



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

Андрей Гриценко

Генеральный директор, к.т.н.

**XIV Международная конференция «Satellite Russia & CIS:
спутниковая связь и космические аппараты на разных орбитах в эпоху глобальной трансформации отрасли»**

07 апреля 2022 г

Москва, ВДНХ, проспект Мира, 119, павильон «Умный город» (строение 461)

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 спутниками 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

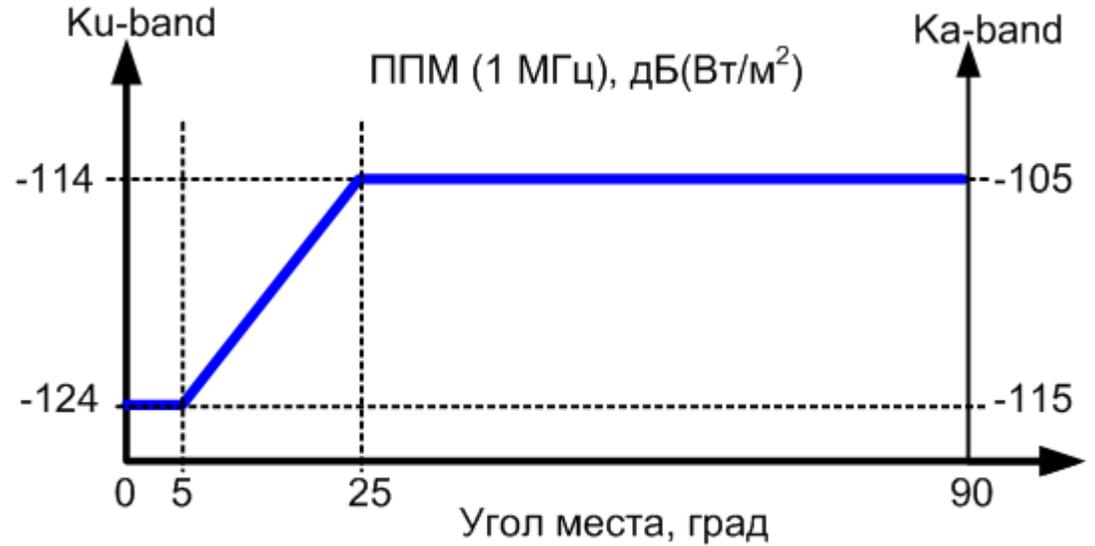


Рис.1.

б) снижение потерь в атмосфере и дожде на участках «К-3» и «З-К»

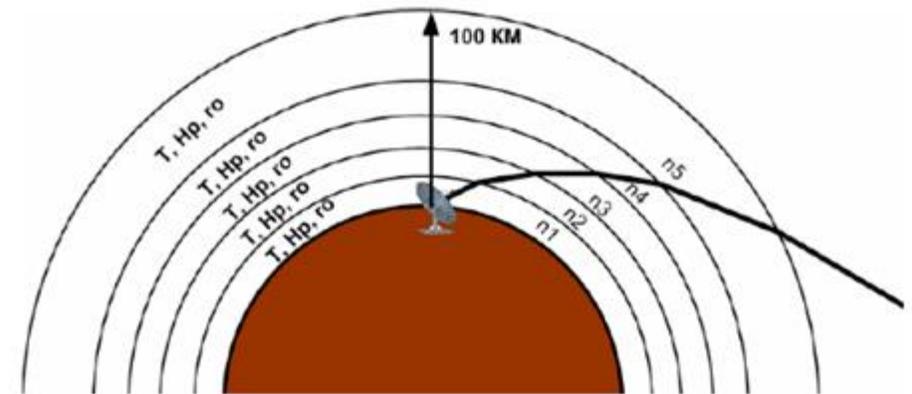
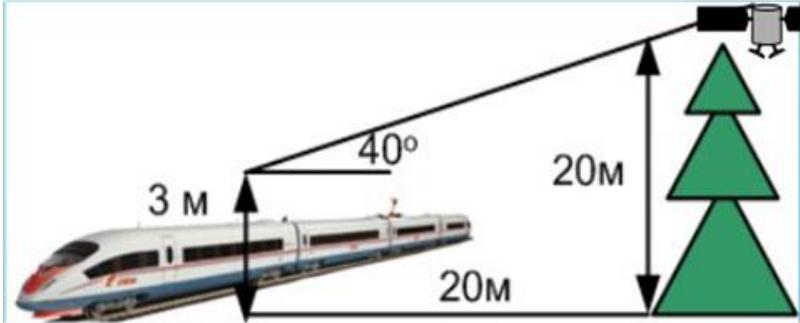
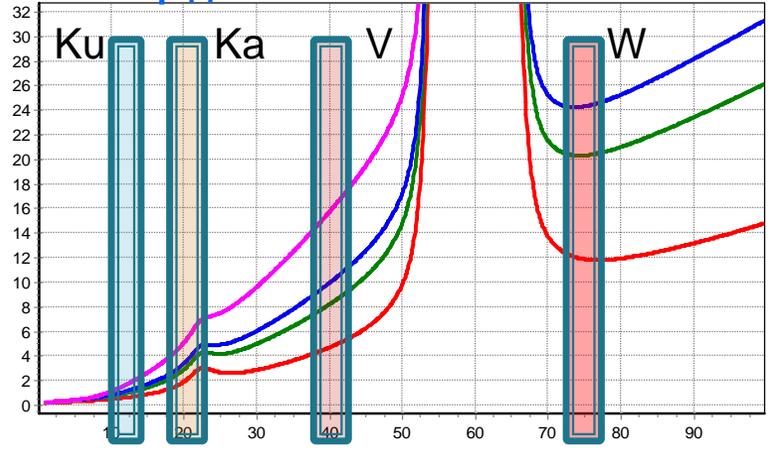


Рис.2.

в) снижение вероятности перекрытий МП



5. Выбор диапазона частот:



Частота, ГГц

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

Коэффициент использования 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]

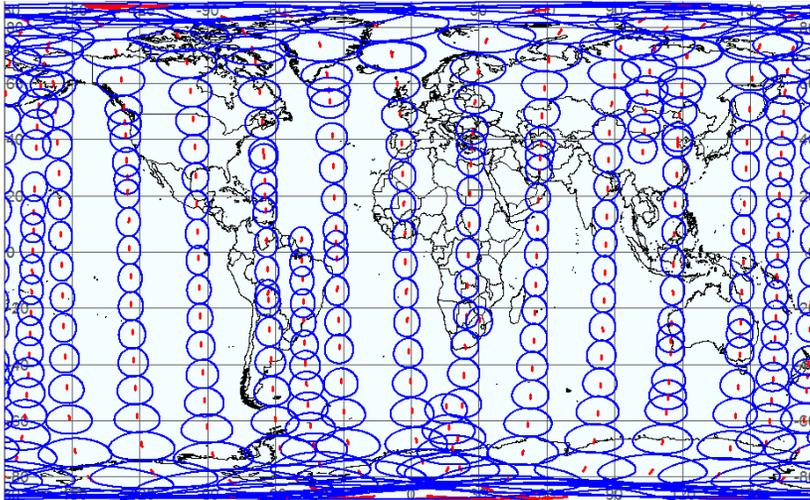
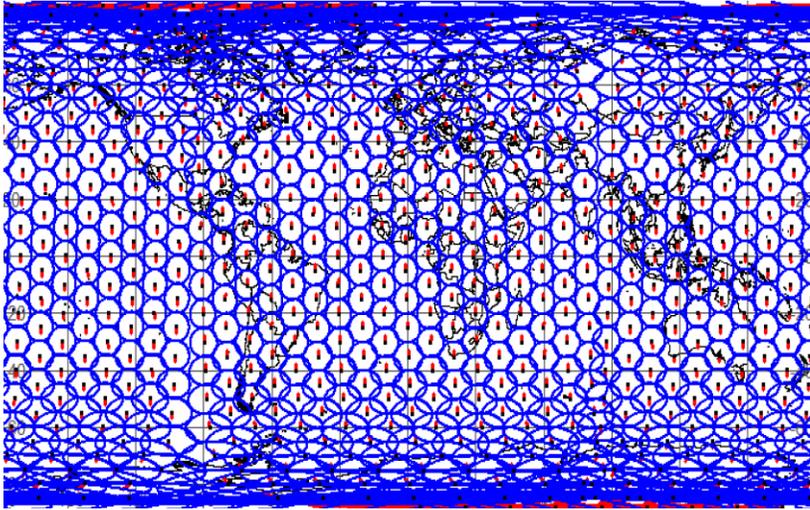
Параметры орбиты

