



**Спутниковые системы ШПД –
текущая ситуация и ближайшие перспективы**

Андрей Гриценко

Генеральный директор, к.т.н.

**XV Международный навигационный форум и конгресс «СФЕРА»
26 апреля 2022 г
Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»**



Системы ШПД на НГСО

1. Требования к системе:

- а) максимально возможная скорость передачи данных на абонентской линии на участке «вниз»;
- б) требуемая надежность абонентской линии по радиоклиматическим факторам 99.5% ... 99.9%;
- в) минимальный угол места АЗС > 25°;
- г) территория обслуживания (региональная, почти глобальная, глобальная);
- д) минимально возможное время задержки сигнала (при необх.)

2. Требования к орбитальной группировке (ОГ):

- а) равномерное n-кратное покрытие территории обслуживания;
- б) максимальный коэффициент использования бортов (КА);
- в) минимизация числа спутников в составе ОГ;
- г) минимизация потребного числа РН для развертывания ОГ.

3. Требования к космическому аппарату (КА):

- а) минимизация массово-габаритных характеристик;
- б) возможность увеличения пропускной способности системы путем простого наращивания мощности ОГ.

4. Требования к абонентской ЗС (АЗС):

- а) простота и компактность;
- б) относительно низкая стоимость.

Ограничения на угол места: а) обеспечение максимума ППМ

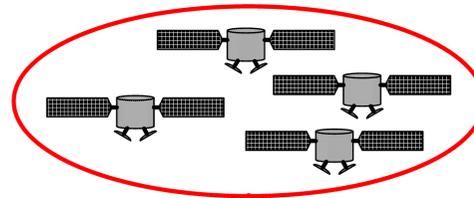
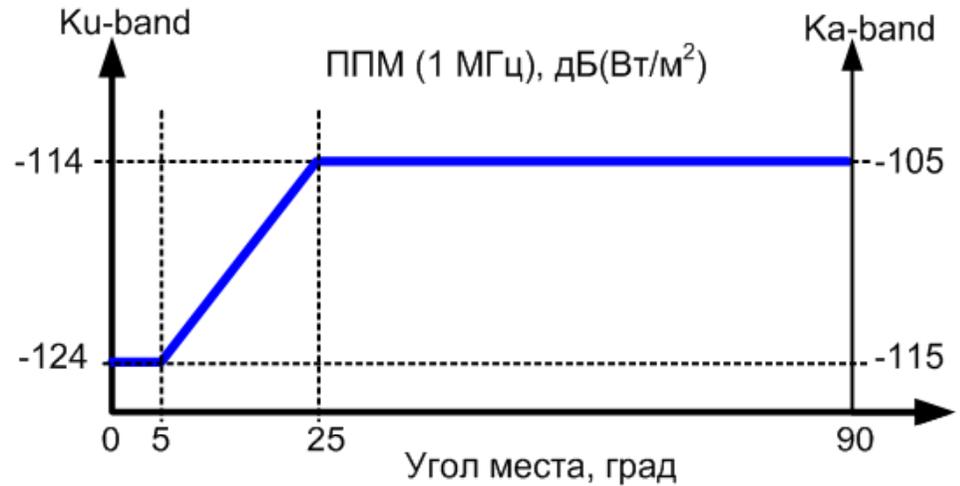


Рис.2. Ограничения на ЭППМ

Angles of Arrival (δ) Above the Horizontal Plane	0°-5°	5°-25°	25°-90°
PFD Limit in dB[W/m ² /MHz]	-115 - X	-115 - X + ((10 + X)/20)(δ - 5)	-105

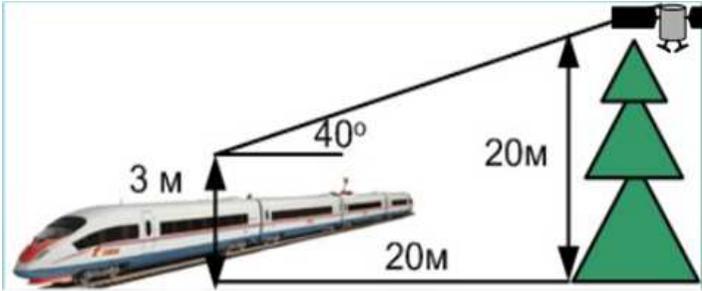
Рис.1. Ограничение на ППМ

Полоса частот (ГГц)	э.п.п.м. (дБ(Вт/м²))	Процент времени, в течение которого уровень э.п.п.м. не может быть превышен	Эталонная ширина полосы частот (кГц)	Диаметр эталонной антенны и эталонная диаграмма направленности ⁷
10,7-11,7 во всех Районах;	-175,4	0	40	60 см Рекомендация МСЭ-R S.1428-1
11,7-12,2 в Районе 2;	174	90		
12,2-12,5 в Районе 3 и	-170,8	99		
12,5-12,75 в Районах 1 и 3	-165,3	99,73		
	-160,4	99,991		
	-160	99,997		
	-160	100		



Системы ШПД на НГСО

в) снижение вероятности перекрытий МП



5. Выбор диапазона частот:

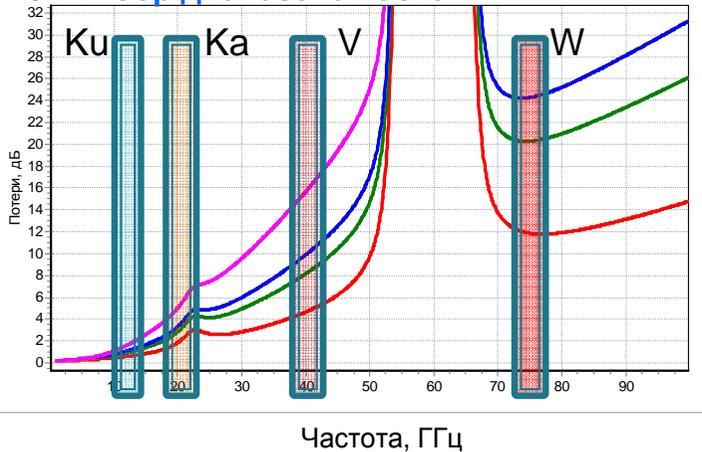


Рис.1 Затухания в атмосфере + **дождь + облака** + сцинтилляции (Москва, УМ=20 град, надежность 95%,99%,99.5% и 99.9%)

Зависят от климата региона

Коэффициент использования (или загрузки) бортов (КА):

$$K = N/M \times 100\%$$

N – число активных (в работе) спутников;

M – полное число спутников в ОГ

Пример:

- «Экспресс-РВ»: K=50%
- OneWeb: K=40%...60%
- ОЗВ: K=100%
- Starlink K=98%

Классификация спутниковых систем по мощности ОГ

Мощность ОГ	Обозначение	Число КА	
Единичная	UP (Unit Power)	1	GEO, MEO HTS
Малая	LP (Low Power)	2...50	
Средняя	MP (Medium Power)	51...100	
Большая	HP (High Power)	100...1 000	LEO HTS
Очень большая	VP (Very High Power)	1 000...10 000	
Гипербольшая	GP (Hyper High Power)	> 10 000	

Кодирование основных параметров ОГ

[A или H, i] [Npl, Nka, dL, dM, Um]

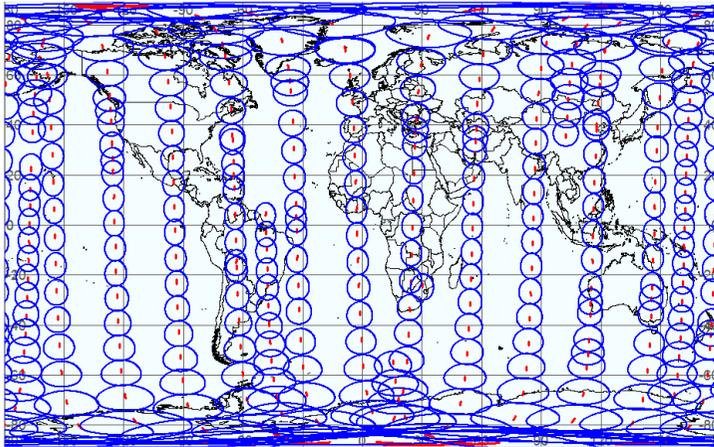
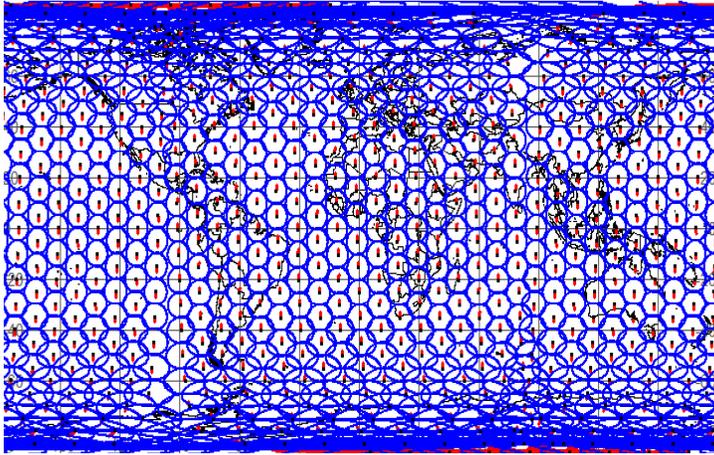
Параметры орбиты

