Сравнение низкоорбитальных систем спутниковой связи и систем спутниковой связи на геостационарной орбите

Характеристика системы спутниковой связи	Значение характеристики для систем связи	
	на низкой околоземной орбите	на геостационарной (высокоэллиптической) орбите
Масса КА	< 200 кг	> 5000 кг
Дальность от КА до абонента	от 500 км до 1500 км	36 000 км и более
Минимально допустимый угол места приемной антенны	~ 15°-20° при использовании АФАР	> 50°
Стоимость абонентского терминала	100-300 \$ (?)	> 20 000 \$
Задержка сигнала	20 - 30 мс	> 600 мс
Ослабление сигнала	30 дБ	200 дБ

High Throughput Satellite (HTS) - высокопроизводительный спутник, спутник, производительность которого во много раз превышает производительность традиционных спутников, при одинаковом объеме выделенных спутнику частот. Производительность HTS-спутников достигается за счет:

- повторного использования частот (frequency reuse);
- использования большого набора высокоэнергетичных узконаправленных лучей;
- снижения стоимости передачи бита информации, независимо от спектральной емкости.

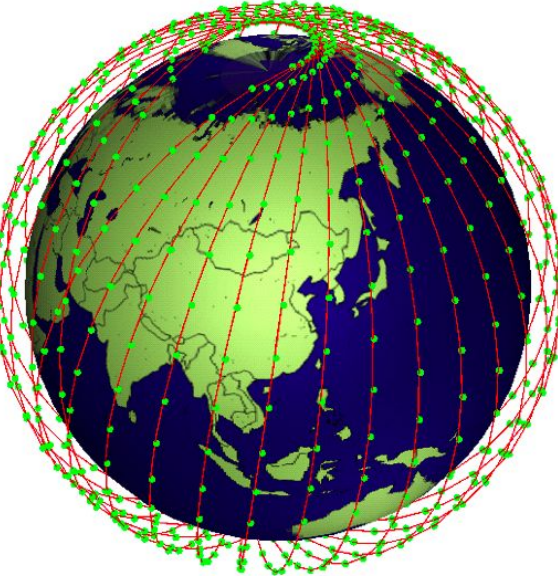
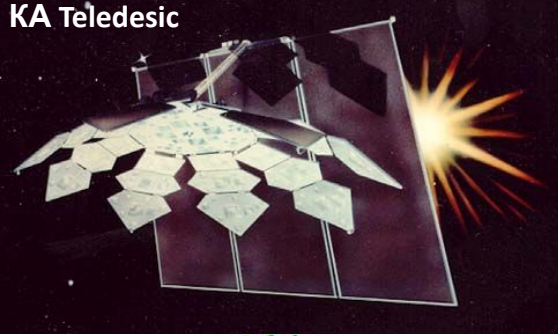
В чем бизнес-идея больших спутниковых группировок на низкой орбите?

- 1) Количество точек стояния спутников на геостационарной орбите (ГСО) ограничено (чтобы спутники не мешали друг другу, они не могут стоять ближе, чем на расстоянии 2°).
- 2) Основной недостаток спутниковой связи с использованием ГСО – спутниковая задержка: сигнал от абонентского терминала до спутника идет не меньше 300 миллисекунд и столько же обратно.
- 3) Большое расстояние от Земли до ГСО сильно ослабляет сигнал и скорость в спутниковом канале: чем ближе спутник к поверхности планеты, тем меньший размер антенны и мощность передатчика можно использовать в абонентском терминале (или при тех же размерах терминала значительно увеличить скорость передачи данных).
- 4) Сигнал с геостационарных спутников не виден на полюсах Земли. Практически связь выше полярного круга при работе с ГСО неэффективна.
- 5) При стремительном развитии интернета и интернета вещей ресурса спутников на ГСО не хватит для всех потенциальных абонентов и необходимо увеличить предложение

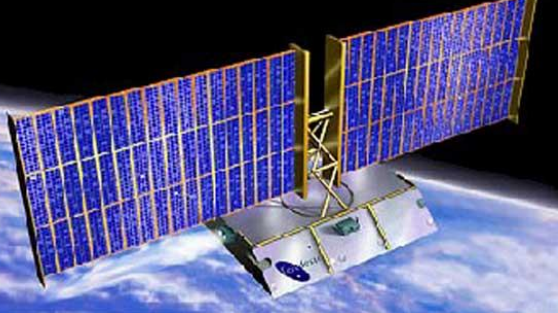


Проект первой широкополосной низкоорбитальной системы спутниковой связи и передачи данных TELEDESIC (США)

KA Teledesic



KA Teledesic T1



Оператор системы	Teledesic Corp. (США)
Зона обслуживания	Глобальная
Число ИСЗ (орбита)	288 (низкая круговая)
Параметры орбиты	$H=1375$ км, $i=98,2^\circ$
Срок службы ИСЗ	10 лет
Мощность солнечных батарей	11,6 кВт
Масса спутника	800 кг
Рабочий диапазон частот (Ka):	прием: 18.8-19.3 ГГц, передача - 28.6-29.1 ГГц
Число лучей	64
Пропускная способность ИСЗ,	13,3 Гбит/с
Межспутниковая радиолиния:	
рабочий диапазон частот	60 ГГц
пропускная способность	1,531 Гбит/с
Стоимость системы	9 млрд. долл.

В рамках системы Teledesic вся земная поверхность условно делится на фиксированные участки (~20 000) размером 160x160 км, каждый из которых в свою очередь состоит из 9 сот. Один спутник может одновременно обслуживать до 64 больших участков (то есть 576 малых) с поддержкой до 128 тыс. базовых каналов на одну соту. Реальное число обслуживаемых участков зависит от положения спутника на орбите. Фактически, он работает с наземными терминалами, попадающими в зону его передающего луча. Каждый спутник сможет обмениваться данными по каналам

межспутниковой связи ISL (Intersatellite Links, ISL) с ближайшими соседями.

удаленных привлечены 10 компаний по всему миру, вложивших суммарно около 4 млрд долл. В феврале 1998 года на ракете-носителе Pegasus-XL был запущен прототип спутника системы Teledesic - Teledesic T1. Однако 01.10.2002 г. работы по созданию спутниковой системы Teledesic были официально приостановлены. **Причины неудачи проекта системы Teledesic:**

- активная экспансия сетей сотовой связи, которая оказалась дешевле, компактнее и доступнее спутниковой;
- отложенный запуск сервиса, не достаточное внимание дилеров к продвижению будущего продукта;
- банкротство аналогичных фирм Iridium (66 спутников) и Globalstar (48 спутников);
- проблемы с дешевым развертыванием спутниковой системы (провал варианта с выведением KA Teledesic на российских конверсионных РН SS-18 по цене 7 млн. долл. за пуск, стоимость спутника – 10 млн. долл.);
- ошибки управления (отсутствие единого мнения внутри управленческого аппарата, финансовая

Оператор системы	Iridium Satellite LLC
Зона обслуживания	Глобальная
Число ИСЗ (орбита)	66 + 6÷7 резервных
Параметры орбиты	H=781 км, i= 86,4° (резервные спутники – на H=650 км), 6 плоскостей
Срок службы ИСЗ	7 лет
Мощность солнечных батарей	1430 Вт
Масса спутника	680 кг
Рабочий диапазон частот:	<p>Телефон — спутник (L-диапазон) 1616 — 1626,5 МГц</p> <p>Спутник — наземная станция (K-диапазон) 19,4 — 19,6 ГГц</p> <p>Наземная станция — спутник (K-диапазон) 29,1 — 29,3 ГГц</p>
Число лучей	48 лучей (6 АФАР по 8 лучей)
Пропускная способность ИСЗ,	Скорость передачи цифрового потока в L-диапазоне при телефонной связи составляет 4800 бит/с, при передаче данных — 2400 бит/с.

Межспутниковая радиолиния:

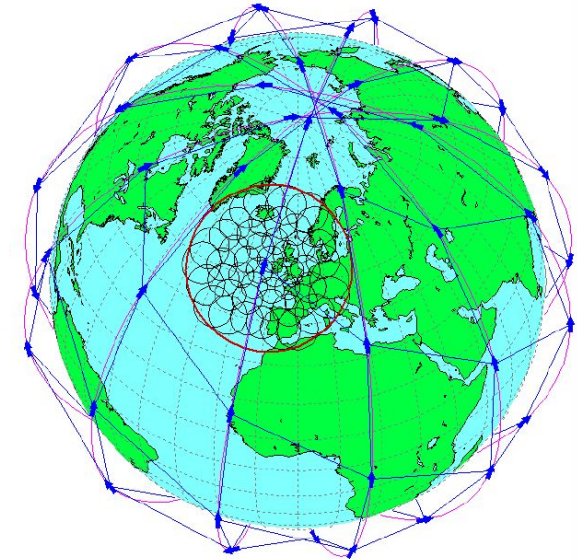
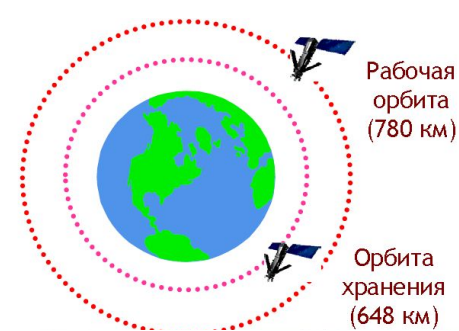
Сегмент управления системой включает три основных элемента: четыре узла телеметрии, слежения и управления (ТТАС), расположенными в Аризоне и на Аляске (США), в Йеллонайфе и Иквалуите (Канада), сеть эксплуатационной поддержки и оперативный центр спутниковой сети (SNOC), расположенный в Вирджинии (США), со шлюзами в Аризоне и на Гавайях.



Спутник Iridium

Система Iridium была введена в эксплуатацию 1 ноября 1998 года. Группировка КА состояла из 66 основных и 6 резервных спутников. Однако через 9 месяцев, - 13 августа 1999 года, - компания Iridium Communications начала процедуру банкротства. Сервис был снова запущен в 2001 году вновь созданной компанией Iridium Satellite LLC, принадлежавшей группе частных инвесторов. Несмотря на оценку спутников, оборудования и собственности Iridium в 6 млрд. долл. инвесторы приобрели компанию за 25 млн. долл.

Сигнал, поступивший с телефонной трубки на ближайший спутник, передается на наземную базовую станцию, которая проверяет право использования услуг системы и вновь направляет сигнал на ближайший спутник Iridium. Сигнал, полученный от наземной базовой станции, по каналам межспутниковой связи передается абоненту, который может находиться в любом месте Земли.



Оператор системы	Iridium Satellite LLC
Зона обслуживания	Глобальная
Число ИСЗ (орбита)	66 + 9 резерв
Параметры орбиты	H=780 км, i= 86,4° , 6 плоскостей
Срок службы ИСЗ	15 лет
Мощность солнечных батарей	2200 Вт
Масса спутника	860 кг
Рабочий диапазон частот:	Телефон — спутник (L-диапазон) 1616 — 1626,5 МГц Наземная станция — спутник (K-диапазон) 29,1 — 29,3 ГГц
Число лучей	48 лучей (6 АФАР по 8 лучей)
Пропускная способность ИСЗ,	До 128 кбит/с для мобильных терминалов и до 1,5 Мбит/с для терминалов класса Iridium Pilot marine (L - диапазон); до 8 Мбит/с для фиксированных/мобильных терминалов (Ka-диапазон)
Межспутниковая радиолиния:	
рабочий диапазон частот	K-диапазон: 23,18 — 23,38 ГГц
пропускная способность	10 Мбит/с
Стоимость системы	2,9 млрд. долл.