Параметры орбитальной группировки

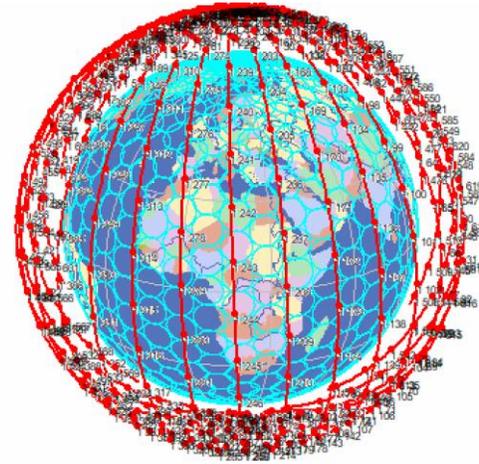


Система ONEWEB (LEO HTS)

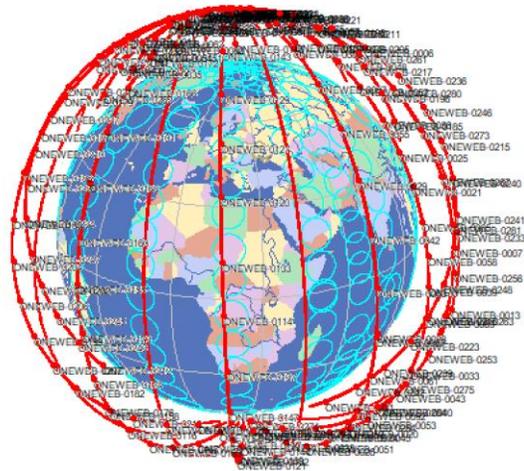
Мгновенные зоны радиовидимости



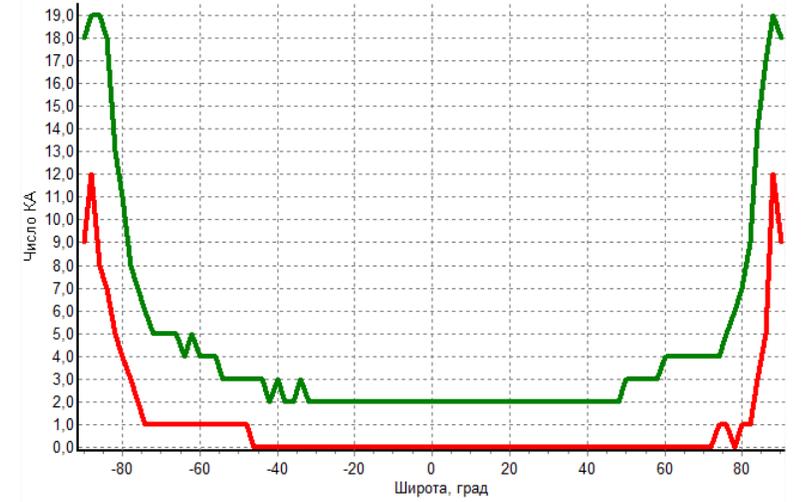
Структура ОГ



а) полный состав ОГ (648 КА)



б) по состоянию на 01.04.2022 (около 300 КА)



Число наблюдаемых КА (УМ=60 град)

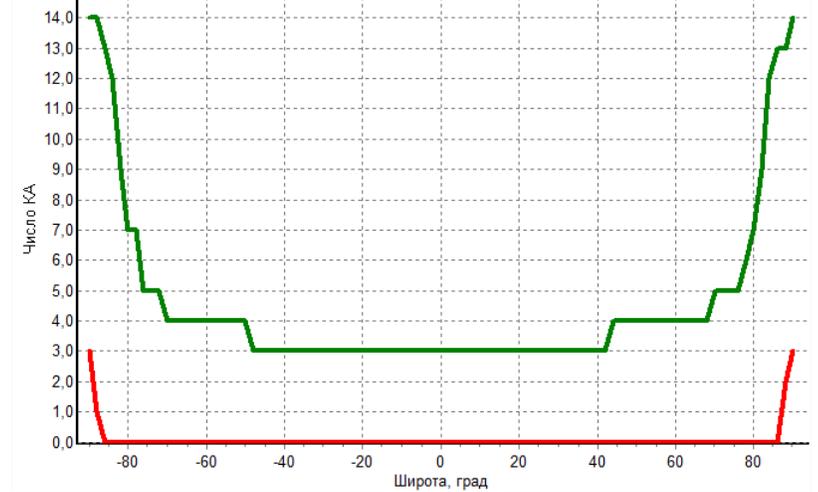
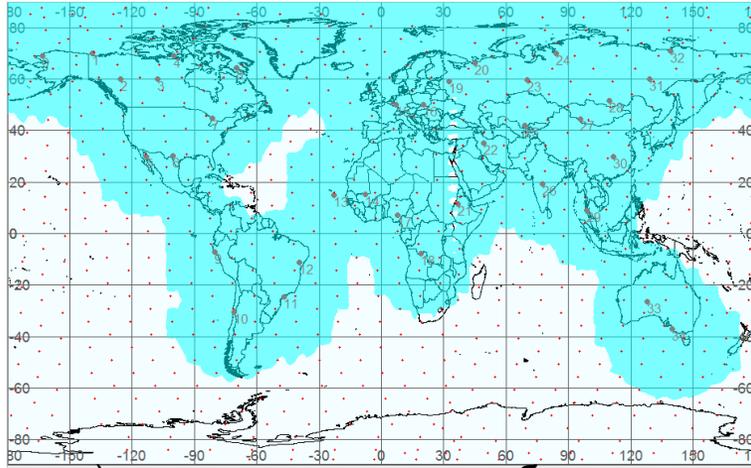


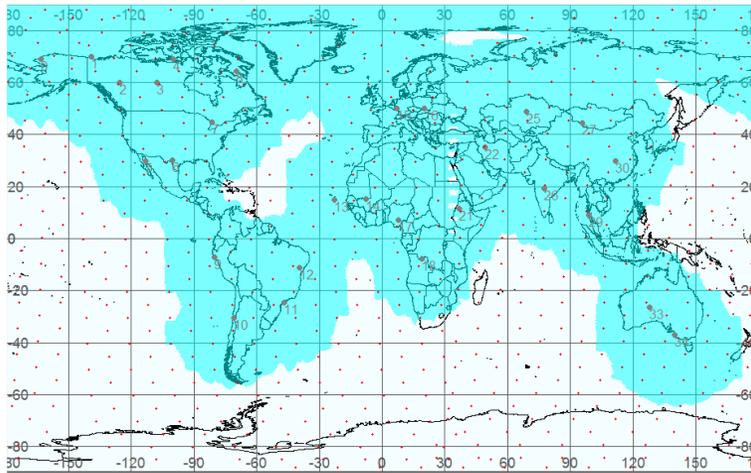
Рис.1. Состояние ОГ системы OneWeb



Система ONEWEB (LEO HTS)