Параметры орбитальной группировки

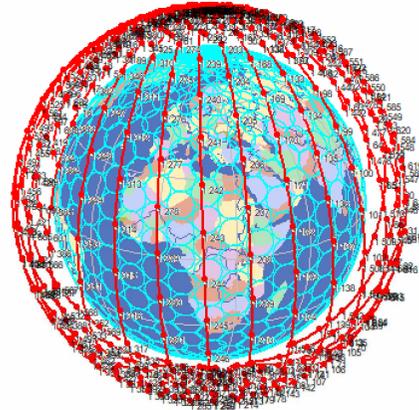


Система ONEWEB (LEO HTS)

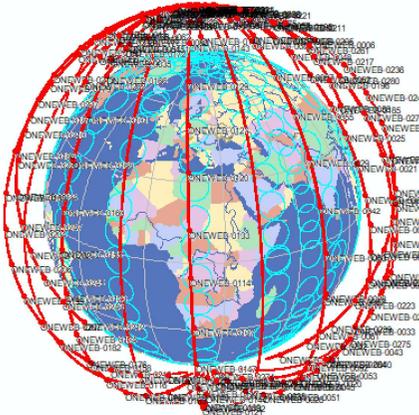
Мгновенные зоны радиовидимости



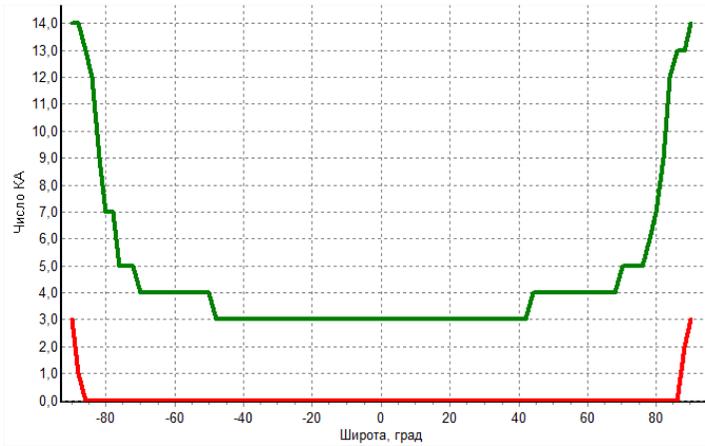
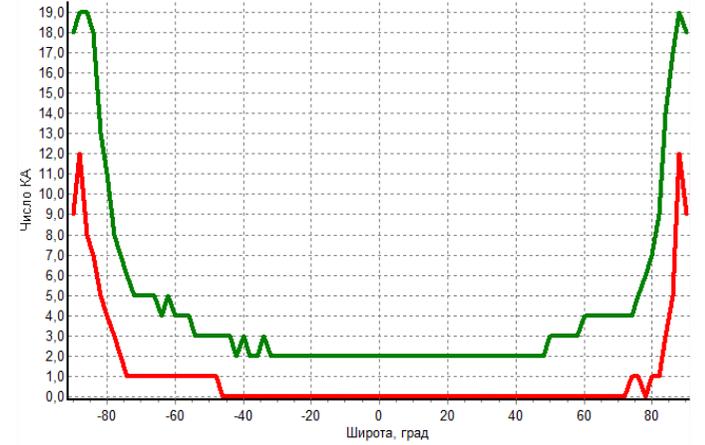
Структура ОГ



а) полный состав ОГ (648 КА)



б) по состоянию на 01.04.2022 (около 300 КА)

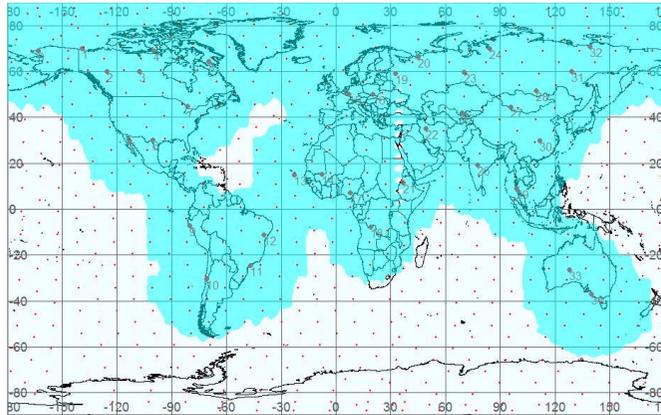


Число наблюдаемых КА (УМ=60 град)

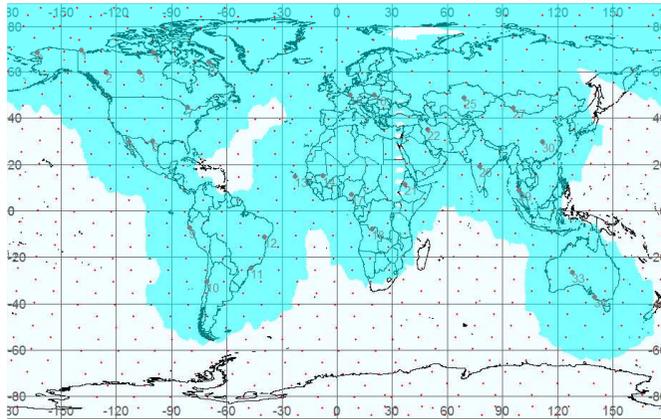
Рис.1. Состояние ОГ системы OneWeb



Система ONEWEB (LEO HTS)

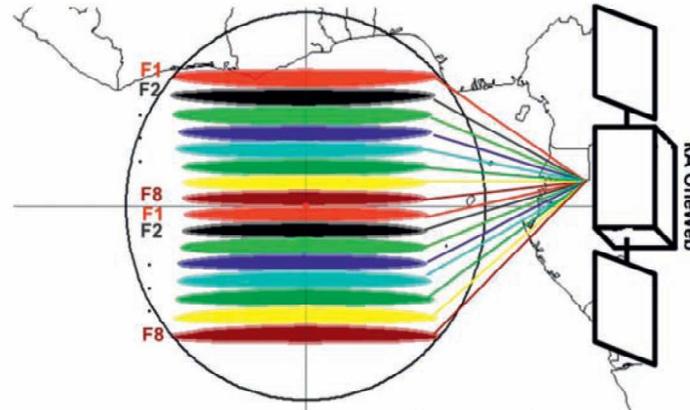


а) шлюзы размещены глобально



б) без учета шлюзов в России

Рис.1 Гарантированная зона радиовидимости (УМ шлюза 7 град, УМ АЗС 60 град)