Iridium NEXT сохранит существующую «ячеистую» архитектуру орбитальной группы из 66 взаимосвязанных низкоорбитальных спутников, обеспечивая высокое качество передачи голоса и данных на всей поверхности планеты с покрытием океанов, линий воздушного сообщения и полярных широт.

В космосе каждый спутник Iridium NEXT взаимосвязан с 4-мя другими (с 2-мя в той же орбитальной плоскости и 2-мя в соседних плоскостях), образуя при этом единую динамическую ретрансляторную сеть с маршрутизацией трафика между спутниками, которая обеспечивает непрерывность соединения с сетью в любой точке Земли.

Эта **уникальная конфигурация без промежуточного приземления сигнала на наземные станции защищает соединения, делая их не подверженными таким стихийным бедствиям как ураганы, цунами и землетрясения, от которых всегда в первую очередь страдают**



Новые услуги:

- Гибкое использование пропускной способности.
- Передача голосовых данных повышенного качества.
- Услуги спутникового вещания и сетевого сервиса.
- Услуги диапазонов Ka-band.
- Частные сетевые станции сопряжения.
- Новое поколение спутников полностью совместимо со спутниками первого поколения.

- 1 – аппаратура AireonSM (глобальное слежение за воздушными судами)
- 2 – панель солнечной батареи
- 3 – антенна межспутниковой связи (Ka-диапазон)
- 4 – антенна основной нагрузки (L-диапазон)
- 5 антенны фидерного тракта (Ka-диапазон)

Аппараты Iridium NEXT также будут нести дополнительную полезную нагрузку для Aireon, Inc., которая получает данные системы ADS-B (англ. Automatic Dependent Surveillance-Broadcast – автоматическое зависимое наблюдение-вещание, используемое летчиками и авиадиспетчерами для управления воздушным движением) и сервиса FlightAware – для использования авиакомпаниями.

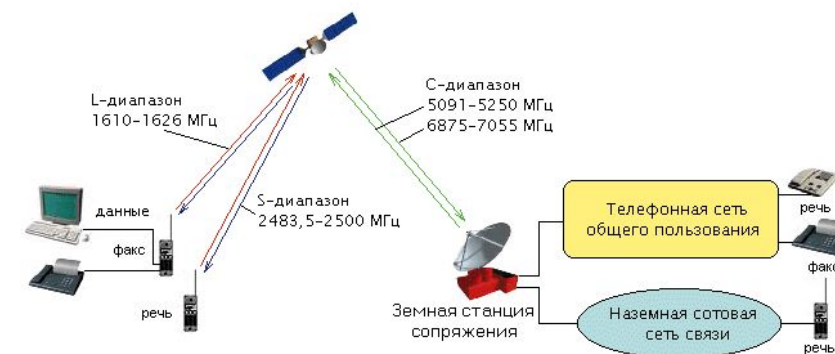
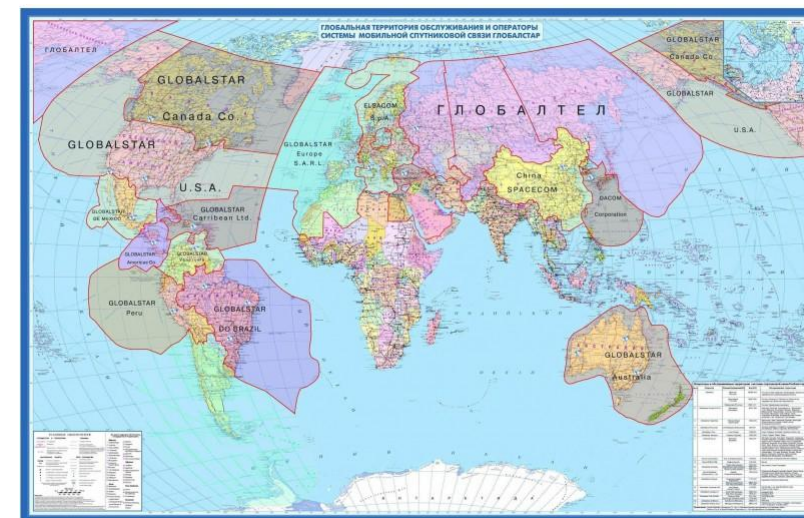
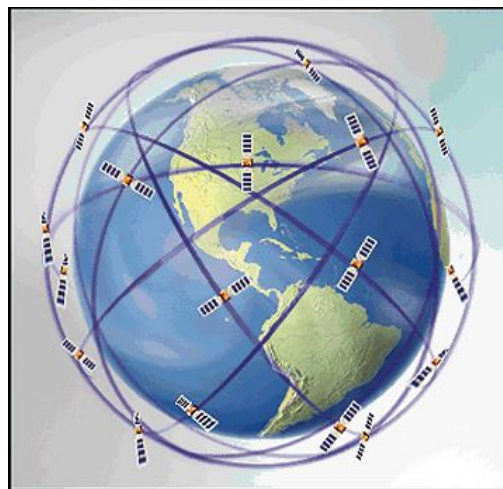
Оператор системы	Globalstar, Inc
Зона обслуживания	Квазиглобальная: 80% поверхности Земли (от 70° N до 70° S).
Число ИСЗ (орбита)	48 + 4 резервных
Параметры орбиты	H= 1414 км, i = 52°, 8 плоскостей
Срок службы ИСЗ	7,5 - 10 лет
Мощность солнечных батарей	1100 Вт
Масса спутника	450 кг
Рабочий диапазон частот:	Прием: 1610,0 — 1626,5 МГц (L- диапазон) и 5091,0 — 5250,0 МГц (S-диапазон). Передача: 2483,5 — 2500,0 МГц (S-диапазон) и 6875,95 — 7052,9 МГц (C - диапазон).
Число лучей	16 лучей
Пропускная способность ИСЗ,	Голосовая связь и низкоскоростной Интернет (9,6 Кб/с).
Задержка сигнала	< 150 мс

Межспутниковая радиолиния:

Связь между спутниками отсутствует

К 2007 г. выявилась проблема деградация усилителя S-диапазона вследствие прохождения спутников через **Бразильскую магнитную аномалию** на высоте орбиты 1414 км

Проект Globalstar был запущен в 1991 году как совместное предприятие корпораций Loral и Qualcomm. 24 марта 1994 года два спонсора объявили о формировании ТОО Globalstar с финансовым участием восьми других компаний, в том числе Alcatel, AirTouch, Deutsche Aerospace, Hyundai и Vodafone. В 2000 г. началась коммерческая эксплуатация 48 спутников и 4 резервных в Северной Америке, Европе и Бразилии. В феврале 2002 г. компании-операторы подали добровольные ходатайства в о банкротстве. После реструктуризации в 2004 г. была образована фирма Globalstar, Inc. В 2007 Globalstar запустила восемь дополнительных запасных спутников первого поколения в космос.



Наземный сегмент включает центр управления наземной сетью (GOCC), центр управления орбитальным сегментом (SOCC), сеть национальных и региональных станций сопряжения. Станции сопряжения являются важнейшей составной частью системы спутниковой связи Globalstar. С помощью них предоставляются надежные телекоммуникационные услуги связи для абонентов по всей зоне обслуживания.

Станции сопряжения осуществляют соединение абонентов через спутники со стационарными и сотовыми сетями телефонной связи. Т.е. они являются пунктами соединения между спутниковой системой связи Globalstar и существующими наземными сетями. Станции сопряжения содержат центры коммутации с базами данных, обеспечивают регистрацию и доступ абонентов к сети.

Группировка коммуникационных спутников O3b (США)

O3b - первая действующая негеостационарная (среднеорбитальная) HTS-система

Оператор системы	SES (O3b Networks)
Зона обслуживания	Зона обслуживания в широтной полосе до 45 град (граничный угол места 20 град)
Число ИСЗ (орбита)	До 16
Параметры орбиты	H= 8063 км, i = 0°,
Срок службы ИСЗ	7,5 - 10 лет
Мощность солнечных батарей	1100 Вт
Масса спутника	700 кг
Рабочий диапазон частот:	Вверх: 27,6 – 29,1 ГГц Вниз 17,8 – 19,3 ГГц (Ka - диапазон).
Число лучей	16 лучей
Пропускная способность ИСЗ,	До 16 Гбит / с на спутник
Задержка сигнала	< 150 мс



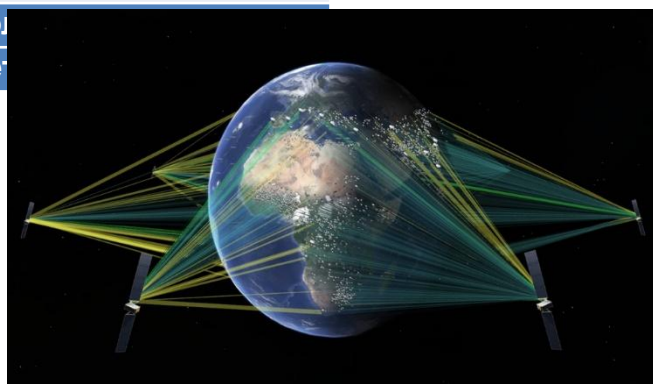
O3b – космическая группировка коммуникационных спутников компании “O3b Networks”, для обеспечения высокоскоростного недорогого доступа в интернет и услуг мобильной связи. Спутники разрабатывались на заказ компанией “Thales Alenia Space”.

В апреле 2016 года O3b Networks продала контрольный пакет акций спутниковому оператору **SES** (Société Européenne des Satellites, Люксембург).

Главное достоинство O3b – малая задержка сигнала по сравнению с геостационарными спутниками (по оценкам экспертов SES до 20% международного рынка передачи данных для систем правительственной, мобильной и корпоративной связи сильно зависит от степени задержки сигнала).

SES планирует нарастить группировку до глобальной системы O3b mPOWER следующего поколения. В сентябре 2017-го компания заключила контракт с американской корпорацией Boeing на строительство первых 7 сверхмощных спутников этой системы. После запуска в 2021-ом они должны покрыть 80 % поверхности Земли. Аппараты обеспечат около 10 терабит общей пропускной способности.