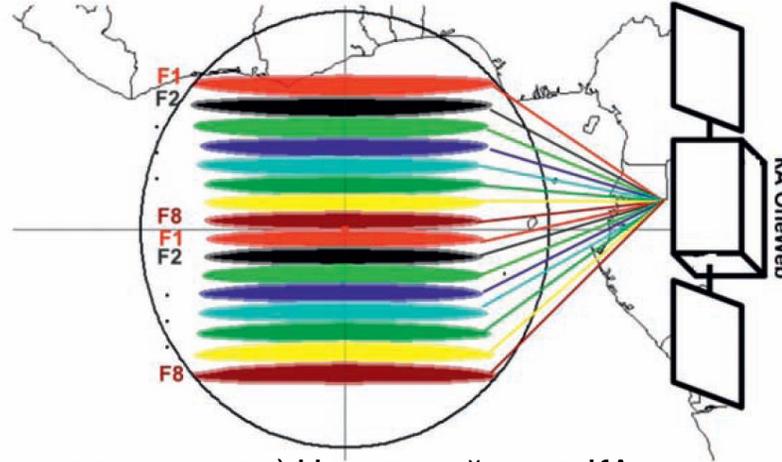


а) шлюзы размещены глобально



б) без учета шлюзов в России

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

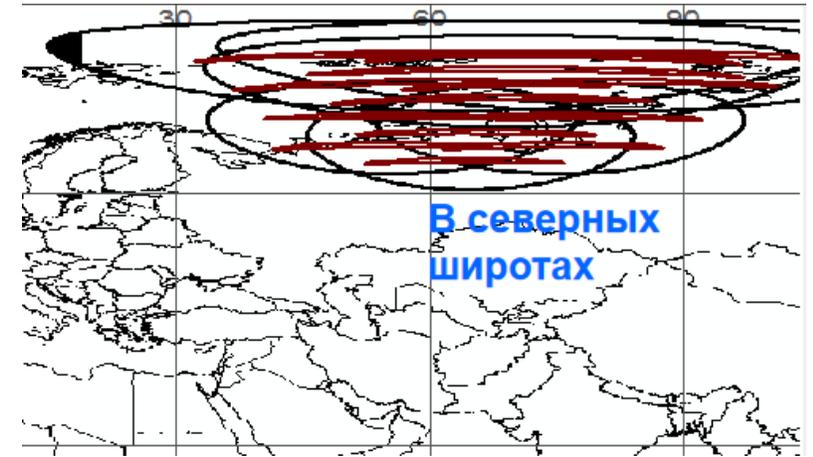


а) Частотный план КА

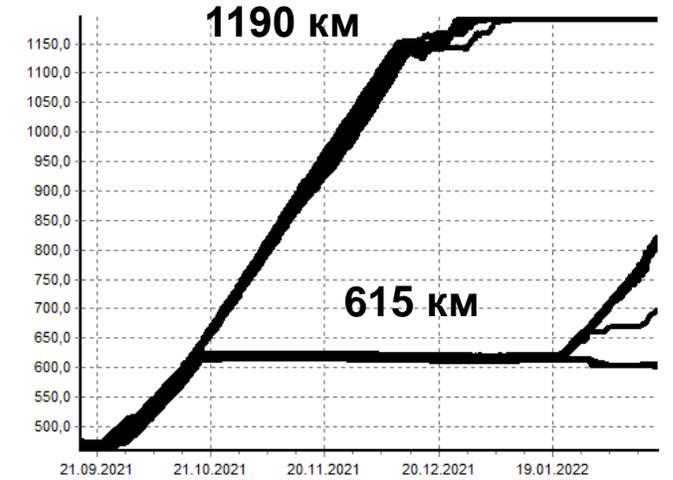


б) средние широты, лучи с одинаковыми частотами

Рис.2 Анализ многолучевого покрытия кластера КА



в) северные широты, лучи с одинаковыми частотами



а) запуск 2021-090 от 14.10.2021

Рис.3 Графики изменения высоты орбиты от времени для спутников из состава групповых запусков



Система StarLink (LEO HTS)

Первый этап

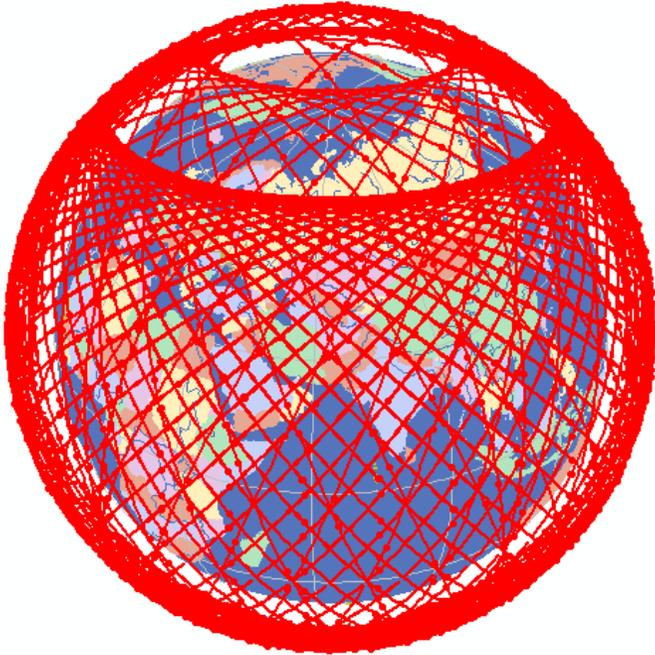


Рис.1. Первый этап, 5 эшелонов, 4408 КА (моделирование на САПР «Альбатрос»)

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

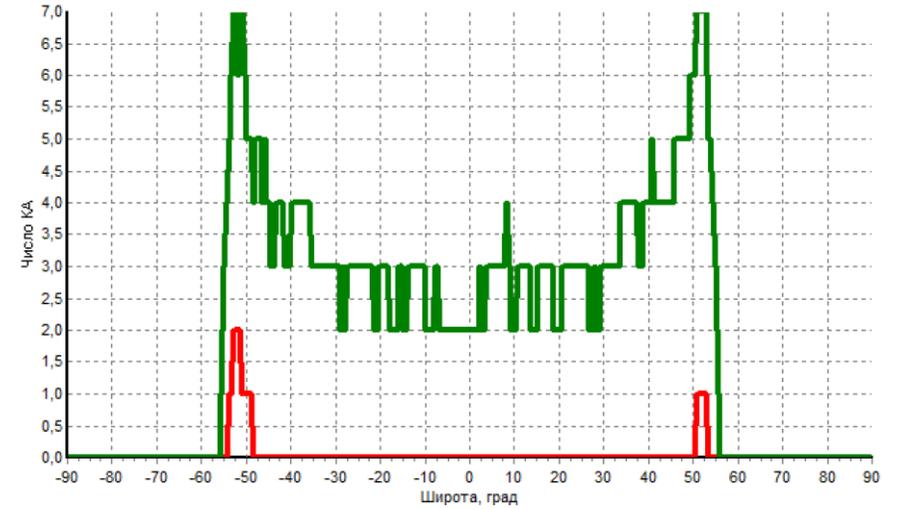
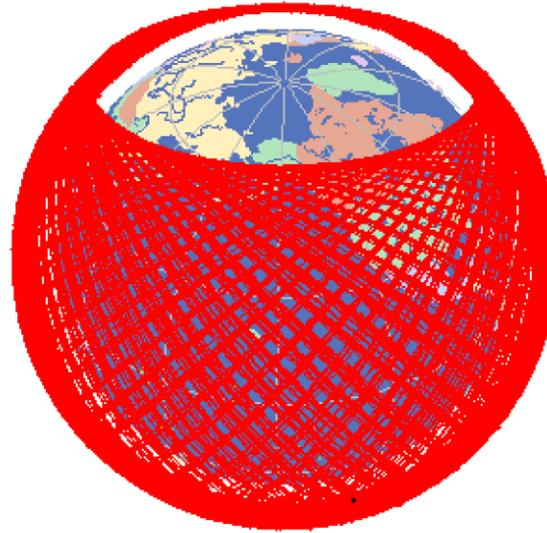
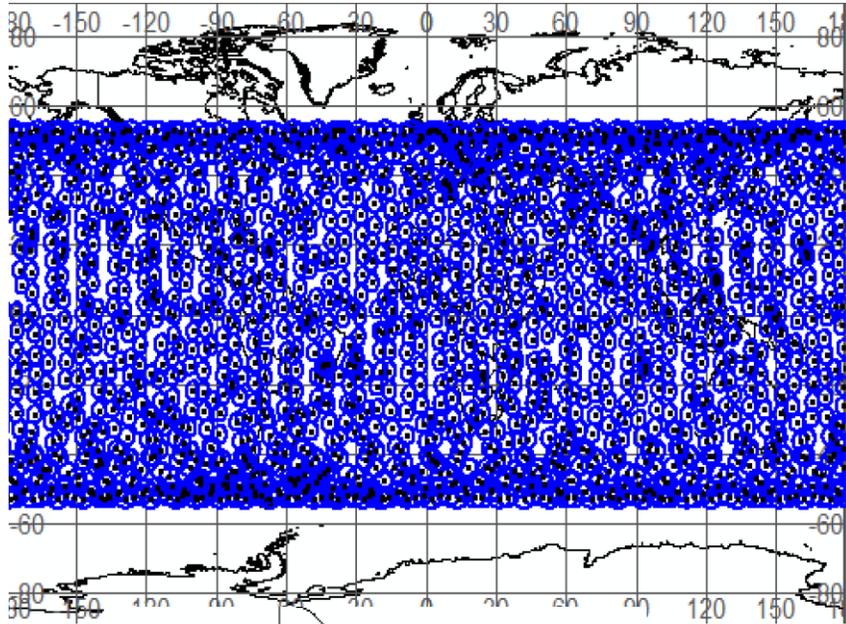
Конфигурация 1 (использование PH Starship)