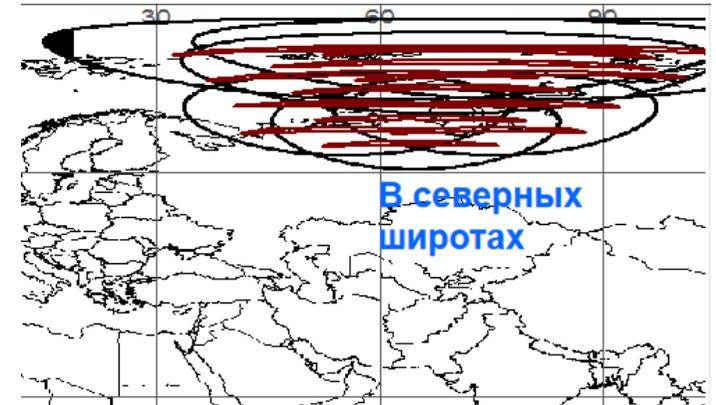


а) Частотный план КА



б) средние широты, лучи с одинаковыми частотами

Рис.2 Анализ многолучевого покрытия кластера КА



в) северные широты, лучи с одинаковыми частотами

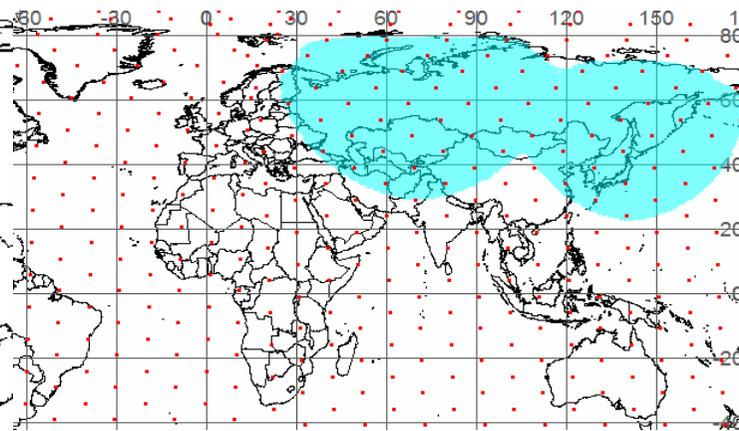


Рис.3. Зона обслуживания при размещении шлюзов на территории ЦКС Акколь (Казахстан) и в Японии



Система StarLink (LEO HTS)

Первый этап

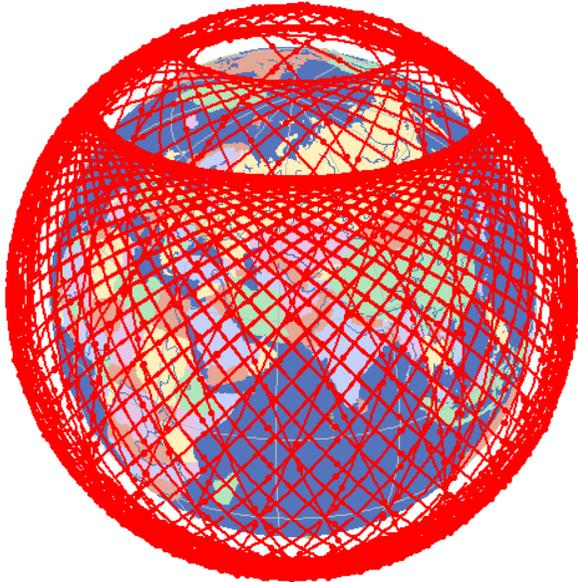


Рис.1. Первый этап, 5 эшелонов, 4408 КА
(моделирование на САПР «Альбатрос»)

Основные параметры:

- тип орбиты: LEO 300 – 550 км;
- эшелонирование группировки по высоте и наклонению
- межспутниковые линии: нет
- диапазон частот: Ku, Ka
- абонентские станции: 0,7 м
- развернуто более 1700 спутников

Второй этап

Конфигурация 1 (использование РН Starship)

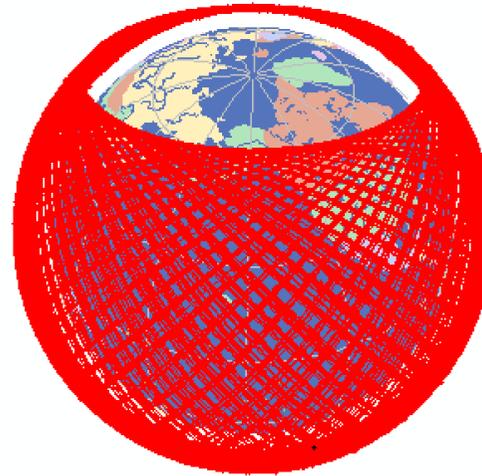
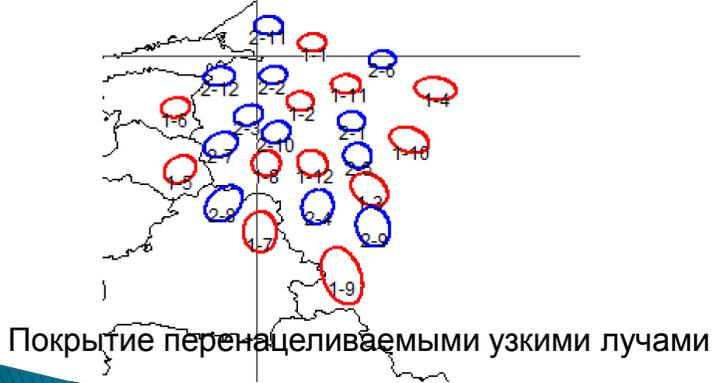
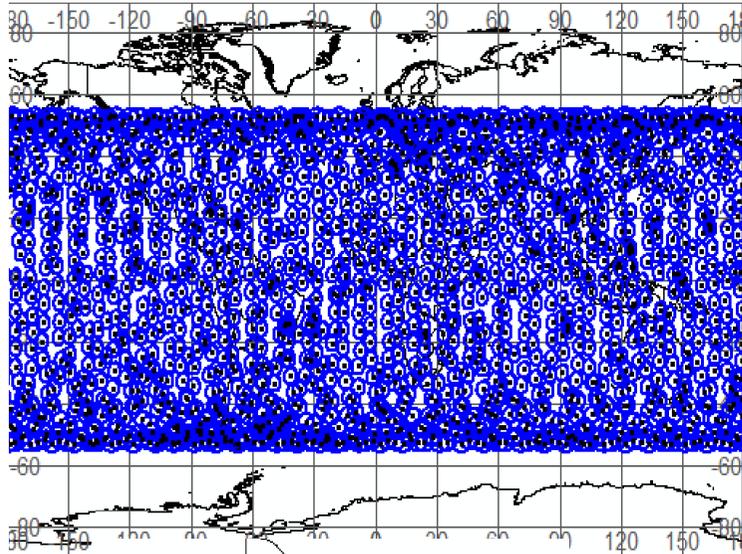
№	Высота, км	Наклонение, град	Число плоскостей	Число спутников в плоскости	Всего спутников
1	340	53	48	110	5 280
2	345	46	48	110	5 280
3	350	38	48	110	5 280
4	360	96,9	30	120	3 600
5	525	53	28	120	3 360
6	530	43	28	120	3 360
7	535	33	28	120	3 360
8	604	148	12	12	144
9	614	115,7	18	18	324
Всего					29 988

Конфигурация 2 (использование РН Falcon 9)

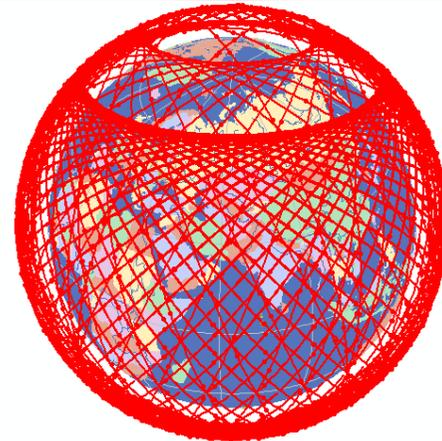
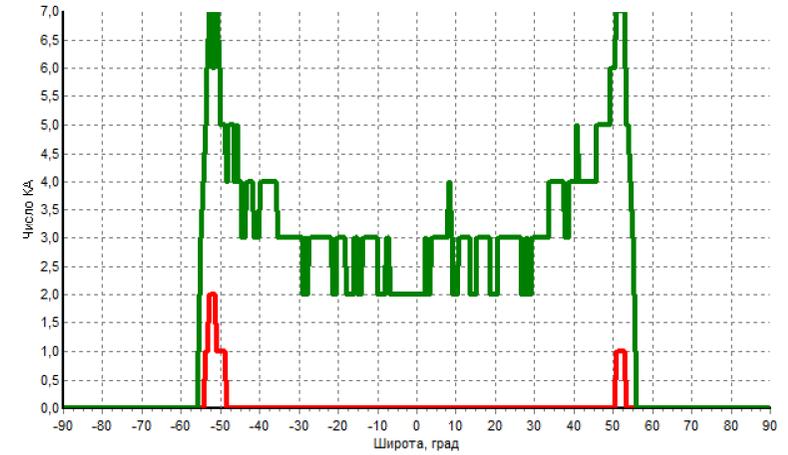
№	Высота, км	Наклонение, град	Число плоскостей	Число спутников в плоскости	Всего спутников
1	328	30	5 816	1	5 816
2	334	40	5 816	1	5 816
3	346	53	5 816	1	5 816
4	360	96,9	40	50	2 000
5	510	14	72	23	1 656
6	515	22	72	23	1 656
7	520	30	72	23	1 656
8	525	53	72	23	1 656
9	530	45	72	24	1 728
10	535	38	72	24	1 728
11	604	148	12	12	144
12	614	115,7	18	18	324
Всего					29 996