В гарантированную зону радиовидимости (ГЗРВ) группировки (угол места 20 град) входят 7 станций сопряжения



Сравнение орбиты O3b с орбитой ГСО

- в 4.8 раза ближе к Земле по сравнению с ГСО (высота орбиты 8,062 км)
- более низкая стоимость запуска, несколько спутников на один запуск
- на 13 дБ ниже потери распространения по сравнению с ГСО
- улучшение бюджета радиолинии
- в 20 раз ниже требования к мощности по сравнению с ГСО, основываясь на снижении потерь распространения
- меньшие по размеру спутники, меньше вес солнечных панелей, батарей и т.д.
- Задержка менее 150 мс (туда-обратно)
- становятся возможными большее количество услуг и применений
- Использует следящие земные станции
- Предназначены для определенных типов фиксированных и всех подвижных применений

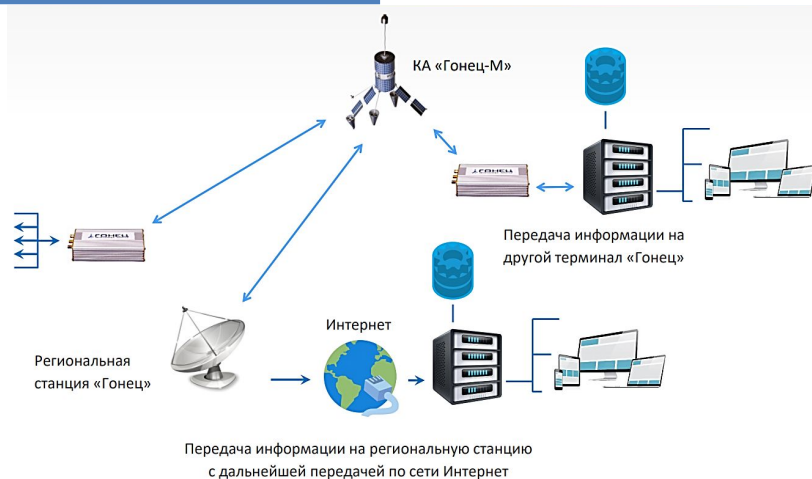
Многофункциональная система персональной спутниковой связи (МСПСС) «Гонец-Д1М»

Оператор системы	АО «Спутниковая система «Гонец»
Зона обслуживания	Глобально
Число ИСЗ (орбита)	24
Параметры орбиты	H= 1350-1500 км, i = 82,5°, 4 плоскости
Срок службы ИСЗ	5 лет
Мощность солнечных батарей	200 Вт
Масса спутника	280 кг
Рабочий диапазон частот:	«Космос – Земля» 387 – 390 МГц «Земля – Космос» 312 – 315 МГц
Число лучей	16 лучей
Скорость передачи данных	«Космос – Земля» 9,6; 38,4; 76,8 кбит/с «Земля – Космос» 2,4; 4,8; 9,6 кбит/с
Объем сообщения	До 500 Кбайт
Межспутниковая радиолиния:	
Связь между спутниками отсутствует	



Назначение системы:

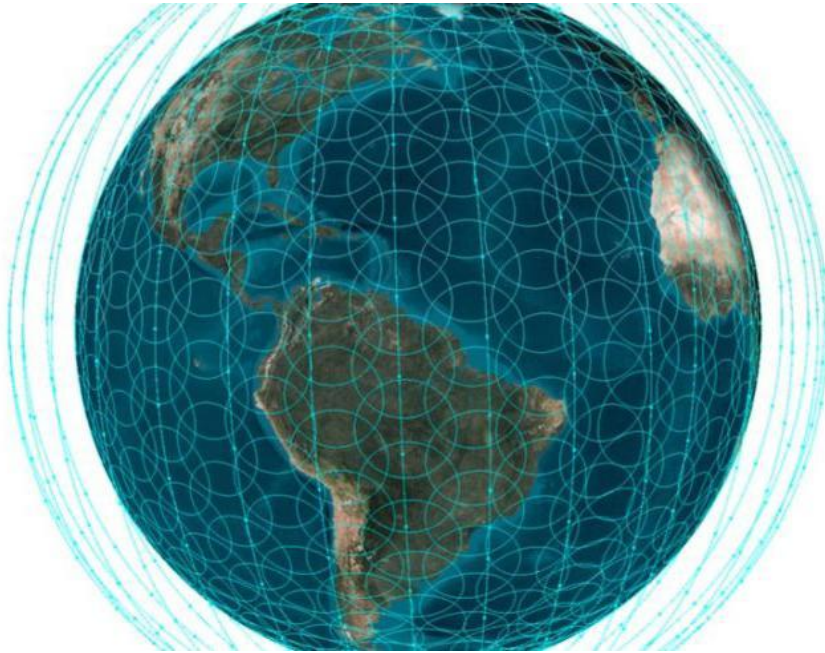
1. Обмен сообщениями в глобальном масштабе
2. Циркулярная передача сообщений группам пользователей
3. Передача данных ГЛОНАСС/GPS местоположения объектов
4. Передача телеметрической информации с контролируемых объектов в центры мониторинга



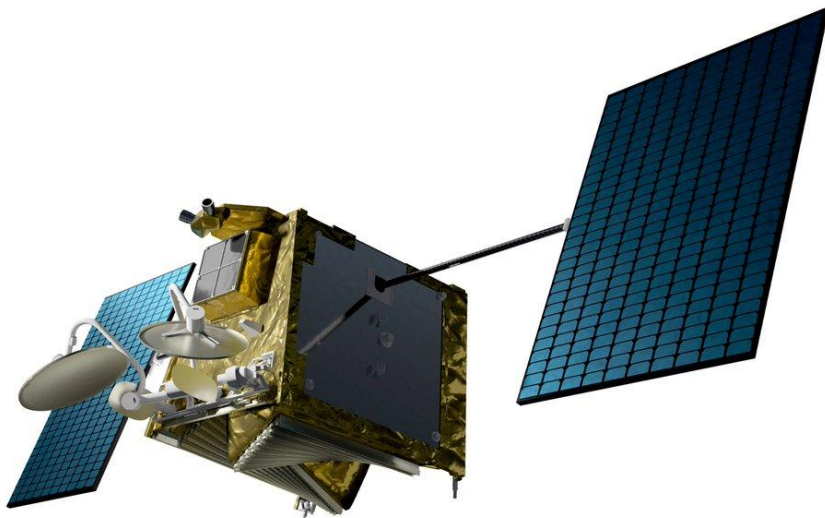
Планы по развертыванию многоспутниковых низкоорбитальных систем космических аппаратов связи

Разработчик	Предлагаемое количество спутников	Срок службы спутника (лет)	Наклонение орбиты, град.	Дата подачи заявки в FCC ⁽¹⁾	Номер заявки в FCC	Дата одобрения заявки FCC	Утвержденное количество спутников
OneWeb LEO	720	7	88	04.28.2016	SAT-LOI-20160428-00041	06.22.2017	720
	1 260	7	88	03.19.2018	Дополнительный запрос из-за изменения правил развертывания.		
OneWeb MEO	1 280	10	45	03.01.2017	SAT-LOI-20170301-00031		
	1 280	10	45	01.04.2018	Дополнительный запрос из-за изменения правил развертывания.		
SpaceX LEO	3 200	5 to 7	53, 54	11.15.2016	SAT-LOA-20161115-00118	3.29.2018	3 200
	1 225	5 to 7	70, 74, 81				1 225
SpaceX VLEO	7 518	5 to 7	42, 48, 53	03.01.2017	SAT-LOA-20170301-00027	11.15.2018	7 518
Boeing LEO	1 948	10	45, 55	06.22.2016	SAT-LOA-20160622-00058		
	1 008	10	88				
Boeing MEO	60	15	63	11.15.2016	SAT-LOA-20161115-00109		
Boeing LEO MEO	132	10	54	03.01.2017	SAT-LOA-20170301-00028		
	15	10	63				
SpaceNorway	2	15	63	11.15.2016	SAT-PDR-20161115-00111	11.03.2017	2
Telesat	45	10	37	11.15.2016	SAT-PDR-20161115-00108	11.03.2017	45
	72	10	99				72
LeoSat	84	10	99	11.15.2016	SAT-PDR-20161115-00112	11.05.2018	78
Viasat	24	20	87	11.15.2016	SAT-PDR-20161115-00120		
Karousel	12	15	63	11.15.2016	SAT-LOA-20161115-00113		
O3b	32	15	0	11.15.2016	SAT-AM D-20161115-00116 SAT-AM D-20171109-00154	06.04.2018	32
	10	15	70				10
Audacy	3	12	25	11.15.2016	SAT-LOA-20161115-00117	06.07.2018	3
Kepler	140	10	90	11.15.2016	SAT-PDR-20161115-00114	11.15.2018	140
Theia Holdings A	120	12	98, 99	11.15.2016	SAT-LOA-20161115-00121		
Astro Digital U.S.	30	15	98	05.08.2017	SAT-LOA-20170508-00071		
Total	20 220						13 045

Широкополосная низкоорбитальная система спутниковой связи и передачи данных OneWEB (Великобритания, ранее- WorldVu)



Изготовитель спутников	Airbus Defense and Space (Тулуза, Франция). После отработки технологии основное производство КА передадут в США
Зона обслуживания	Глобальная
Число ИСЗ (орбита)	720 (низкая круговая)
Параметры орбиты	H=1200 км, i=87° (18 орбитальных плоскостей по 40 КА)
Срок службы ИСЗ	7-10 лет
Мощность солнечных батарей	11,6 кВт
Масса спутника	125-150 кг
Рабочий диапазон частот:	Ку диапазон (10.7-12.7 и 14-14.5 ГГц); Ка диапазон (17.8-18.6, 18.8-19.3 и 27.5-29.1, 29.5-30.0 ГГц)
Число лучей (транспондеров)	16
Пропускная способность ИСЗ,	8,0 Гб
Пропускная способность орбитальной группировки	7,0 Тб
Межспутниковая радиолиния	Нет
Скорости, получаемые абонентом	до 50 Мбит на абонентский терминал
Стоимость системы	5,6 млрд евро



28 февраля 2017 был опубликован сенсационный пресс релиз о предполагаемом слиянии OneWEB и Intelsat – второго спутникового оператора в мире. Слияние пока блокируется советом акционеров Intelsat.

Дата первого запуска тестового ИСЗ: начало 2019 года с десятью тестовыми ИСЗ, собранными на заводе Airbus в Тулузе, на борту ракеты "Союз", стартующей с космодрома Куру.

Широкополосная низкоорбитальная система спутниковой связи и передачи данных LeoSat (США)



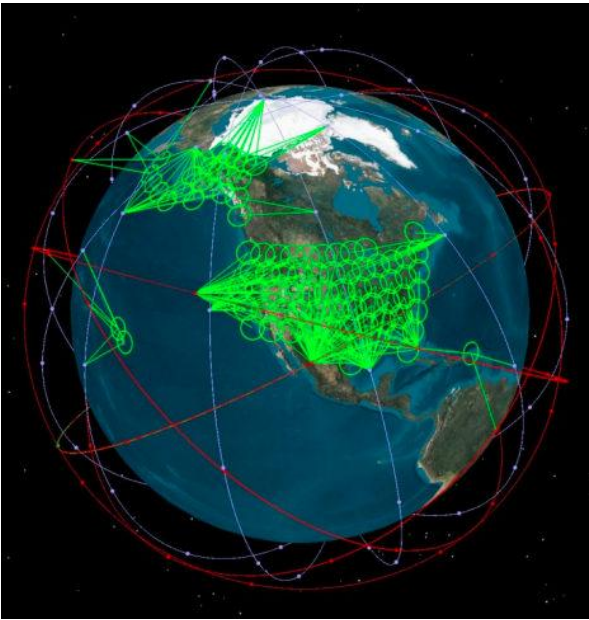
Изготовитель спутников / оператор	Thales Alenia Space (Франция-Испания), LeoSat (США)
Основные инвесторы:	Sky Perfect JSAT (Япония), HISPASAT (Испания)
Зона обслуживания	Глобальная
Число ИСЗ (орбита)	84 (78 рабочих и 6 резервных, в перспективе до 108) в 6 плоскостях на полярной орбите
Параметры орбиты	H=1400 км, i~90°
Срок службы ИСЗ	10 лет
Потребная мощность целевой аппаратуры	2,5 кВт
Масса ИСЗ при запуске	1250 кг
Рабочий диапазон частот:	Ка диапазон (18/30 ГГц)
Межспутниковая радиолиния	Есть: лазерные оптические линки на скоростях до 10 Гбит
Скорости, получаемые абонентом	От 50 Мбит до 1,6 Гбит
Наземная инфраструктура	1 или 2 гейтвея
Антенна для наземного терминала	Плоская фазированная решетка площадью 1 м ² , производитель Phasor. Стоимость - более 10 тыс. долл.
Стоимость системы	3,6 млрд. долл.