№	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

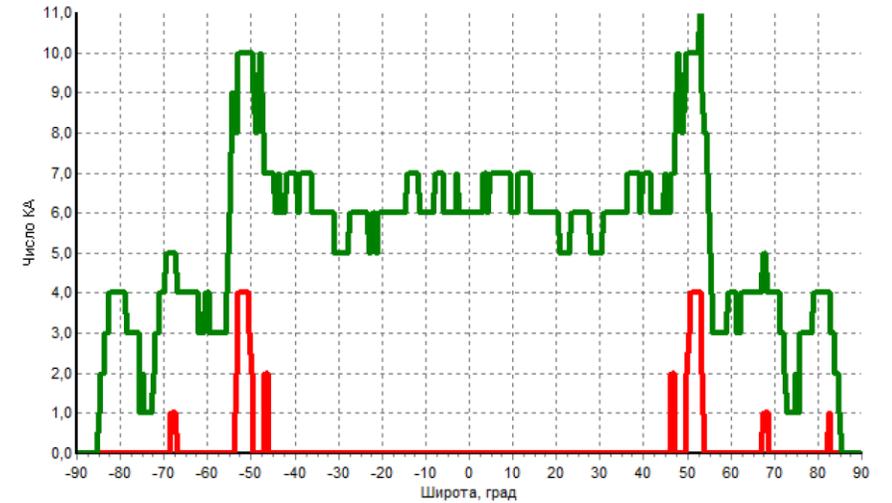
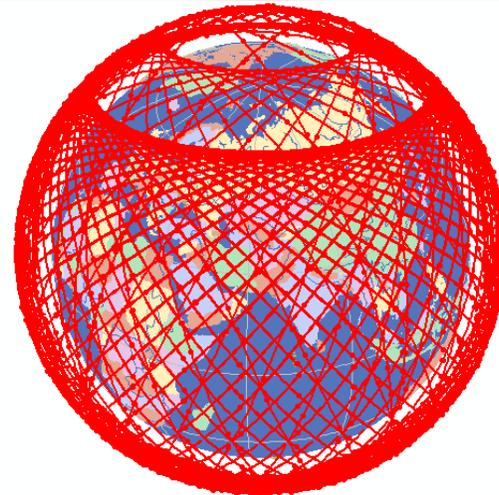
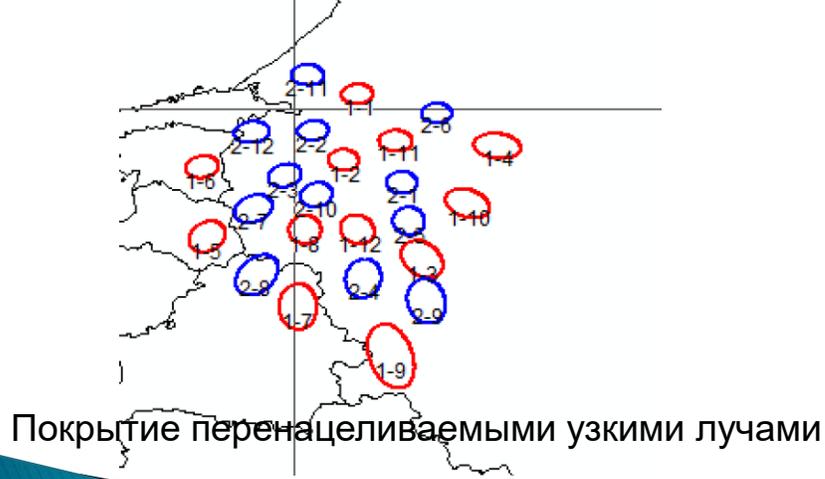
Конфигурация 2 (использование PH Falcon 9)

№	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
					29 996

Система StarLink



а) по состоянию на 01.04.2022 (более 1600 КА)



б) после полного развертывания



Схема развертывания ОГ системы Starlink

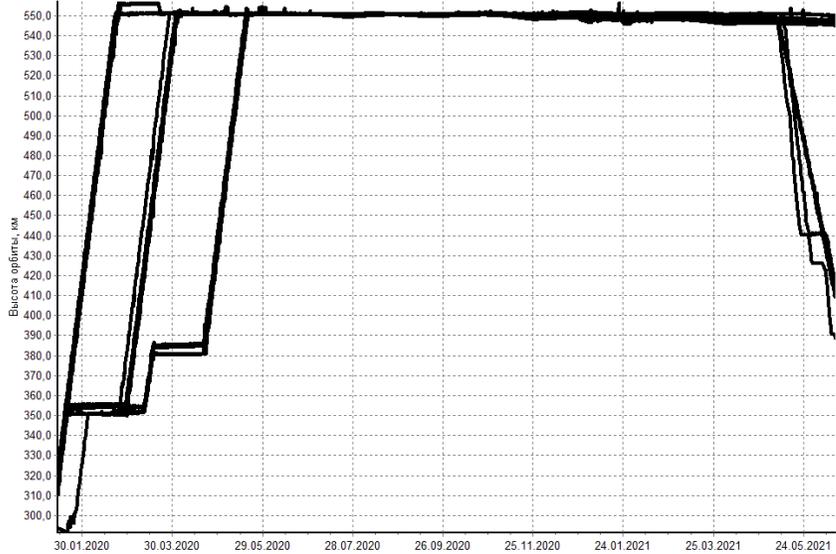


Рис.1 Графики изменения высоты КА из состава группового запуска (57 КА) системы StarLink от 07.01.2020 ($i=53$ град, время развертывания в рабочих плоскостях: 1,5 мес+1,5 мес + 1.5 мес.)