Система StarLink



а) по состоянию на 01.04.2022 (более 1600 КА)



б) после полного развертывания

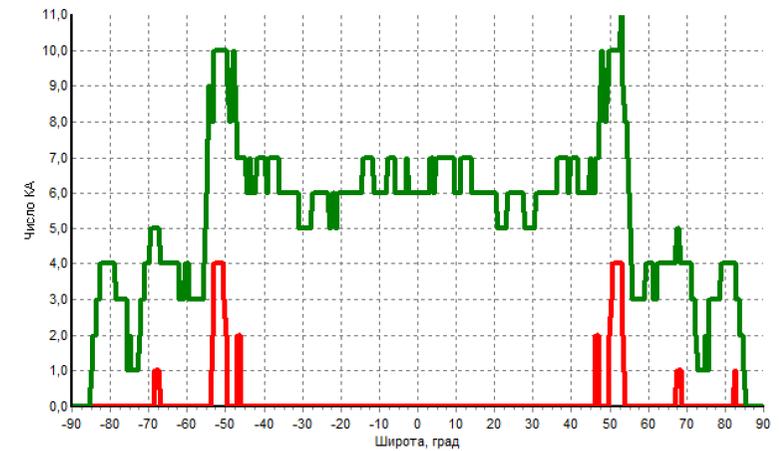




Схема развертывания ОГ системы Starlink



Рис.1 Графики изменения высоты КА из состава группового запуска (57 КА) системы StarLink от 07.01.2020 ($i=53$ град, время развертывания в рабочих плоскостях: 1,5 мес+1,5 мес + 1.5 мес.)

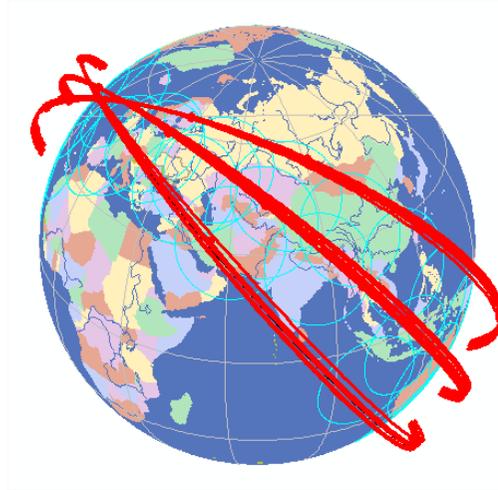
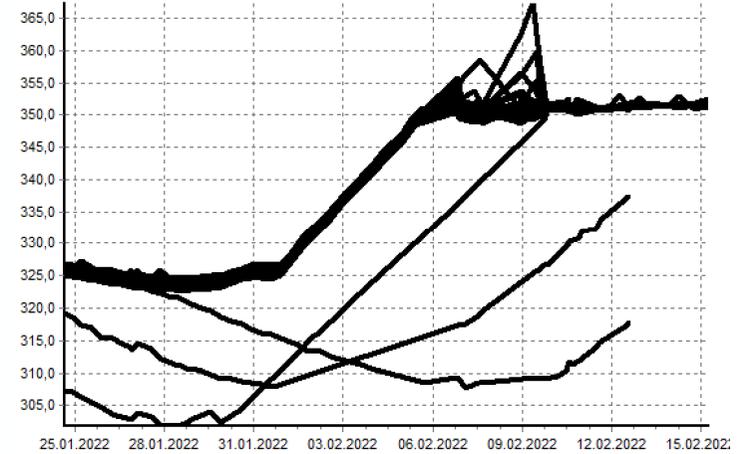
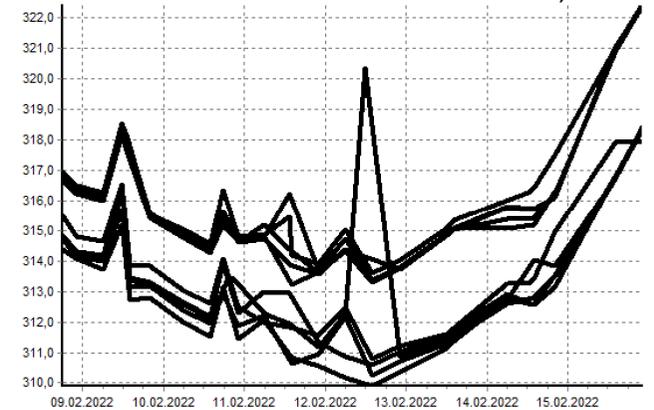


Рис.2 Результат : через 4,5 мес сформированы три плоскости ОГ системы StarLink



а) запуск 2022-005 от 19.01.2022 (выведено на эшелон 360 км около 48 КА)



б) запуск 2022-010 от 03.03.2022 (удалось сохранить только около 10 КА)

Рис.3 Деструктивное влияние атмосферы в период солнечной активности



Проект Lightspeed (Канада, ШПД)

Параметры системы:

- оператор: Telesat
- стоимость: \$5 млрд (2/3 получено)
- начало развертывания: 2025 г
- начало эксплуатации: 2026 г
- покрытие: глобальное
- суммарная пропускная способность 15 Тбит/с
- пусковые услуги: Blue Origin и Relativity Space
- Центр управления в Оттаве (Канада)

Орбитальная группировка:

- 1 эшелон [1015, 99,5] [6,13,X,X,X] – 1 этап
- 2 эшелон [1325, XX,X] [10,11,X,X,X] – 1 этап
- 3 эшелон [1325, XX,X] [10,11,X,X,X] – 2 этап
- X – нет данных

Космический аппарат:

- масса: около 700 кг;
- САС: 10 лет эксплуатации и + 2 года на подъем, хранение и вывод с орбиты;
- мощность СЭС: около 4 кВт

Полезная нагрузка:

- полосы частот абонентских и фидерных линий:
 - линия «вниз»: всего 1.8 ГГц в полосе 17.8-20.2 ГГц
 - линия «вверх»: всего 2.1 ГГц в полосе 27.5-30.0 ГГц
- полная обработка на борту
- 16 лучей на передачу и 16 лучей на прием
- «прыгающие» лучи с возможностью изменения мощности, полосы пропускания, ширины луча,
- межспутниковые линии в оптическом диапазоне, между смежными КА в одной и смежных плоскостях
- задержка сигнала: от 30 до 50 миллисекунд
- каждый спутник- это узел сети

История:

- 12.01.2018 выведен первый тестовый спутник LEO 1 (NORAD 43113) на эшелон 1;
- в 2021 г заключен контракт с Thales Alenia Space на производство 298 спутников

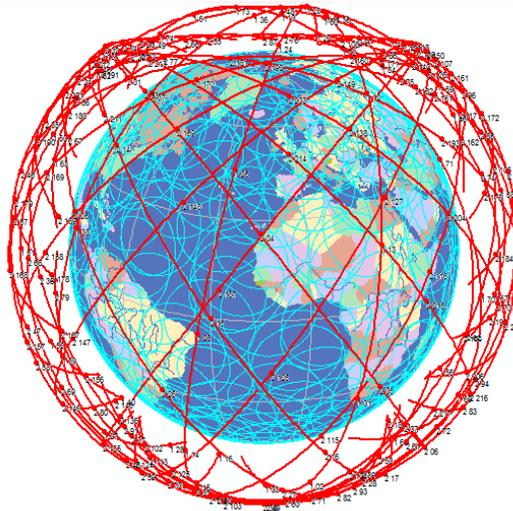


Рис.1 Полная ОГ (298 КА)



Рис.2 Макет КА

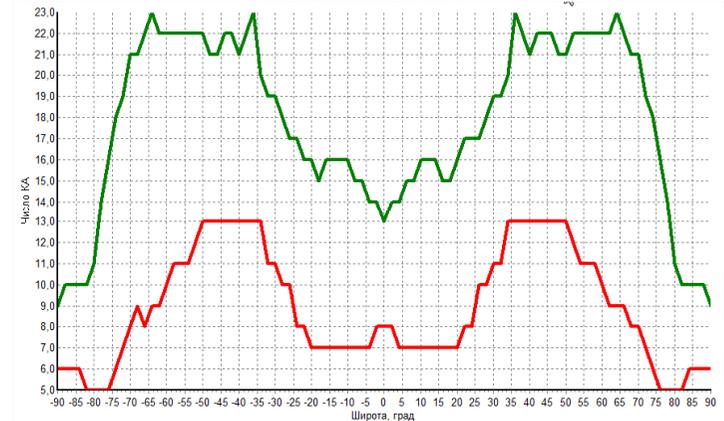


Рис.3 Число наблюдаемых КА от широты (УМ>10 град)

Абонентские станции:

- антенны с электронным и механическим управлением;
- авто-подключение к спутниковой сети;
- до 7,5 Гбит/с на абонентский терминал
- до 20 Гбит/с на «точку доступа» (населенные пункты, аэропорты и т.д.)
- типы: наземные мобильные, авиационные, морские и др.