Дата первого запуска: 2 тестовых ИСЗ (Early Bird) – 2019 год, развертывание сети с 2021 по 2022 год. По последним данным, по финансовым соображениям запуск тестовых ИСЗ отменен и заменен наземными испытаниями.

LeoSat имеет самую вменяемую бизнес-модель, ориентируется на транснациональные компании (видимо, в первую очередь нефтегазовые) и предлагает им создать корпоративную сеть в космосе, полностью независимую от местных операторов и, в силу минимума гейтвеев и отсутствия точек входа в публичный интернет, максимально кибербезопасную. Для этого LeoSat пошел на очень мощные каналы межспутниковой связи, что сильно усложняет конструкцию ИСЗ. Система сможет обслуживать полярные области – Арктику и Антарктику.

Широкополосная низкоорбитальная система спутниковой связи и передачи данных Telesat LEO (Канада)



Тестовый ИСЗ LEO Vantage 1 (SSTL), массой 168 кг, запущенный 12.01.2018 индийской РН PSLV-XL на орбиту

Изготовитель спутников / оператор	Для первых 2-х тестовых ИСЗ – SSTL (британская дочка Airbus Defence and Space - Airbus), в последующем - Thales Alenia Space (Франция-Италия), MAXAR (Канада-США) / Telesat LEO (Канада)
Основные инвесторы:	Telesat (Канада), Loral Space (США)
Зона обслуживания	ИСЗ на полярной орбите обеспечивают системе глобальное покрытие, а ИСЗ на наклонной орбите ориентированы на регионы, где проживает большая часть населения планеты.
Число ИСЗ (орбита)	117 (72 на полярной орбите на высоте 1000 км и 45 ИСЗ на наклонной 37,40 градусов на высоте 1200 км). Анонсировано расширение до 259 и до 512 ИСЗ
Орбитальное построение системы	6 плоскостей на полярной орбите имеют по 12 ИСЗ каждая. 5 плоскостей на наклонной орбите по 9 ИСЗ.
Параметры орбиты	H=1000 - 1200 км, i~90°, 37,4°
Масса спутника	160-170 кг
Рабочий диапазон частот:	Ка-диапазон (18/30 ГГц)
Межспутниковая радиолиния	Есть
Скорости, получаемые абонентом	Не менее 1 Гбит
Наземная инфраструктура	50 гейтвеев
Антенна для наземного терминала	Планируется использовать параболические антенны диаметром от 65 см и плоские антенные фазированные решетки компании ThinKom (США)

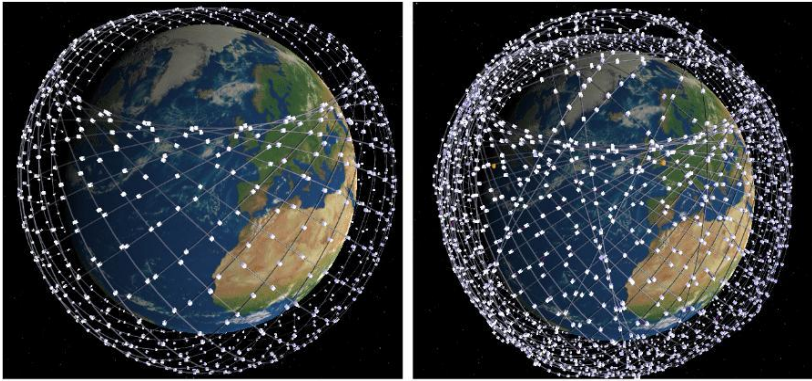
Инженерные решения, используемые в Telesat LEO (на данный момент являются самыми технологически продвинутыми и эффективными: независимый анализ, проведенный учеными MIT (Massachusetts Institute of Technology) показали, что Telesat LEO будет располагать в 4 раза большей пропускной способностью чем система StarLink (Space X) и в 10 раз больше чем OneWEB.

В ноябре 2018 года Telesat выиграл грант в размере 117 млн. долл. от DARPA по созданию разведывательной группировки на основе существующих модулей/платформ связанных низкоорбитальных гражданских ИСЗ (до 90 единиц) путем оснащения их дополнительной целевой нагрузкой. За счет серийности производства гражданских ИСЗ ожидается значительное снижение стоимости разведывательной группировки. Программа получила название **Blackjack**

30 млрд. долл. (?)



Широкополосная низкоорбитальная система спутниковой связи и передачи данных StarLink (США)



Фаза 1

Фаза 2



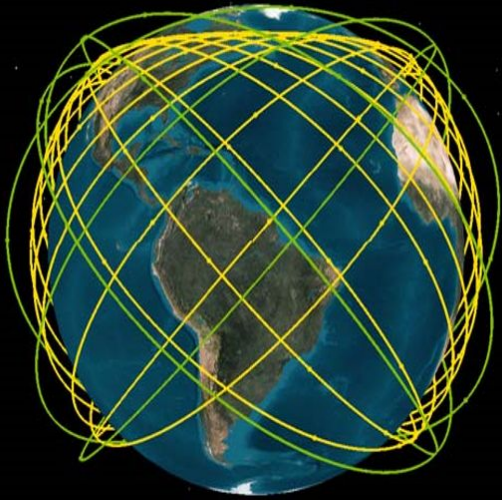
Первые два тестовых спутника – Microsat-2a и Microsat-2b – были успешно запущены 22.02.2018 г. ракетой носителем F9 как попутная нагрузка. Впоследствии они были переименованы в TinTin A и TinTin B.

Цель проекта Starlink — создание дешёвого и высокопроизводительного спутникового интернет-канала связи и технических передатчиков для приёма и передачи сигнала с Земли и орбиты. Разработка проекта началась в 2015 году. В прошлом году были успешно запущены тестовые прототипы спутников. К 2017 году SpaceX представила нормативные документы для запуска в общей сложности почти 12000 спутников на орбиту Земли к середине 2020-х гг. Первичное использование спутников намечено в период 2019-2020 гг.

SpaceX также планирует продавать спутники системы Starlink для исследовательских и научных целей.

Изготовитель спутников	SpaceX (завод в Рэдмонде)
Основные инвесторы:	SpaceX и его акционеры (Google и Fidelity)
Зона обслуживания	В перспективе глобальная, но на первом этапе - без приполярных областей.
Число ИСЗ (орбита)	4425 (первая итерация проекта, ноябрь 2016 г.) 7518 (вторая заявка, март 2017 г.) В настоящее время – 1574 (первая фаза)
Орбитальное построение системы	24 орбитальных плоскости по 66 ИСЗ (первая фаза)
Параметры орбиты	H=550 км, i~ 53° (первая фаза)
Масса ИСЗ при запуске	386 кг (тестовый)
Рабочий диапазон частот:	Ку-диапазон (10.7-12.7 и 14-14.5 ГГц) для передачи сигнала от ИСЗ на абонентский терминал; Ка-диапазон (17.8-19.3 и 27.5-30.0 ГГц) для передачи информации от наземного телепорта (гейтвея) на ИСЗ; V диапазон – на второй фазе проекта
Межспутниковая радиолиния	В первой заявке предполагалась, но в последнем варианте, одобренном FCC в ноябре 2018 для первого этапа, SpaceX от них отказался.
Скорости, получаемые абонентом	Не менее 1 Гбит
Наземная инфраструктура	До 3500 гейтвеев на узлах ВОЛС для подключения к интернету. Станции управления TT&C (tracking, telemetry and commands) параболическими антеннами диаметром 5 м должны быть равномерно распределены по всему земному шару.
Пропускная способность системы	20-21 Тбит и при наличии межспутниковых каналов связи, и 10 Тбит при отсутствии межспутниковых каналов
Количество лучей (транспондеров)	8 в направлении от ИСЗ к гейтвею, 4 - в направлении от гейтвея к ИСЗ
Антенна для наземного терминала	Плоские антенные фазированные решетки
Стоимость системы	10,0 млрд. долл. (по данным СМИ)
Стоимость терминала	От 100 до 300 долл.

Широкополосная низкоорбитальная система спутниковой связи и передачи данных Boeing NGSO (США)



Изготовитель спутников	Boeing
Основные инвесторы:	Boeing, Apple (?)
Зона обслуживания	Глобальная
Число ИСЗ (орбита)	1 этап – 1396, 2 этап - 2956
Орбитальное построение системы	35 круговых орбитальных плоскостей с наклоном 45° и 6 дополнительных круговых орбитальных планов с наклоном 55°
Параметры орбиты	H=1030 - 1082 км, i = 45° и 55° (первая фаза) H= 970 км, i = 88° (вторая фаза)
Рабочий диапазон частот:	V-диапазон: 37,5–42,5 ГГц (космос-Земля) и 47,2– 50,2; 50,4–52,4 ГГц (Земля-космос)



Спутниковый сегмент 5G компании Boeing

Каждый спутник системы будет формировать лучи, соответствующие диаметрам сот от 8 до 11 км на поверхности Земли в пределах общей площади покрытия КА. Системные шлюзы NGSO будут работать в том же V-диапазоне, что и земные терминалы. Эти шлюзы будут использовать как частотную, так и поляризационную селекцию сигналов (с режимами LNCР и RNCР). Кроме того, антенные сайты шлюзов доступа могут содержать более одной антенны, тем самым обеспечивая одновременный доступ к множеству спутников NGSO, видимых со шлюза.



Космическая система ДЗЗ (метео-и АИС) компании Spire Global (МКА

Лемур 1, 2)

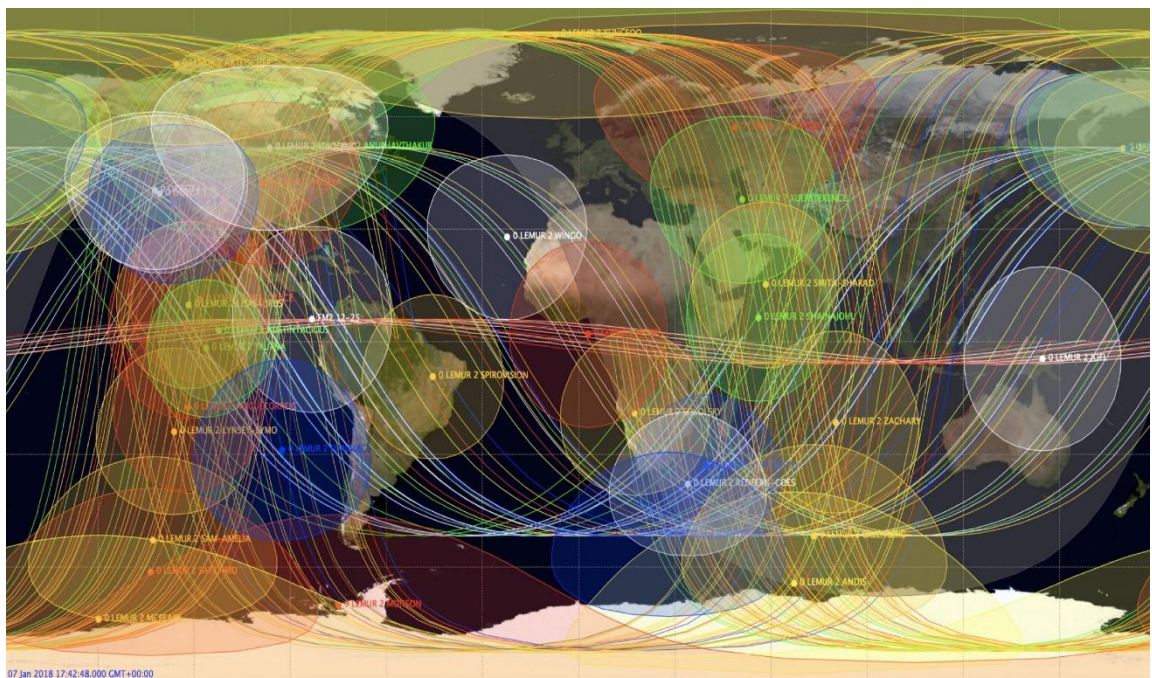
Разработчик	Spire Global Inc., Сан-Франциско, Калифорния, США
Разрешение:	порядка 3...5 м.
Полезная нагрузка	STRATOS - аппаратура GPS-радиозатменного зондирования атмосферы SENSE - аппаратура системы идентификации судов и самолетов (АИС)
Орбиты:	Высота орбиты - 400-600 км Наклонение орбиты - 0°, 51,6°, 83° и 85°
Численность орбитальной группировки	76 (175 наноспутников - в полностью развернутом состоянии)
Способ выведения на орбиту	Попутный запуск с борта МКС и практически на любых доступных ракетах-носителях
Масса	4,6 кг
Габариты (при старте)	34,5 x 10 x 10 см (кубсат 3U)