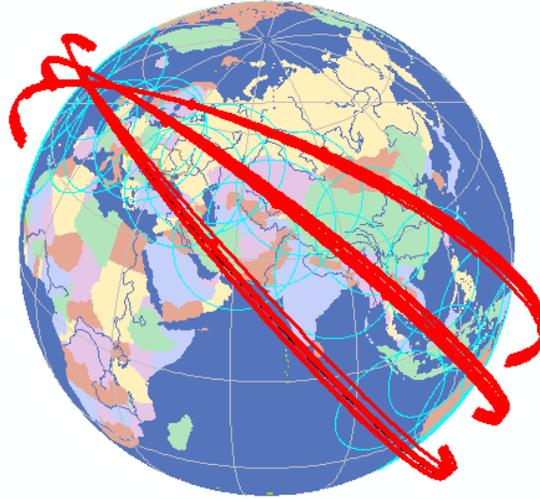
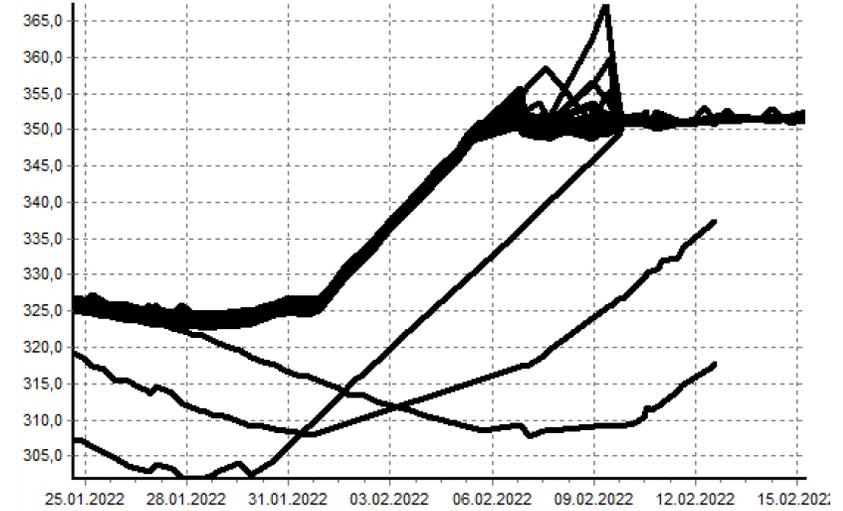
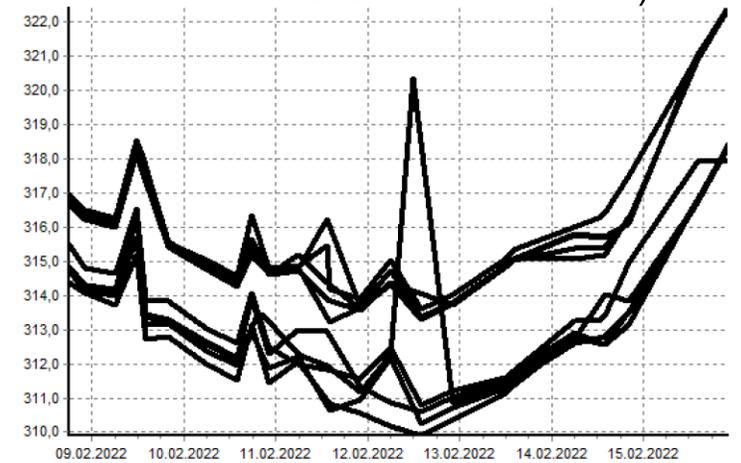


Рис.2 Результат : через 4,5 мес сформированы три плоскости ОГ системы StarLink



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 8



Система ОЗВ и проект ОЗВ mPower

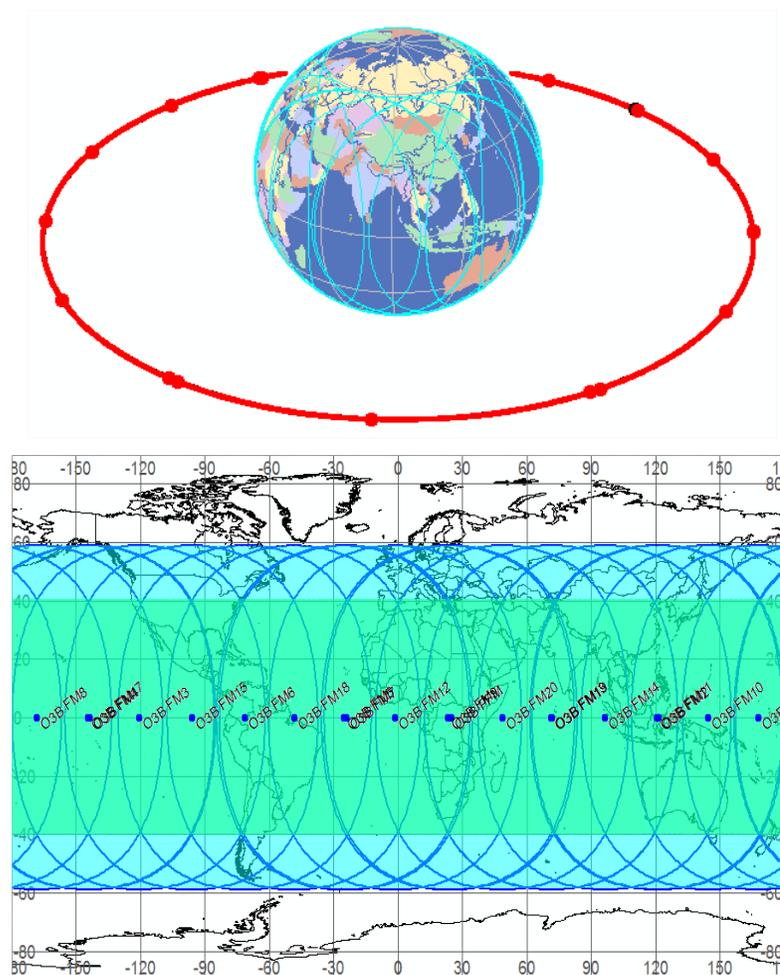


Рис.1. Гарантированная зона радиовидимости (ГЗРВ) при УМ=5°



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»

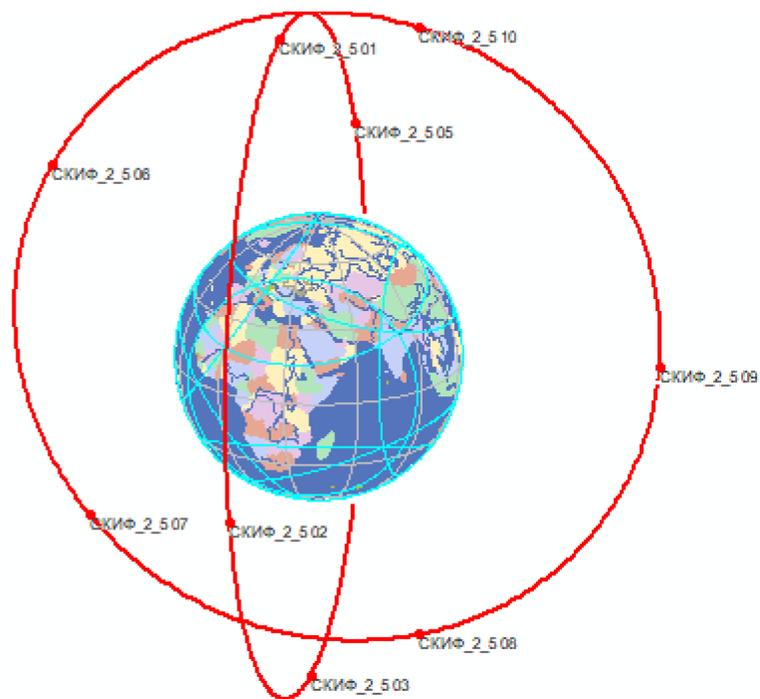


Рис.1. ОГ проекта системы «СКИФ» (10 КА)

Космический сегмент:

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

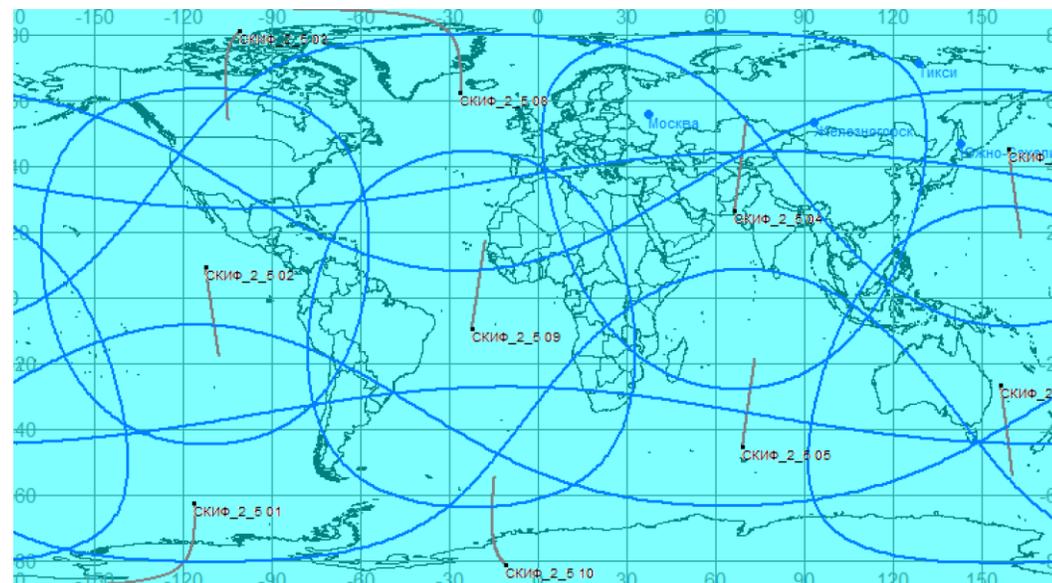


Рис.2. Мгновенная зона радиовидимости системы (УМ=10 град)

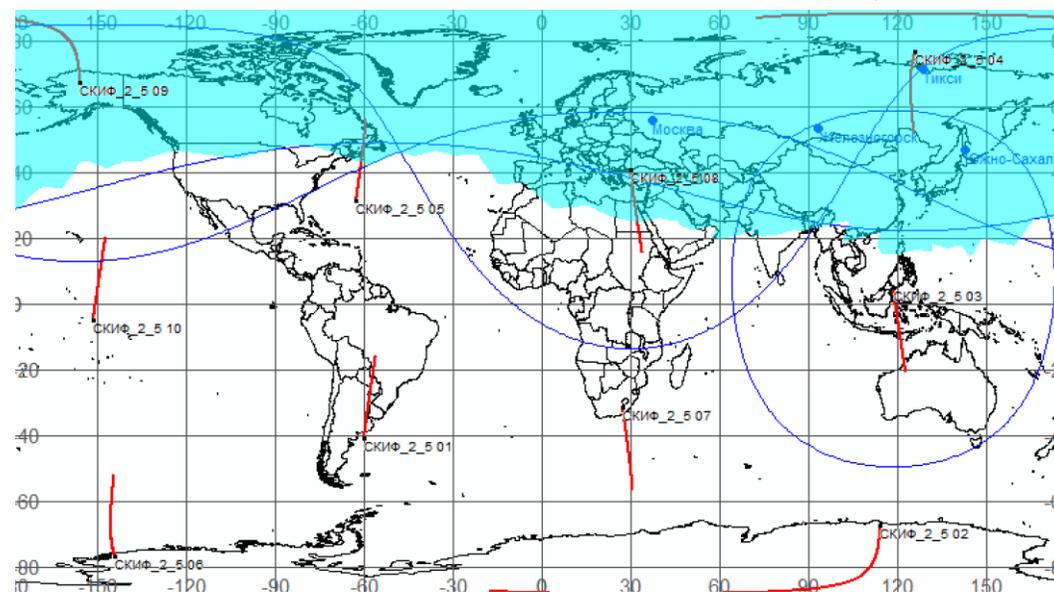


Рис.3. Зона обслуживания системы (российский сегмент шлюзов)

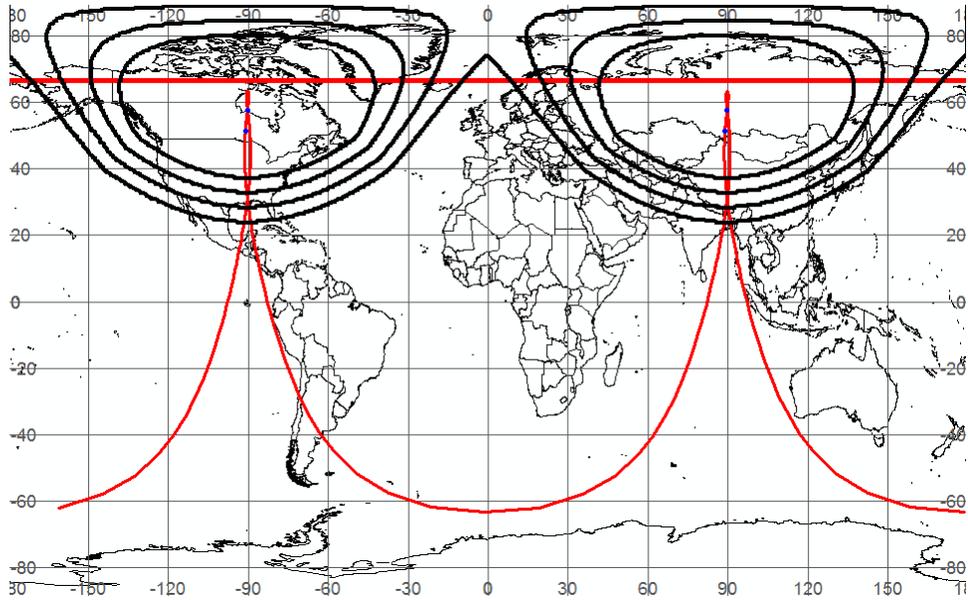


Рис.1. Гарантированные зоны радиовидимости (ГЗРВ) для углов места 45, 50, 55 и 60 град