Станции сопряжения:

- планируется около 30 станций сопряжения
- в состав шлюза входит несколько антенн 3,5 м
- первый шлюз размещен в Онтарио (Канада)

Проект Kuiper (США, ШПД)

Параметры системы:

- оператор: Amazon Kuiper Systems LLC
- стоимость: \$10 млрд
- начало работ: 2019 г
- начало развертывания: 50% до 30.07.2026 г
- полное развертывание: 100% до 30.07.2029 г
- зона обслуживания, 1 этап: 39 ... 56 град с.ш. и ю.ш.
- запуск двух тестовых КА: в 4 квартале 2022 г
- пусковые услуги: ULA, Arianespace и Blue Origin
- PH: Vulcan Centaur, Ariane 6, New Glenn

Орбитальная группировка:

- 1 эшелон [630, 51,9] [34, 34, 10.588, 0.934,35]
- 2 эшелон [610, 42,0] [36, 36, 10, 0.833,35]
- 3 эшелон [590, 33,0] [28, 28, 12.86, 0.459,35]
- X – нет данных
- Всего: 3236 КА
- На первом этапе: развертывание 578 КА

Космический аппарат:

- САС: 7 лет

Полезная нагрузка:

- полосы частот абонентских и фидерных линий:
 - линия «вниз»: 1,25 ГГц в полосе 17.7-20.2 ГГц
 - линия «вверх»: 2.0 ГГц в полосе 28.35-30.0 ГГц
- перенацеливаемые лучи на базе фазированных антенных решеток
- ширина луча около 1.8 град;

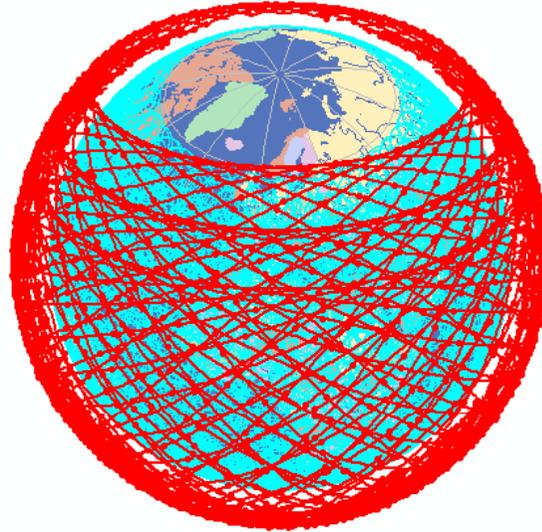


Рис.1 Полная ОГ (3236 КА)



Рис.2 Число наблюдаемых КА от широты при полной ОГ (УМ>35 град)

Станции сопряжения:

- распределенная сеть станций сопряжения, в т.ч. Amazon Web Services (включает 12 спутниковых станций)
- шесть станций уже построены (Швеция, Бахрейн, Австралия, Ирландия и два в США)

Абонентские станции:

- плоские приемно-передающие антенны на базе ФАР и параболические с механическим наведением;
- диаметр антенны от 20 до 65 см;
- предельная скорость: до 400 Мбит/с;



Система ОЗВ и проект ОЗВ mPower

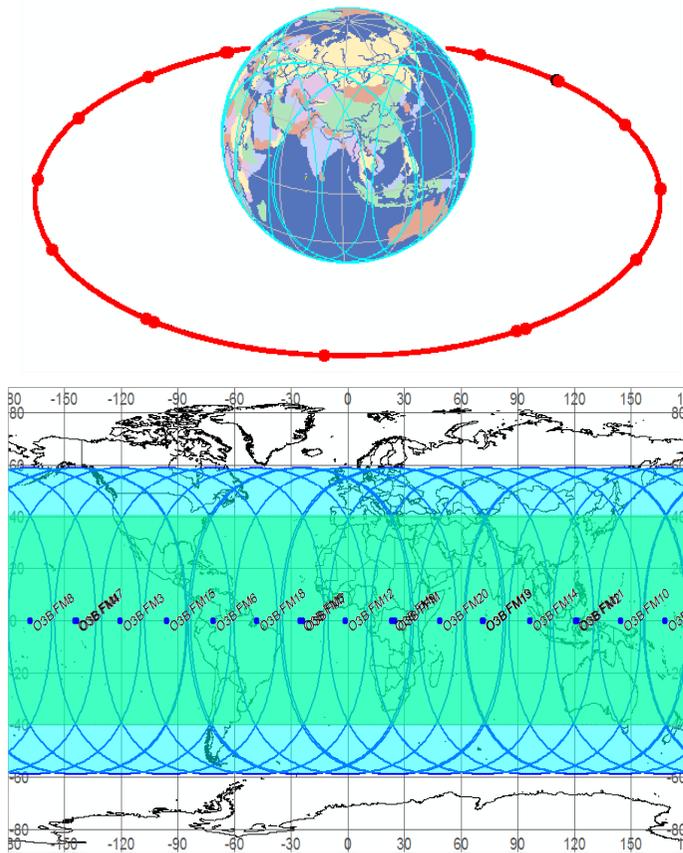


Рис.1. Гарантированная зона радиовидимости (ГЗРВ) при УМ=5°



А) КА ОЗВ в позиции 45° в.д.



Б) КА ОЗВ в позиции 70° в.д.

Рис.2. Покрытие лучами шириной 3,5° территории Казахстана системой ОЗВ при ограничении на УМ=5°



Проект системы «СКИФ» (Россия)

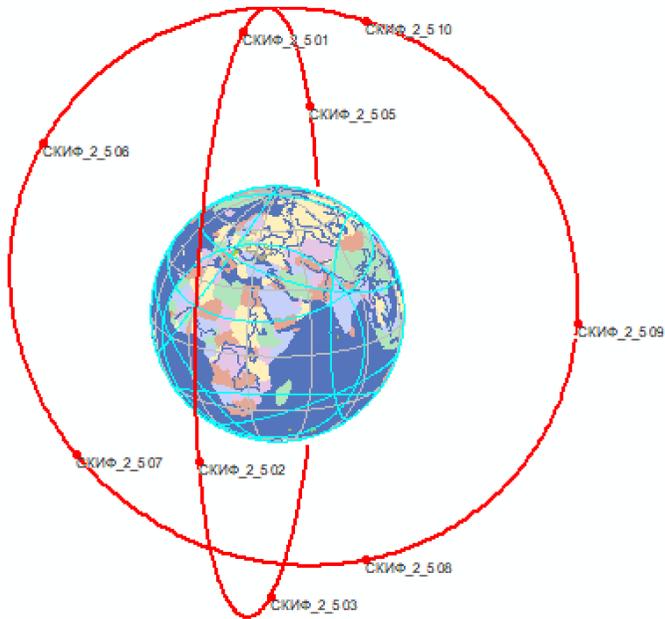


Рис.1. ОГ проекта системы «СКИФ» (10 КА)

Космический сегмент:

- Тип орбиты – МЕО, 8070 км
- Число КА – 10
- Диапазон частот Ка

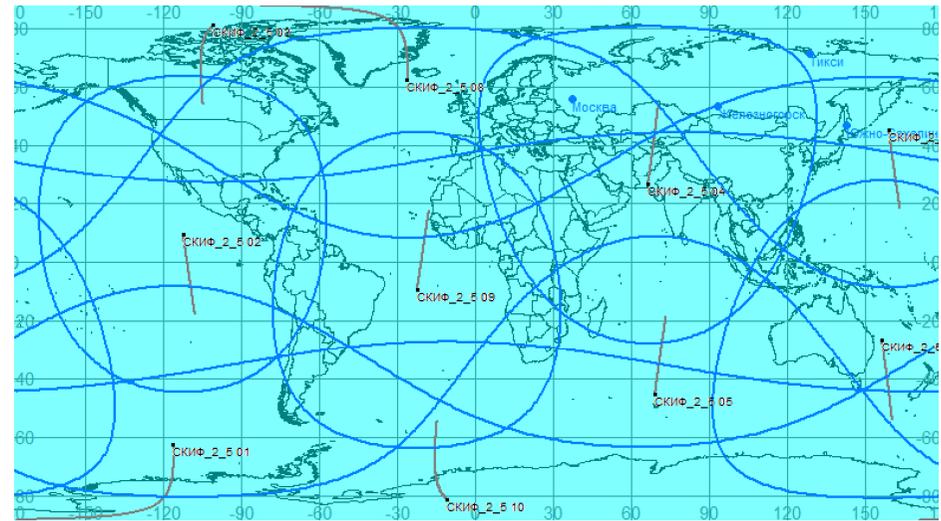


Рис.2. Мгновенная зона радиовидимости системы (УМ=10 град)

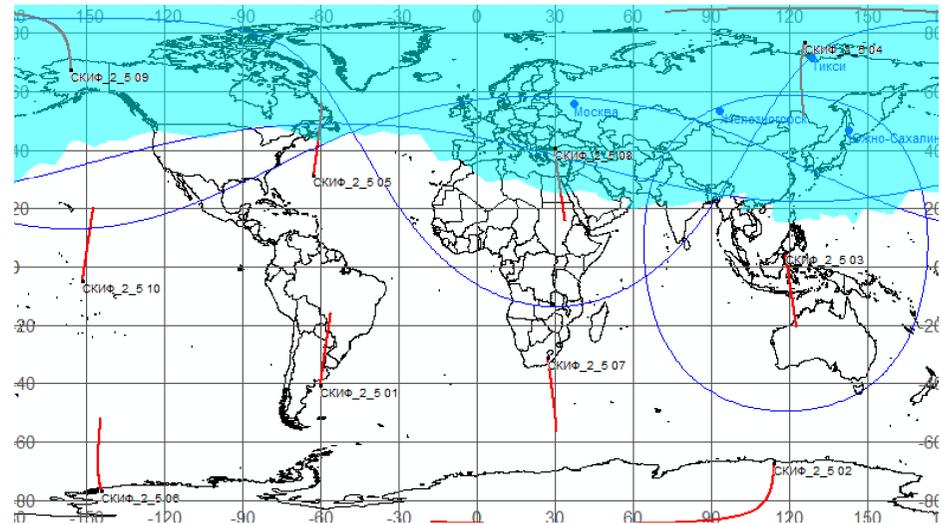


Рис.3. Зона обслуживания системы (русский сегмент шлюзов)



Проект системы «Экспресс-РВ» (Россия)

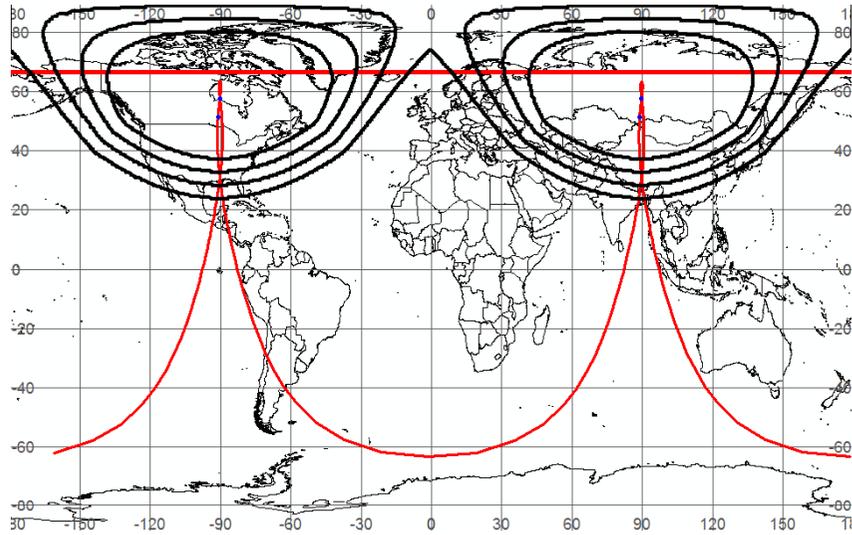


Рис.1. Гарантированные зоны радиовидимости (ГЗРВ) для углов места 45, 50, 55 и 60 град

Основная проблема: абонентские станции достаточно дороги для массового использования

Проработка проекта: ФГУП «Космическая связь»



Рис.2. Патент «Орбита «Кентавр»

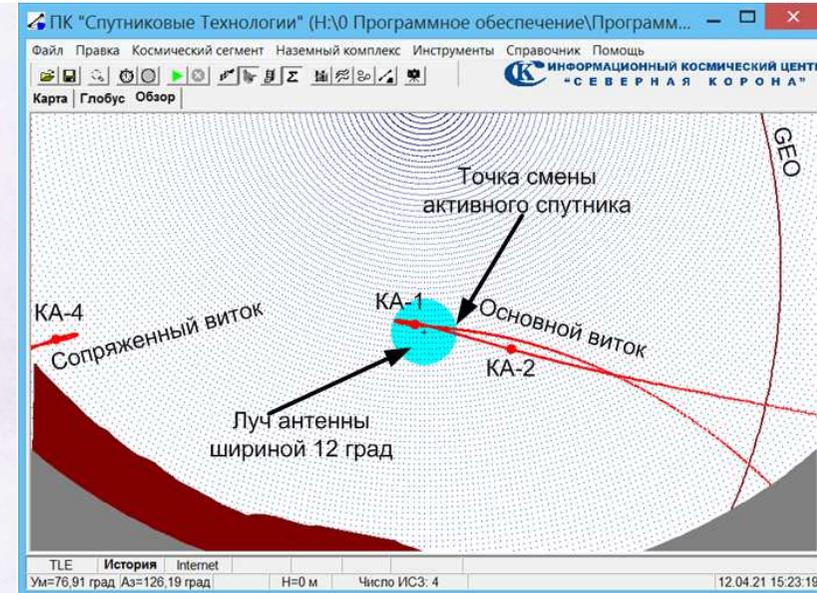


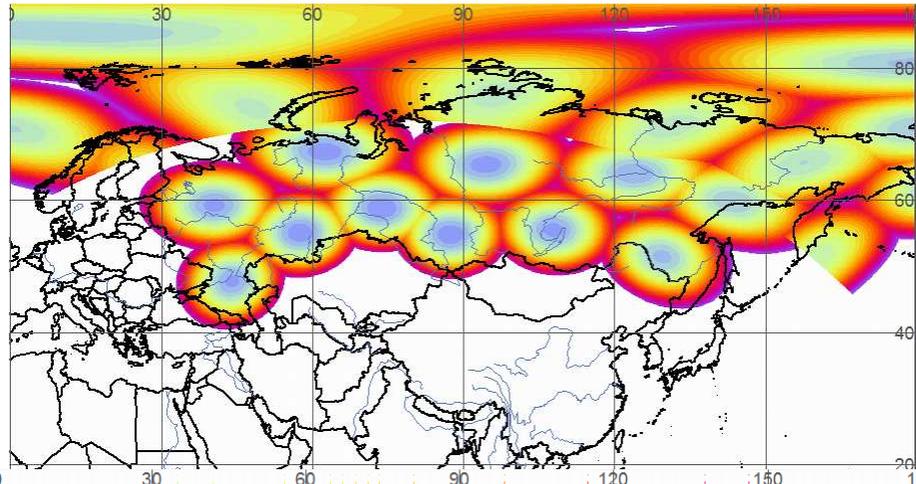
Рис.3. Принцип формирования «виртуальных» позиций

Основные характеристики:

- Тип орбиты – ВЭО (Кентавр)
- Число КА – 4
- Диапазон частот – Ku
- Число лучей на одном КА – 12
- Ширина луча 2,75 град
- Диаметр антенны АС 70 см
- Пропускная способность до 110 Мбит/с на канал 54 МГц