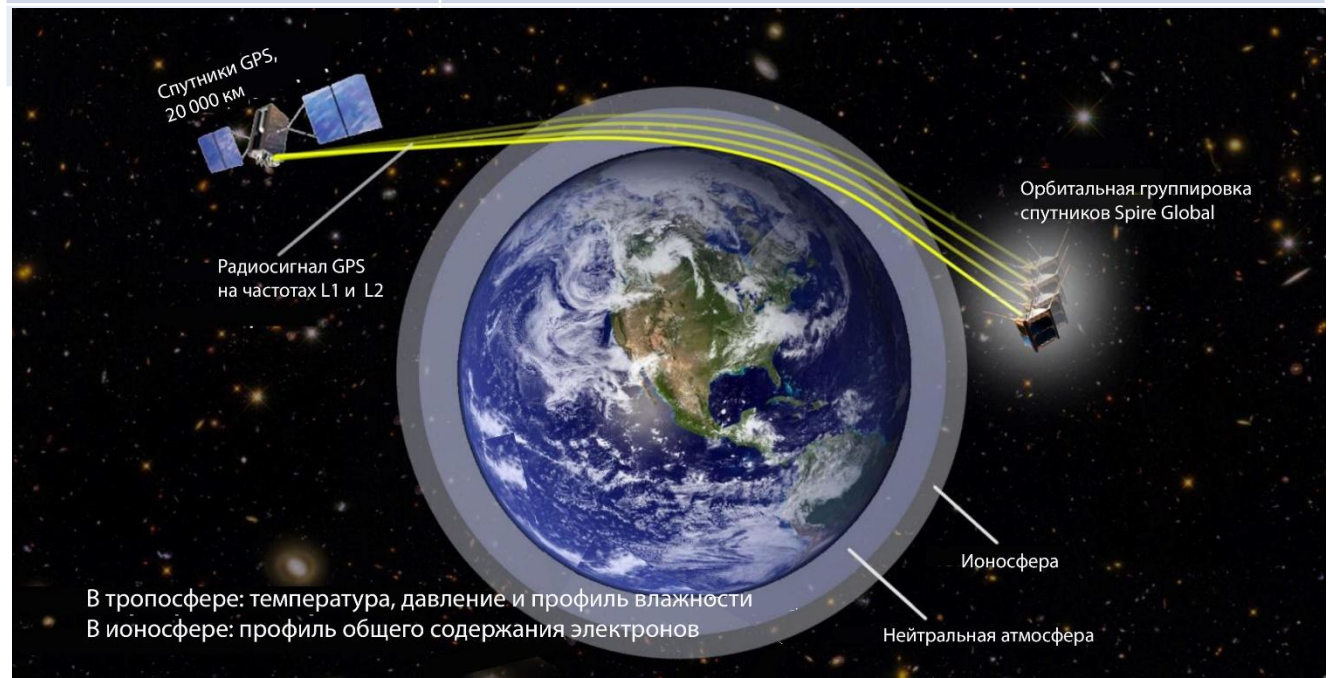
Спутник Lemur-2



Группировка спутников Spire на 10 января 2019 г.



28 наземных станций Spire



Принцип радиозатменного зондирования атмосферы

Космическая система ДЗЗ компании Planet (МКА Flock-1,2,3,4)



170 спутников расположены на орбите равномерно таким образом, чтобы обеспечить непрерывную съемку поверхности Земли



Сеть земных станций

Разработчик:	Planet, Сан-Франциско, Калифорния, США.
Разрешение:	порядка 3...5 м.
Ширина полосы захвата	20 км
Орбиты:	а) орбита МКС, б) солнечно-синхронная, высотой порядка 600 км
Численность орбитальной группировки	170 наноспутников
Способ выведение на орбиту	попутный запуск практически на любых доступных ракетах-носителях
Масса	5...6 кг
Габариты (при старте)	32 x 10 x 10 см (кубсат 3U)
Срок активного существования	3 года (оценка)

Радиолиния передачи целевой информации работает в X-диапазоне (8025-8400 МГц, линия «космос-Земля», 2 канала по 66,8 МГц) со скоростью от 12,5 до 120 Мбит/с. Высокочастотная мощность передатчика составляет 2 Вт. Микрополосковая антенна установлена на обратной стороне откидывающейся крышки телескопа. Возможно использование манипуляций: QPSK, 8-PSK, 16-APSK, 32-APSK. Виды помехоустойчивого кодирования: от 1/4 до 9/10.



Наземный комплекс управления совмещен со специальным комплексом: на 12 площадках развернуты 36 антенн, что позволяет уже сейчас принимать 1 Терабайт данных в сутки (или 1 млн. км.² земной поверхности)

Земная станция S/X-диапазона в Brewster, шт. Вашингтон



Разные антенны на одной площадке



Ценовые проблемы перспективных низкоорбитальных систем передачи данных

Основные элементы спутниковой системы	Заявленная цена	Способ достижения заявленных ценовых показателей
Стоимость производства спутника	500 тыс. долл. и ниже	Создание завода для серийного производства спутников
Стоимость абонентского терминала Проблемы:	100–300 долл. для системы SpaceX 250 долл. для системы OneWeb	Серийное производство фазированных антенных решеток для абонентских терминалов

1. Большое количество спутников в системе определяет уровень начальных инвестиций, - не менее 3 млрд. долл. Но скорее всего инвестиции в создание орбитальной группировки и наземное оборудование должны будут превышены в несколько раз (именно так и произошло при создании более простых систем Iridium (77 спутников) и Globalstar (52 спутника); конечные инвестиции в эти системы превзошли плановые в 6-7 раз).

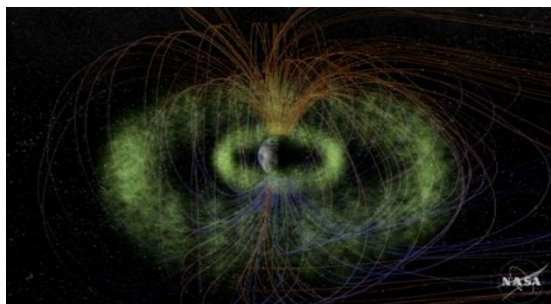
2. Себестоимость антенной системы абонентского терминала (результаты анализа):

- для системы OneWeb - 7700 долл. (ФАР передающая 18x18см, АФАР приемная 36x36 см);
- для системы SpaceX - 750 долл. (ФАР передающая 13x13 см, АФАР приемная 22x22 см).

Заявленная стоимость абонентского терминала 100–300 долл. недостижима в обозримой перспективе. Компания Kymeta разрабатывает антенны типа ФАР с электронным управлением лучом, цена которой для приемо-передающего режима не менее 2 тыс. долл. (1 тыс. долл. за антенну).

Проблема техногенного загрязнения околоземного космического пространства

Выбор орбит для низкоорбитальных спутниковых систем передачи данных



Внутренний (протонный) радиационный пояс - в области орбит высотой от 2 до 6,5 тыс. Внешний (электронный) пояс - в области высот примерно от 13 до 42 тыс. км. На высотах от 19 до 22 тыс. км формируется третий пояс.

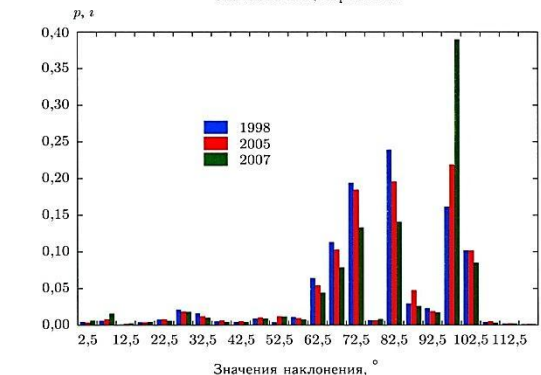
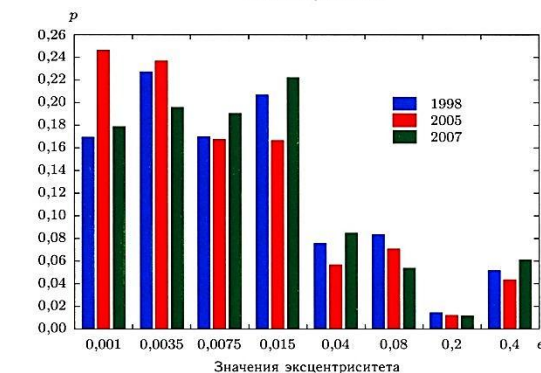
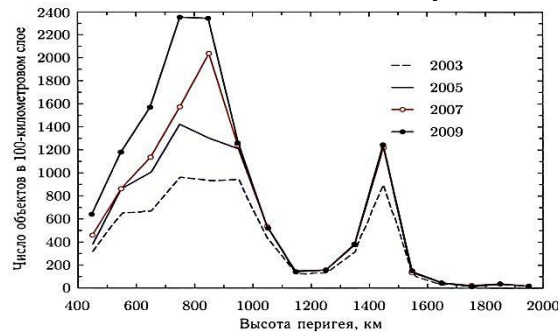
Рабочие высоты низкоорбитальных спутниковых систем связи лежат в диапазоне от 700 км до примерно 1600 км. Нижнее значение ограничено торможением в остаточной атмосфере, верхнее - радиационными поясами.



Времена пассивного баллистического существования малых космических аппаратов:

- 1 - Globalstar; 2 - Гонец; 3 - KitSAT-1, S80/T; 4 - Badr B, Maroc Tubsat; 5 - ITAMSAT, TEMISAT (проекты); 6 - Orbcomm; 7 - Picosats; 8 - PoSAT, VoSAT, KitSAT-2

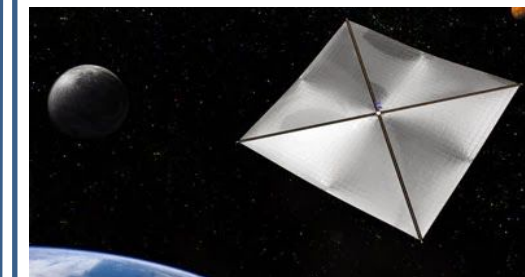
Оценка засоренности низких орбит



Из распределения высот перигея видно, что число КО наиболее интенсивно увеличивалось в диапазоне высот 600-900 км. В высотном слое от 700 до 900 км число каталогизированных КО выросло за 6 лет в 2,5 раза.