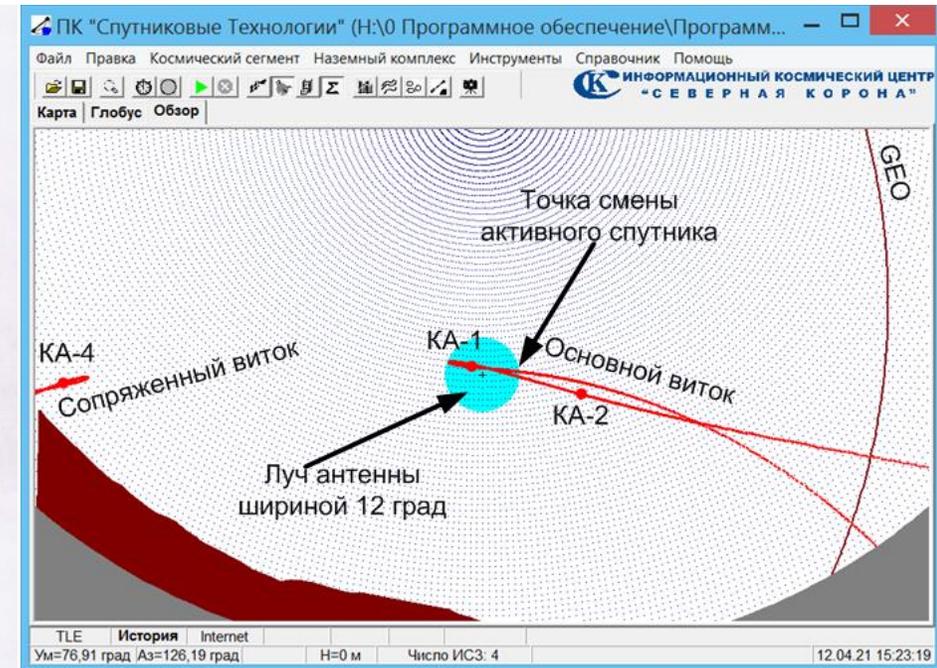


Рис.1. Принцип формирования «виртуальных» позиций

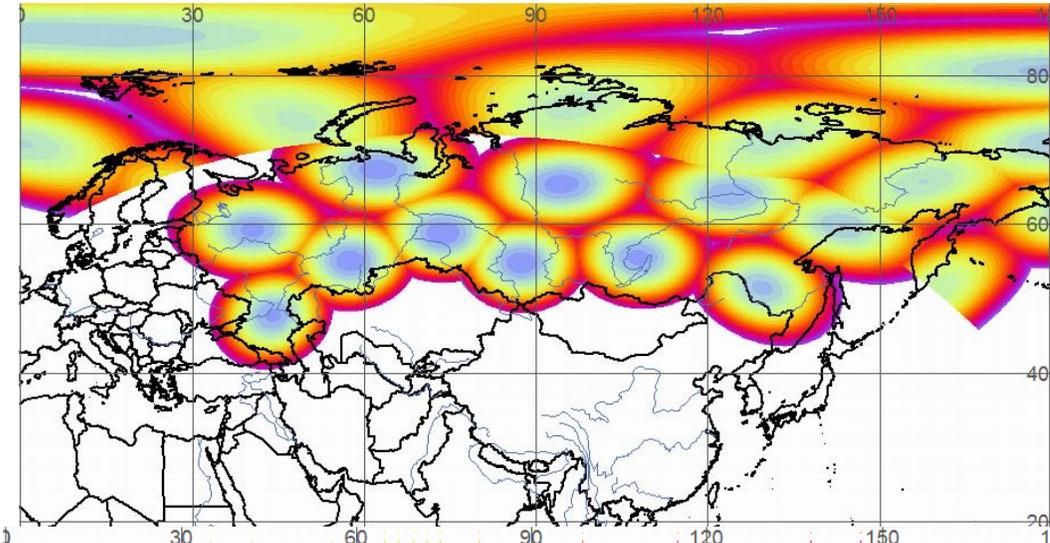
Основная проблема: абонентские станции достаточно дороги для массового использования

Основные характеристики:

- Тип орбиты – ВЭО (Кентавр)
- Число КА – 4
- Диапазон частот – Ки
- 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

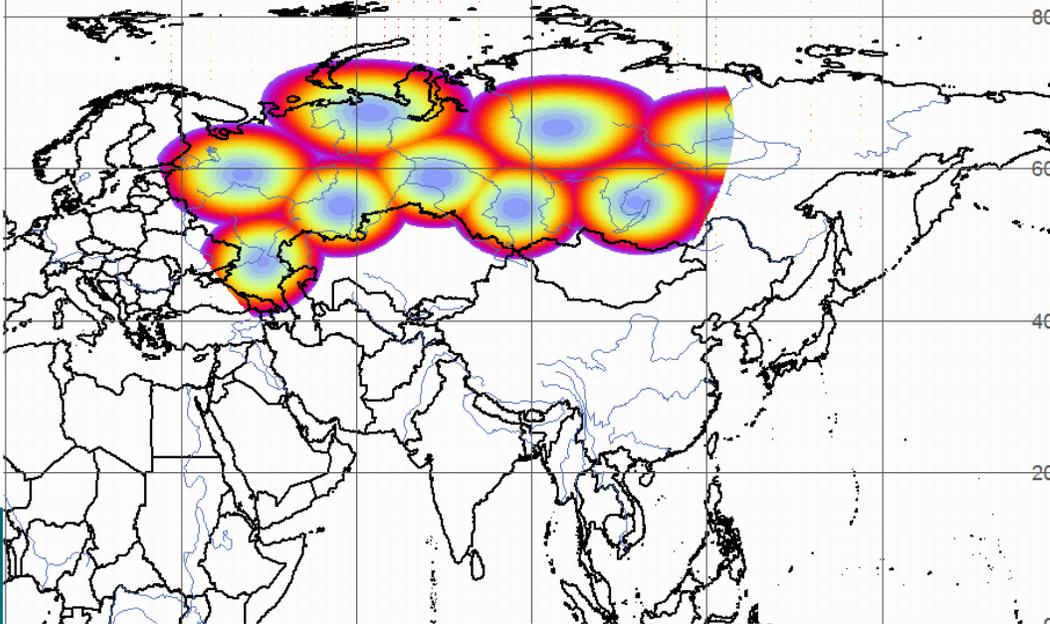


Зона обслуживания системы «Экспресс-РВ»