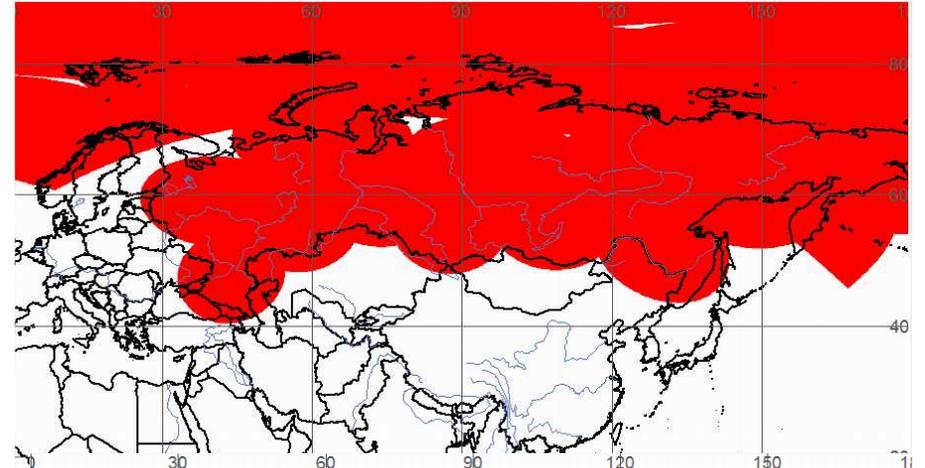


Зона обслуживания системы «Экспресс-РВ»

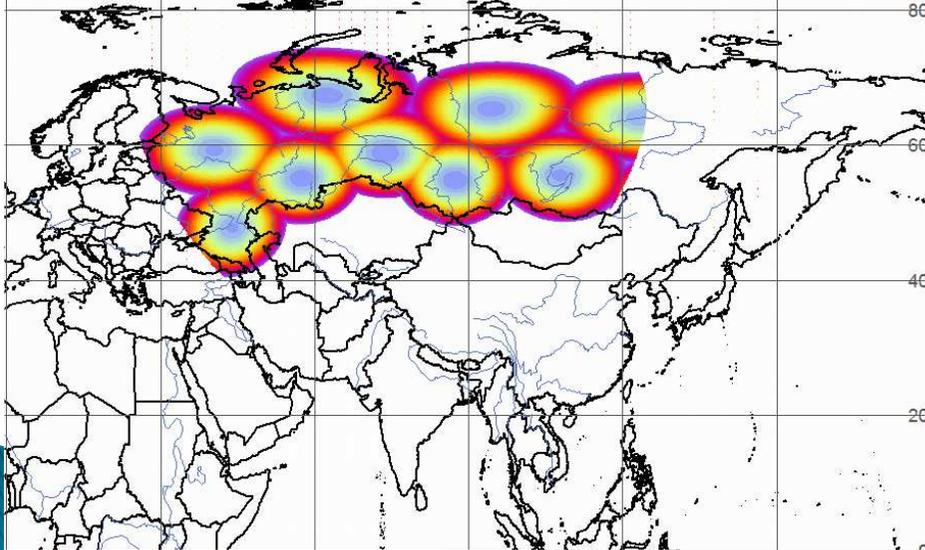


Парциальные лучи

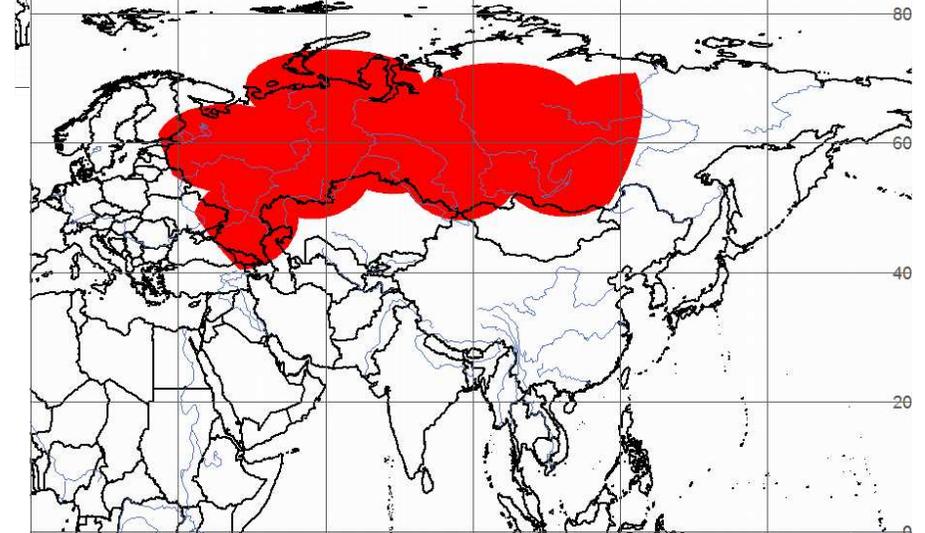
УМ=30 град



Интегральное покрытие

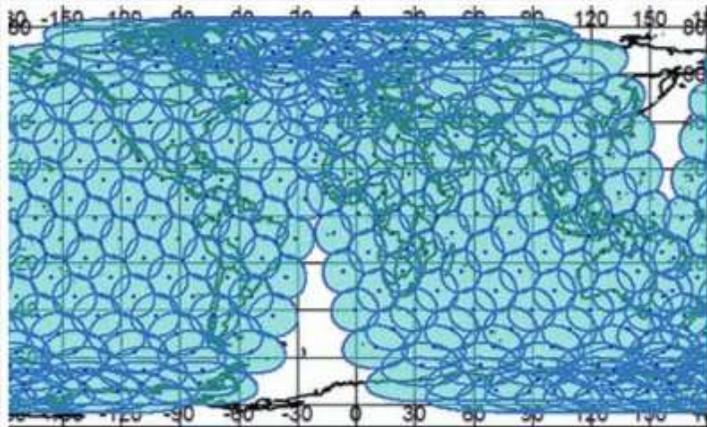


УМ=60 град

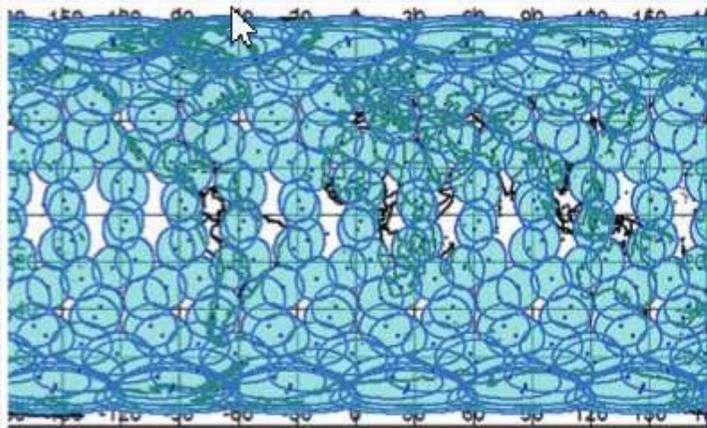




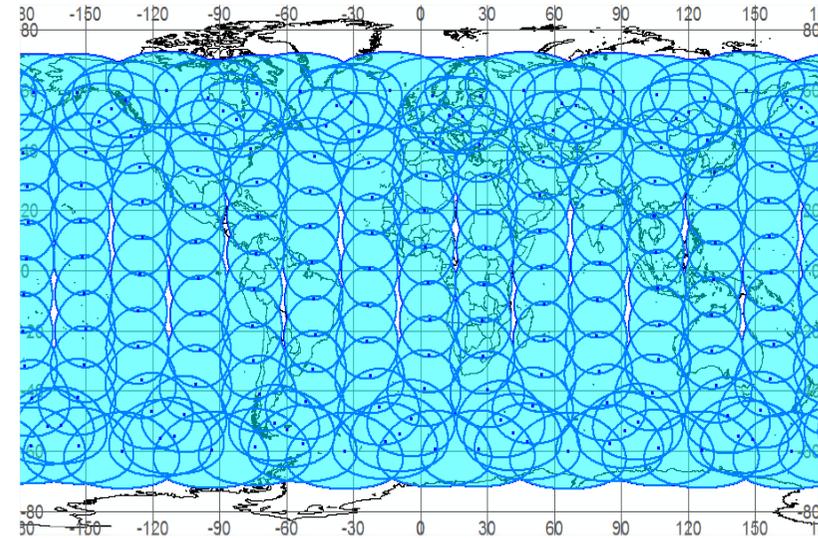
Оптимизация баллистической структуры орбитальной группировки