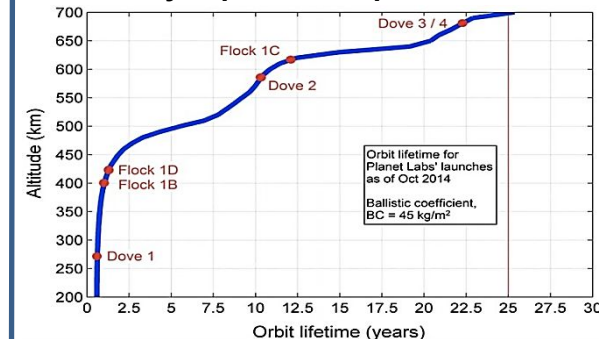
Многие учёные считают, что в некоторых орбитальных областях и для некоторых классов космического мусора (например, на высотах 900–1000 км и 1500 км) начался каскадный эффект (эффект Д.Косслера)



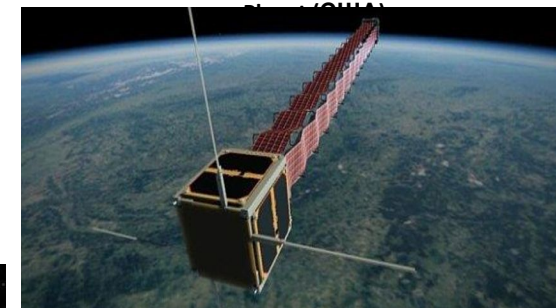
Солнечный парус безопасности для увода МКА NanoSail-D2, прекративших активное существование, с рабочей орбиты (ЕКА)

Закончившие активное функционирование низкоорбитальные объекты должны быть уведены на орбиту с расчетной продолжительностью пассивного баллистического существования не более 25 лет (Рекомендации МККМ), ГОСТ ГОСТ Р 52925-2018).

Пути решения проблемы



Срок пассивного существования КА Flock и Dove, созданных и запущенных компанией Planet Labs



МКА PW-Sat с атмосферным парусом, напоминающем гравитационную штангу (Польша)

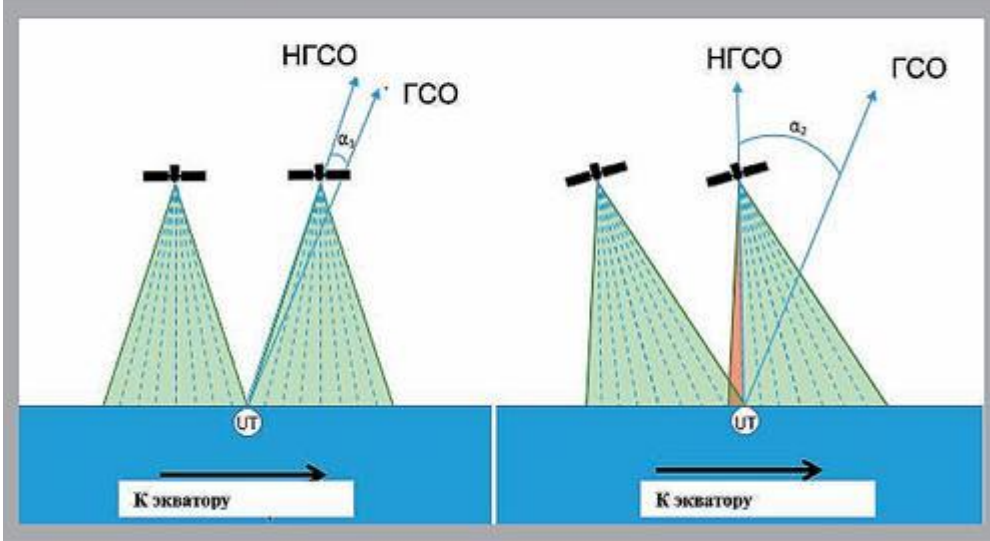


Аэродинамическое устройство увода КА с рабочей орбиты по технологии Gossamer Orbit Lowering Device (США): а - уводимый с орбиты космический аппарат; б - надувной баллон.

Проблема электромагнитной совместимости низкоорбитальных систем спутниковой связи с системами спутниковой связи на геостационарной и высокоэллиптических орбитах (по В.Р.Анпилову)

Низкоорбитальные спутники связи и передачи данных создадут помехи для земных станций (выше норм, определенных в регламенте радиосвязи). Особо значима эта проблема в диапазоне частот Ku (12,5-18 ГГц).

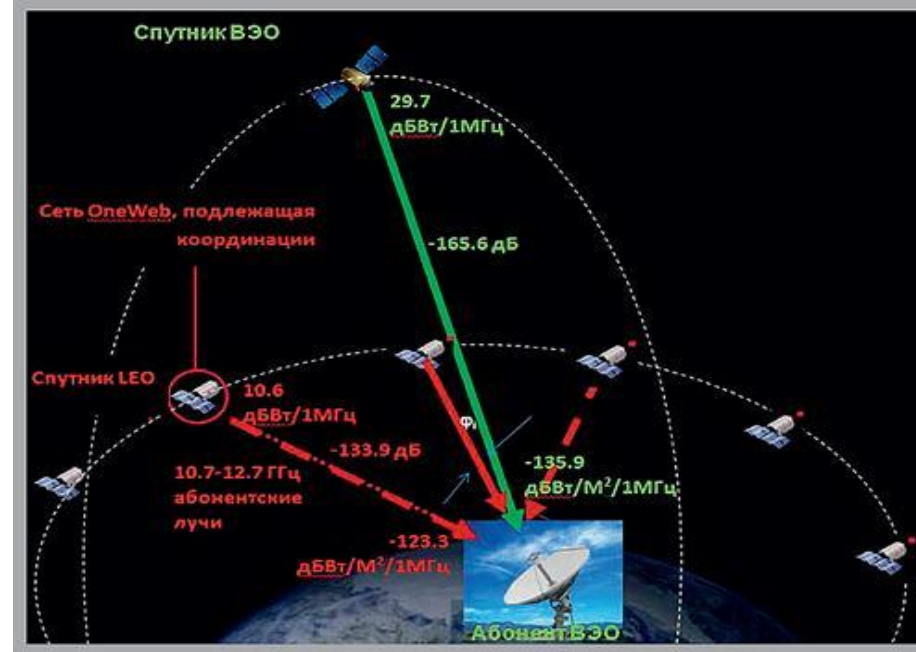
Проблема ЭМС для систем на



Способ решения проблемы

Компания OneWeb предложила решить эту задачу путем подворота спутников по тангажу в период их пролета в экваториальной зоне. До момента подлета спутника к экваториальной зоне КА переориентируется по тангажу примерно на 10 град. с целью обеспечения необходимого угла α . После пролета экватора спутники подворачиваются по тангажу в противоположную сторону. В момент пересечения плоскости экватора все лучи спутника выключаются. Однако операторы геостационарных систем не согласились с этим решением компании OneWeb.

Проблема ЭМС для систем на



Результат оценки уровня помехи в Ku-диапазоне, создаваемой спутником OneWeb, для земных станций приема информации со спутника на орбите типа «Тундра»

Помеха даже от одного спутника OneWeb на 12,6 дБ превышает уровень принимаемого сигнала: $I/C = +12,6$ дБ. В таких условиях прием информации со спутника ВЭО невозможен.

Для обеспечения приема следует снизить помеху примерно на 22 дБ: $I/C < -10$ дБ. Это достигается, если угол между осевым излучением луча OneWeb и направлением на приемную станцию (антенна 0,4 м) спутника ВЭО будут более 6 град., т.е. $\theta_i > 6$ град. Однако из-за большого числа спутников выполнить это условие в любой момент времени невозможно.

Проблема ЭМС между собственными спутниками на НОО не имеет

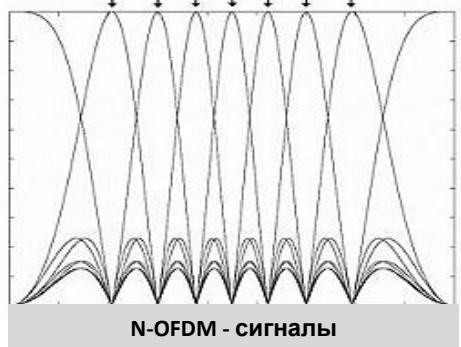
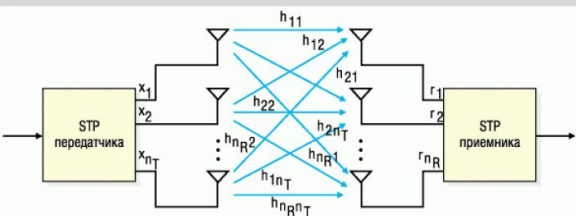
Проблема электромагнитной безопасности низкоорбитальных группировок космических аппаратов передачи данных, использующих стандарт 5G

Частотные диапазоны в 5G



Ключевые технологии для реализации сетей сотовой связи

Блок-схема системы MIMO



1. Технология Massive MIMO (Massive Multiple-Input-Multiple-Output) – метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала и скорость передачи трафика. Для передачи данных используются две и более цифровые антенные решетки и такое же количество антенных решеток для приёма. Передающие и приёмные антенны размещены настолько, чтобы достичь минимального взаимного влияния друг на друга между соседними антеннами.

3. Технология N-OFDM - вид частотного мультиплексирования (Non-Orthogonal Frequency Division Multiplexing - неортогональное мультиплексирование с разделением частот). Отсутствие жесткой привязки частот поднесущих к максимумам АЧХ синтезированных с помощью БПФ частотных фильтров создает предпосылки для повышения помехозащищенности радиолиний

2. Технология beamforming - автоматическое формирование луча диаграммы направленности в сторону абонента

Технология 5G предполагает использование крайне высокочастотного, сложно модулированного сигнала частотой до 90 ГГц, цифровые антенные фазированные решетки и более плотную сеть базовых станций (с частотой 200-300 метров). Реализация сетей 5G означает постоянное воздействие КВЧ-излучений на человека.

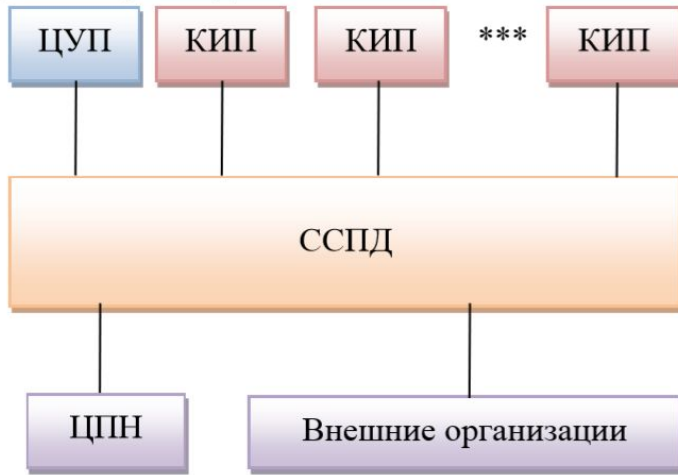
№ пп	Частота, ГГц	Результат исследований	Пояснения
1		Электросмог	Постоянная насыщенность зоны обитания КВЧ и СВЧ полями
2	60	Влияние на кожу. Физическая боль, кожные заболевания, рак	Более 90% передаваемой мощности поглощается в слое эпидермиса
3	60	Влияние на глаза	Повреждение хрусталика и сетчатки
4	53-78	Влияние на сердце	Аритмия
5	42	Эффекты иммунной системы	Нарушение неспецифического иммунитета
6		Влияние на скорость роста клеток E-coli и других бактерий	Подавление роста
7		Влияние на устойчивость патогенных микроорганизмов к антибиотикам	Комбинация КВЧ-излучений и антибиотиков приводит к резистентности патогенов по отношению к антибиотикам
8		Влияние на растения	Симптомы некроза листьев растений. Признаки того, что 5G для растений более опасен, чем для человека
9		Вредное воздействие на окружающую среду космических запусков	Количество пусков ракет, загрязняющих окружающую среду и разрушающих озон, резко увеличится
10		Нарушение состояния естественных экосистем	Сокращение популяции пчел. Поражение, нарушение путей миграции и местообитаний птиц

указывает на специфическую особенность взаимодействия живых систем с излучением миллиметрового диапазона и глубинную природу данного явления. Однако до настоящего времени не сформирована общепринятая научная точка зрения на физическую природу механизма взаимодействия КВЧ-излучения с биологическими объектами.

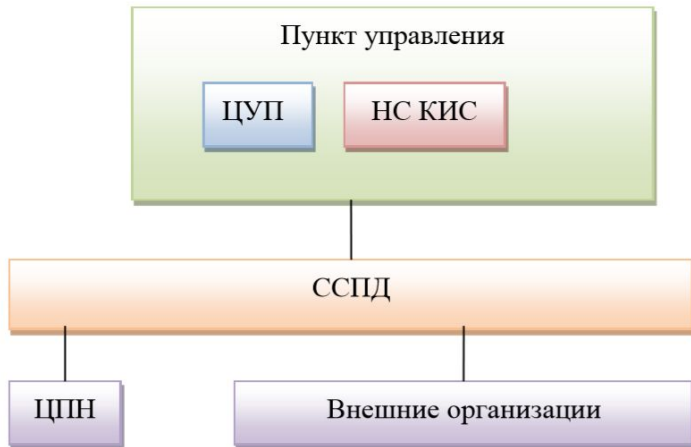
В 2011 году Международное агентство по изучению рака, входящее во Всемирную организацию здравоохранения, классифицировало радиочастотное излучение как потенциальный канцероген.

Международное общество «Врачи за охрану окружающей среды» и его отделения в 27 странах призывают остановить развитие сетей 5G с их радиочастотным излучением. Медики называют 5-е поколение сотовых технологий грандиозным экспериментом над здоровьем человека.

Проблема управления большой орбитальной группировкой космических аппаратов



Структурная схема многопунктных НКУ

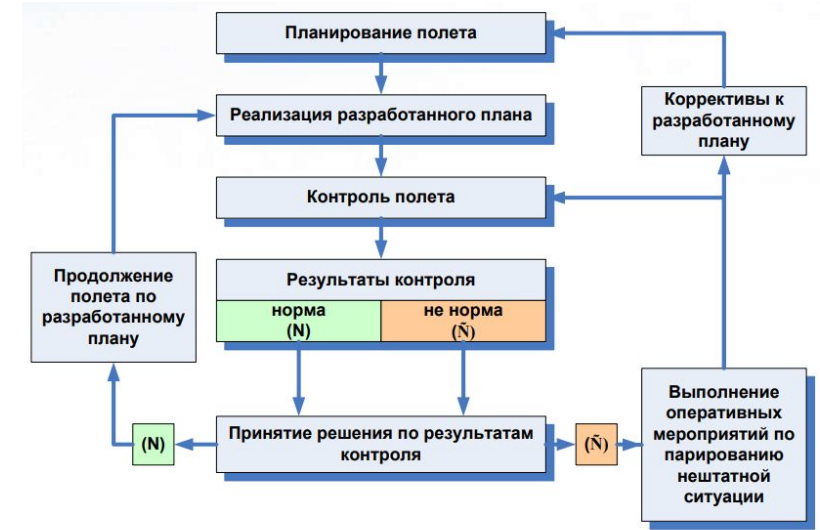


Структурная схема однопунктного НКУ

Функциональные задачи наземного контура управления:

- 1. Автономно решаемые задачи:**
 - непрерывный телеметрический и обобщенный тестовый контроль БКУ и функционирования бортовых систем;
 - непрерывный контроль решения навигационных задач на борту по информации контрольных станций и функционирования навигационно-временного комплекса;
 - метрологическое обеспечение согласования единиц измерения в системе;
 - вычисление положения земной системы координат и относительной спутниковой;
 - моделирование функционирования бортовых систем, подготовка программных решений целевых задач.
- 2. Неавтономно решаемые задачи:**
 - поиск неисправностей и восстановление бортовых комплексов;
 - целевое программирование бортовых систем;
 - совмещение решения целевых задач и задач управления;
 - закладка новых программ и новых алгоритмов управления.

КИП - командно-измерительный пункт
 ССПД - система связи и передачи данных
 ЦПН - центр планирования наблюдений
 НС - наземная станция
 КИС - командно-измерительная система



Управление полетом КА

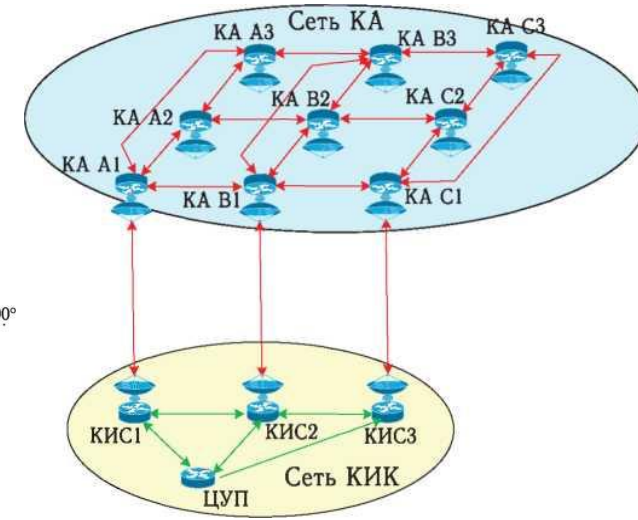
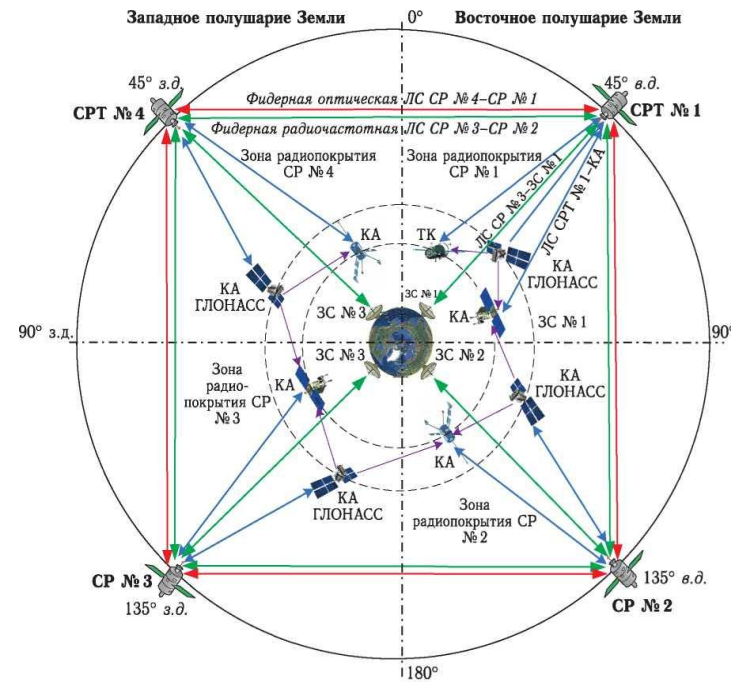
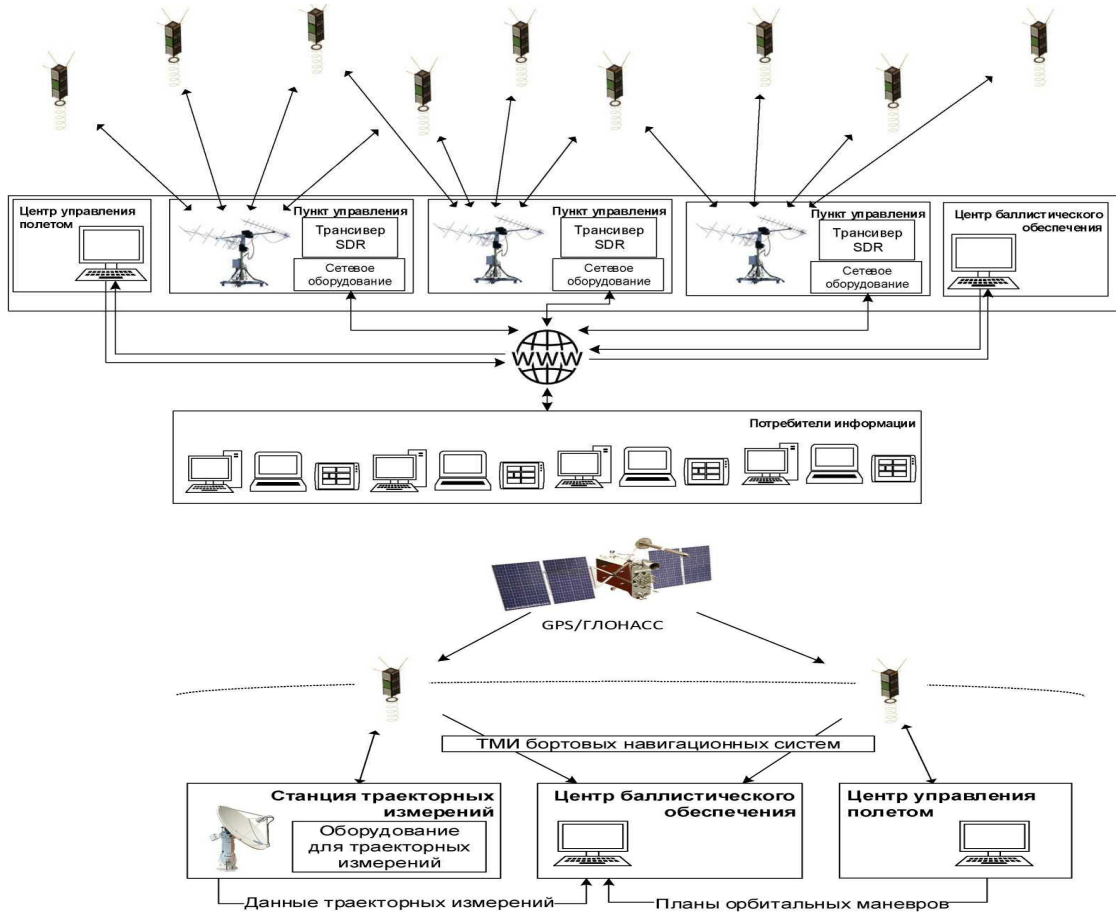
Командно-программное управление КА – это реализация запланированных операций КА наземным комплексом управления с использованием командной радиолинии и бортового комплекса управления КА. Под операциями в данном случае нужно понимать совокупность управляющих воздействий на КА, «объединённых единым замыслом и направленных на достижение заданной цели».



Обобщенная схема радиотехнической приемно-передающей системы

Проблема управления большой орбитальной группировкой космических аппаратов

Проблема управления крупномасштабными группировками космических аппаратов (>100) не решена !



Орбитальный сегмент схемы организации связи с КА через 4 геостационарных спутника-ретранслятора

Сетевая архитектура сети управления полетом орбитальной группировки

Концепция создания орбитальных группировок, КА которых связаны межспутниковыми радиолиниями, позволит управлять всей орбитальной группировкой в режиме квазиреального времени. Таким образом, орбитальная группировка будет представлять собой цифровую сеть передачи данных, каждый КА которой будет выступать в роли спутника-ретранслятора для передачи информации управления на любые КА, а также в роли объекта управления.