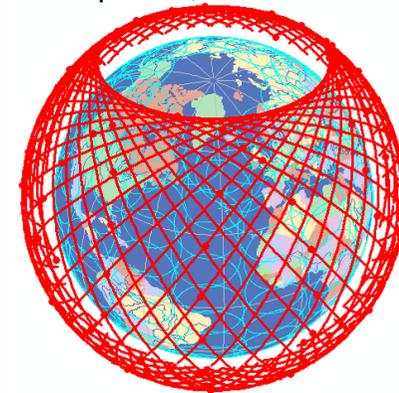
а) Наклонные орбиты, конструкция Уолкера



б) Наклонные орбиты, Дельта-конфигурация



в) Наклонные орбиты, оптимальная конфигурация



1. Достижимый эффект: гарантированное покрытие одной и той же территории меньшим числом спутников

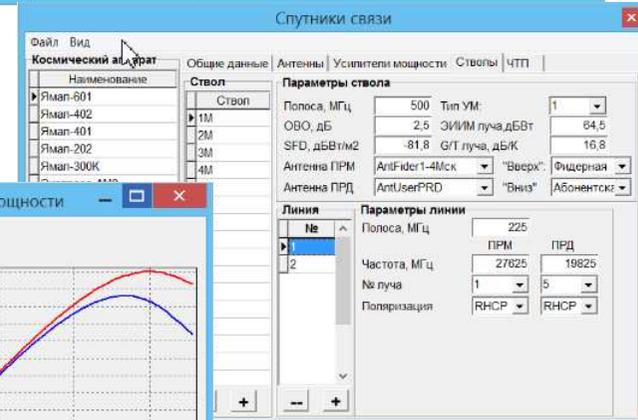
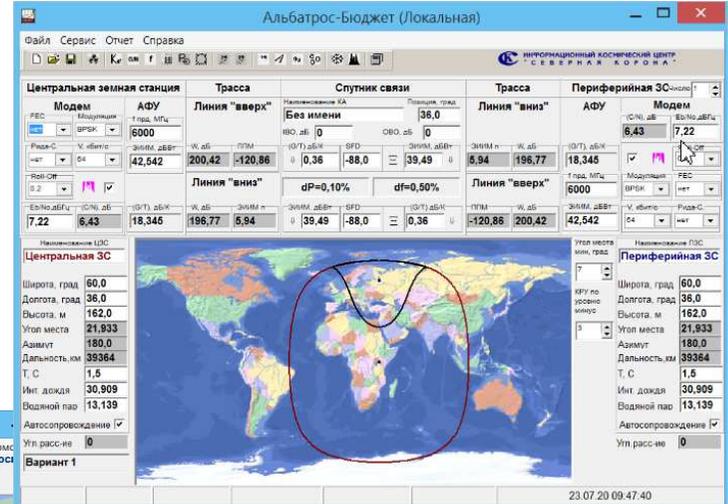
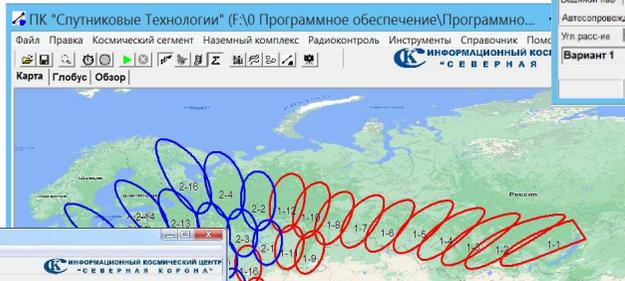
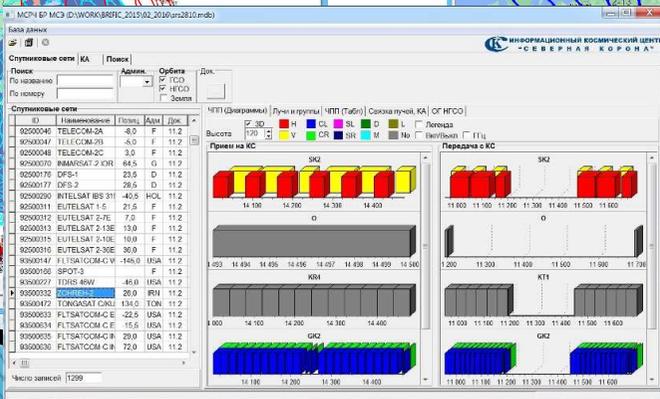
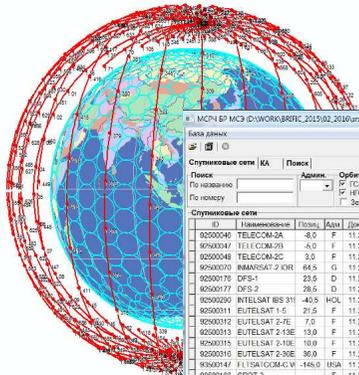
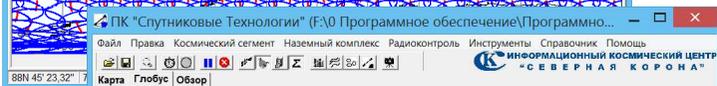
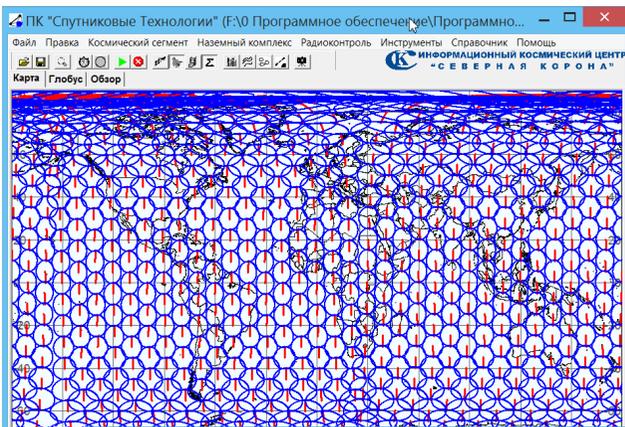
2. Подана заявка на выдачу патента на изобретение



САПР «Альбатрос»

Математическое имитационное моделирование и выполнение инженерных расчетов спутниковых систем и сетей различного назначения

1. ПК «Спутниковые технологии» - системное проектирование и ситуационный анализ, частный каталог NORAD
2. ПК «Бюджет» - расчет спутниковых радиолиний
3. ПК «БРИФИК» - анализ информации Международного справочного Регистра частот (BRIFIC)





ВЫВОДЫ

1. Идет активное освоение Ku- и Ka- диапазонов частот в интересах НГСО систем на LEO, MEO и NEO. Работа коммерческих систем в Q- и V- диапазонах спектра возможна при снижении требований к надежности абонентских радиолиний, что определяет снижение гарантированной скорости передачи информации. Коммерческое применение на данном этапе не очевидно.
2. В классе LEO систем, которые разворачиваются на орбитах ниже 1500 км, проблема уже стоит не только в доступности частотного ресурса, но и в доступности «высотного» ресурса. За последние годы в БР МСЭ поданы заявки, прикрывающие фактически весь высотный эшелон, доступный для построения LEO систем.
3. Одна из проблем группировок ШПД систем на LEO – низкий коэффициент использования бортов (спутников). Проблема связана с эффектом концентрации спутников на широте наклона; необходимостью исключения помех системам на ГСО и отсутствием возможности размещения «привязанных к оптике» шлюзов в океанах (при отсутствии межспутниковых линий).
4. Нарращивание пропускной способности должно обеспечиваться путем простого увеличения мощности (числа спутников) орбитальной группировки. Данный прием возможен, если на борту используется технология «прыгающих» лучей.
5. Ключевым фактором на этапе разработки новых систем на LEO является использование эшелонированных орбитальных группировок, группировок с оптимальной структурой, а также управляемыми лучами для формирования динамических зон обслуживания.

Спасибо за внимание!



199034, Россия, Санкт-Петербург,
17-я линия В.О., д.4-6
тел/факс +7 (812) 320-65-04
 +7 (812) 922-36-21
e-mail: org@spacecenter.ru
сайт: www.spacecenter.ru