Наземный комплекс управления:

- Единая сеть спутниковых станций
- Информационная инфраструктура обеспечения коллективного доступа к управлению и целевой информации

Баллистический центр – задачи:

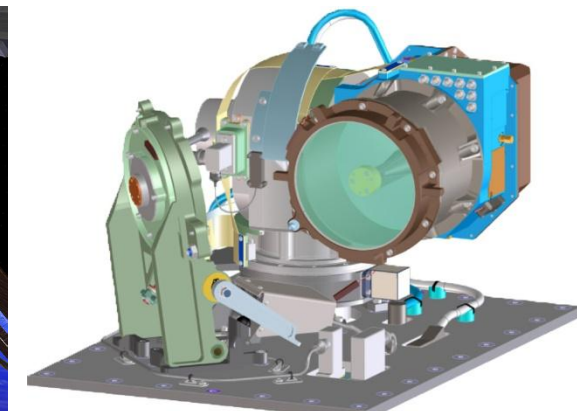
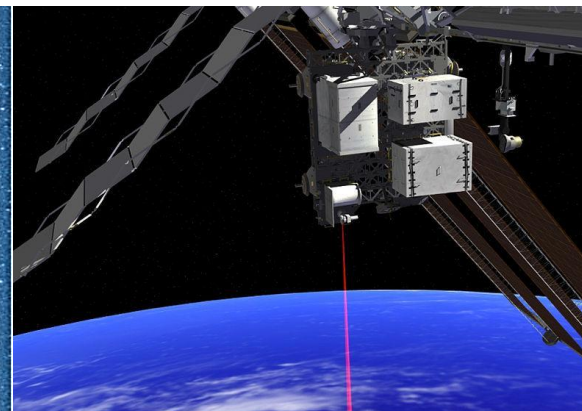
- Одновременное обслуживание большого числа спутников
- Унифицированный управляемый доступ к спутникам большого количества пользователей
- Баллистическая координация спутников

Перспективная наземная инфраструктура управления многоспутниковой орбитальной группировкой на основе использования интернет-портала с защищенными каналами удаленного доступа (предложения АО «РТИ»)

Управление полетом космических аппаратов одной орбитальной группировки с применением межспутниковых радиолиний (предложения АО «РКС»)

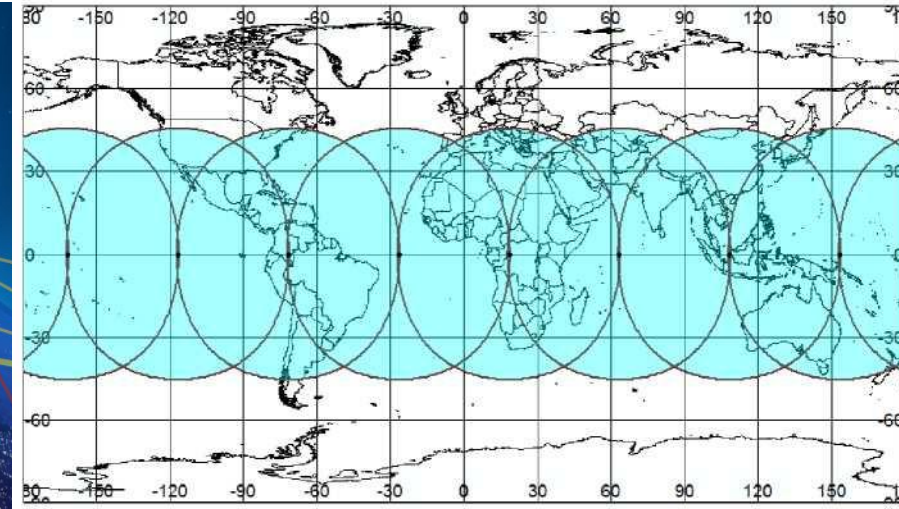
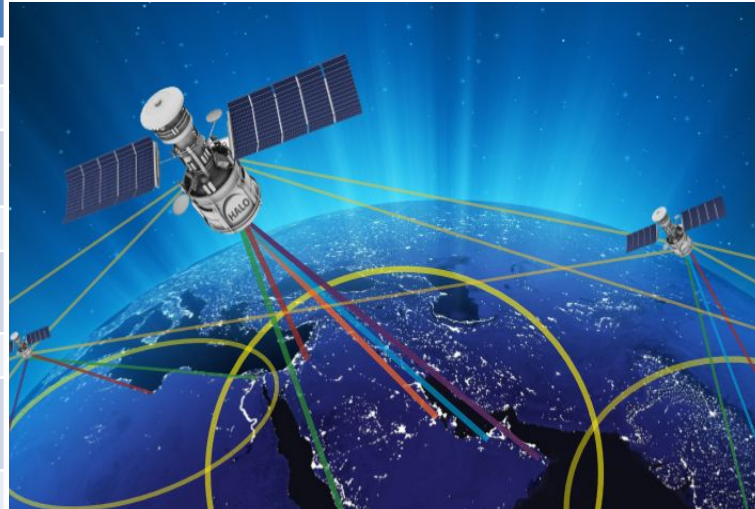
Лазерные спутниковые системы передачи данных

Проект	Концепция проекта	Среда	Сценарий передачи данных	Скорость передачи данных	Разработчик	Статус
Европейская система передачи данных (European Data Relay System, - EDRS)	Передача данных на спутники GEO со спутников наблюдения Земли LEO и для разведывательных, наблюдательных и разведывательных миссий	GCO, HOO	Космос-космос	1.8 Гбит/с	Tesat-Spacecom	Экспл.
Лазерная связь (Laser Light Communications)	Спутниковая группировка для глобальных телекоммуникаций, создающая оптическую магистраль передачи данных в космосе	Средняя орбита	Космос-космос, космос-Земля	100 Гбит/с	Ball Aerospace & Technologies	Создание
BridgeSat	Прямая передача данных дистанционного зондирования с низкой орбиты на Землю	HOO	Космос-Земля	1 Гбит/с	Surrey Satellite Technology	Создание
Cloud Constellation	Безопасное хранение данных на спутниках и безопасные межспутниковые соединения	HOO	Космос-космос			Создание
LeoSat	Большая спутниковая группировка для глобальных телекоммуникаций	HOO	Космос-космос		Thales Alenia Space	Создание
SpaceX Starlink	Большая спутниковая группировка для глобальных телекоммуникаций	HOO	Космос-космос			Создание
Telesat LEO constellation	Большая спутниковая группировка для глобальных телекоммуникаций	HOO	Космос-космос			Создание
Analytical Space	Космическая гибридная радиочастотная / оптическая сеть ретрансляции данных спутников наблюдения Земли	HOO	Космос-Земля			Создание
Google Loon	Телекоммуникации для сельских и отдаленных районов на основе сети стратосферных аэростатов	Стратосфера	Воздух-воздух	0,155 Гбит/с		Создание
Facebook Aquila	Телекоммуникации для сельских и отдаленных районов на основе сети стратосферных платформ	Стратосфера	Воздух-воздух, Воздух-земля	10 Гбит/с	Mynaric	Создание
Airborne Wireless Network	Телекоммуникации и развлечения в полете, предоставляемые сетью коммерческих самолетов	Тропосфера	Воздух-воздух	10 Гбит/с	Mynaric	Создание



Первая система спутниковой лазерной связи Laser Light

Оператор системы	Iridium Satellite LLC
Зона обслуживания	Глобальная
Число ИСЗ (орбита)	8-12
Параметры орбиты	H=8050 км, $i=0^\circ$, 1 плоскость
Срок службы ИСЗ	15 лет
Мощность солнечных батарей	? Вт
Масса спутника	? Кг
Рабочий диапазон частот:	191.6 - 196.5 ТГц (1525-1565 нм)
Число линий	72 лазерных абонентских линии на скоростях до 100..200 Гбит/с (вверх и вниз)
Пропускная способность системы	6 Тбит/с
Межспутниковая связь:	
Лазерная, 48 межспутниковых лазерных линий	
пропускная способность	200 Гбит/с (для одной линии)

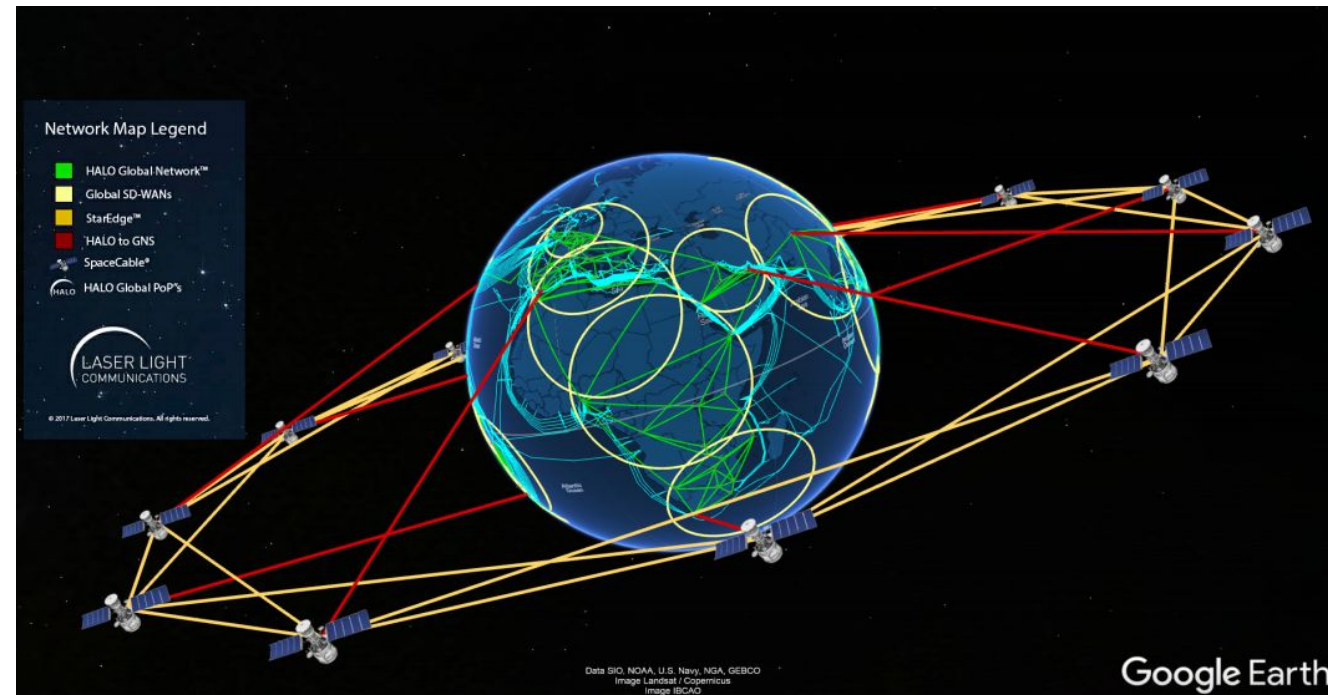


Мгновенная зона видимости системы (угол места=20 град)

В 2014г фирма Laser Light Communication сообщила о начале работ по созданию полностью оптической космической системы связи, включающей в себя от 8 до 12 КА, расположенных на экваториальной орбите высотой 10000км. Скорость передачи информации в системе - 200Гбит/с, как между КА, так и между КА и наземными пунктами. Вывод первых КА должен состояться в 2019-2021 гг.

Характеристики наземного сегмента:

- число шлюзовых станций: 48 - 96;
- интеграция спутниковой и наземной лазерной сети;
- доступность канала - от 20% до 99% в зависимости от местности и числа станций сопряжения.



Структура ОГ системы Laser



Спасибо за внимание!