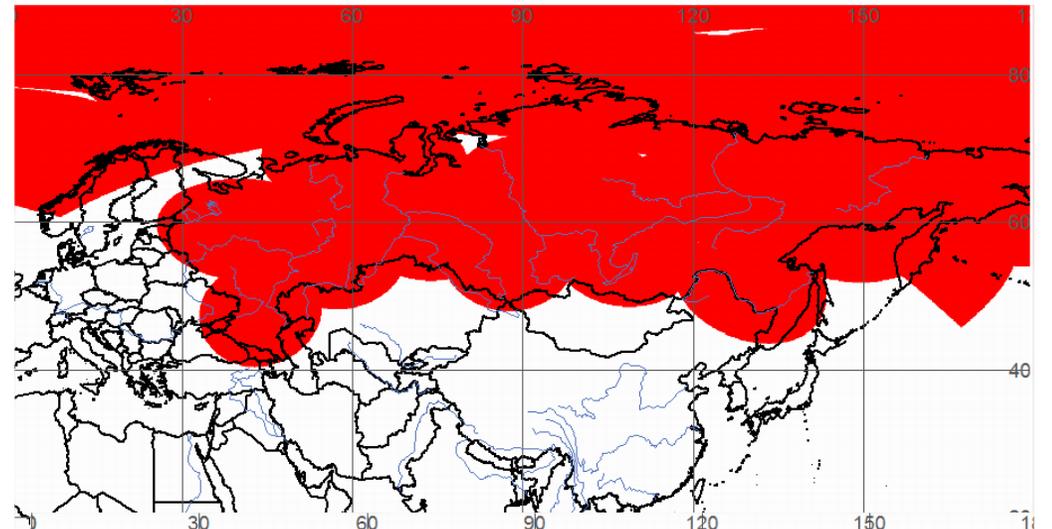


УМ=30 град

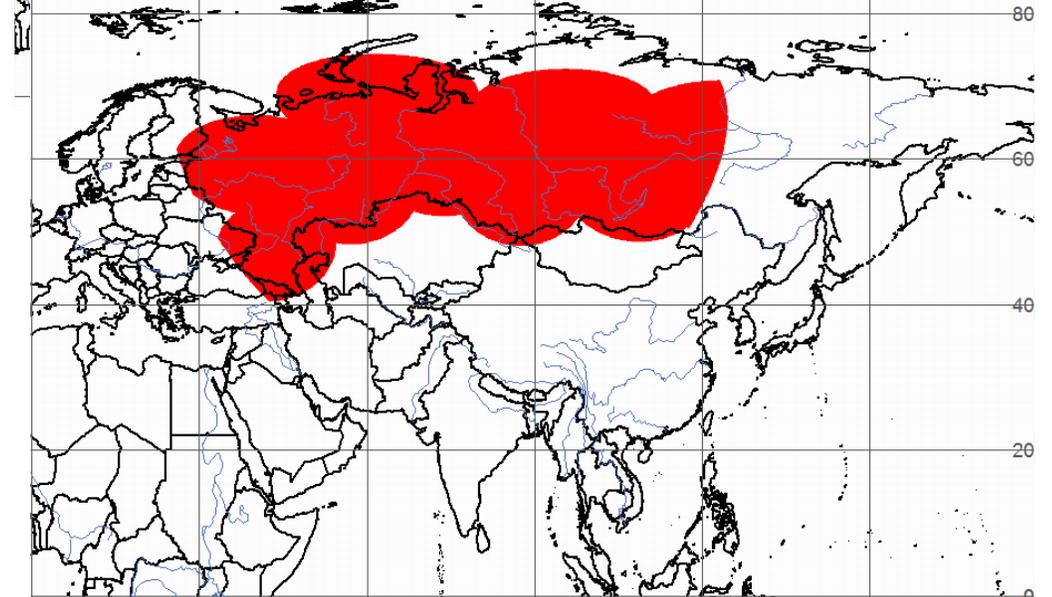
Парциальные лучи

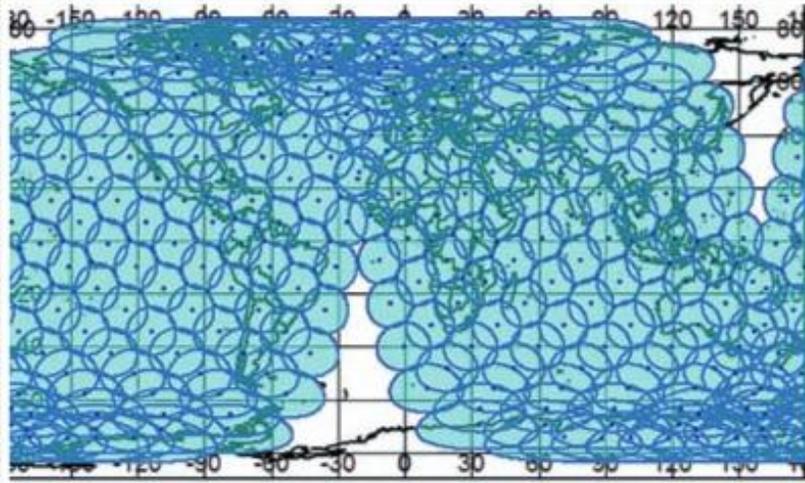


УМ=60 град

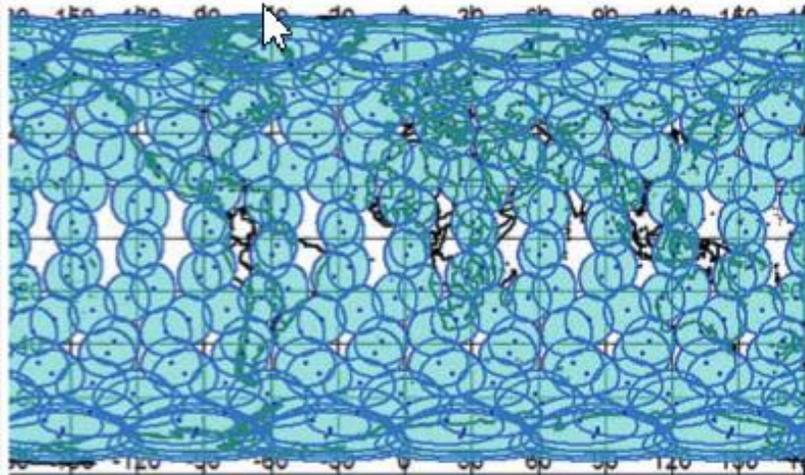


Интегральное покрытие

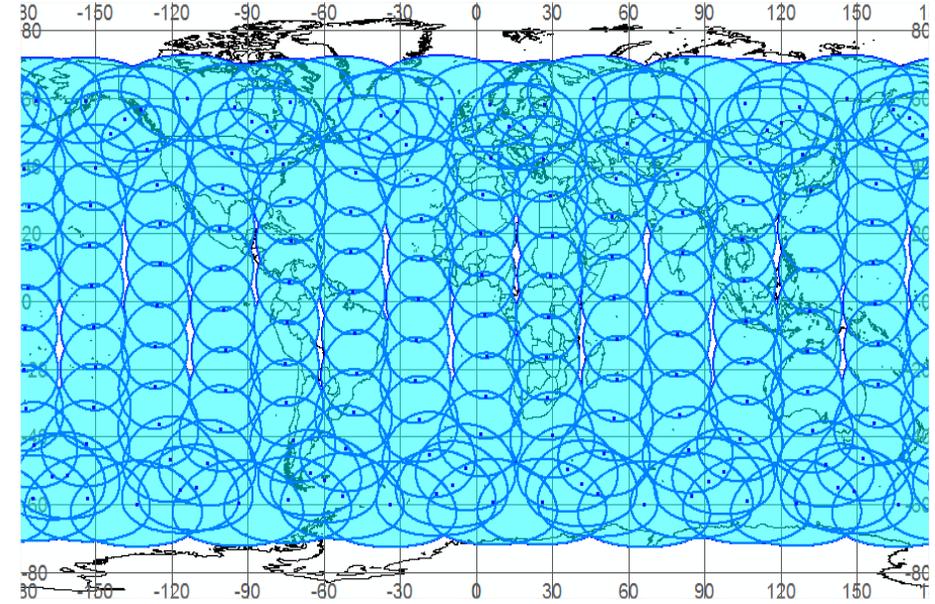




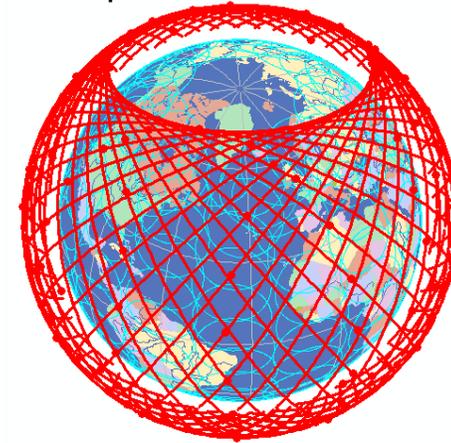
а) Наклонные орбиты, конструкция Уолкера



б) Наклонные орбиты, Дельта-конфигурация



в) Наклонные орбиты, оптимальная конфигурация



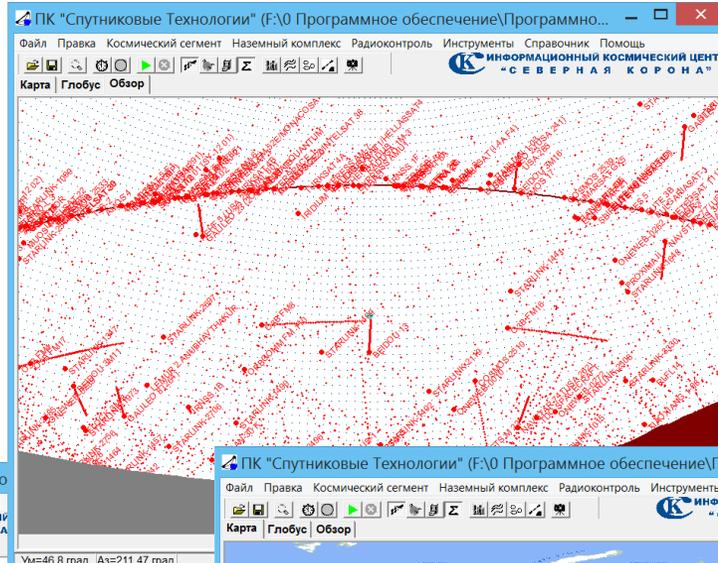
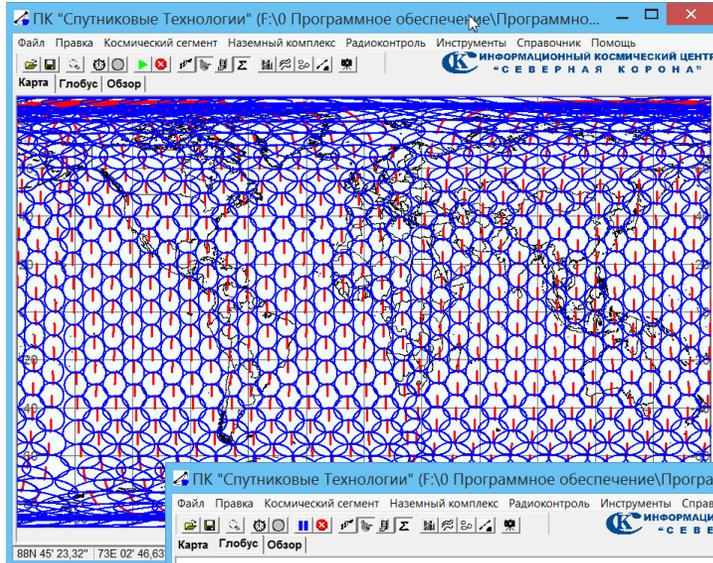
1. Достижимый эффект: гарантированное покрытие одной и той же территории меньшим числом спутников

2. Подана заявка на выдачу патента на изобретение



САПР «Альбатрос»

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



Альбатрос-Бюджет (Локальная)

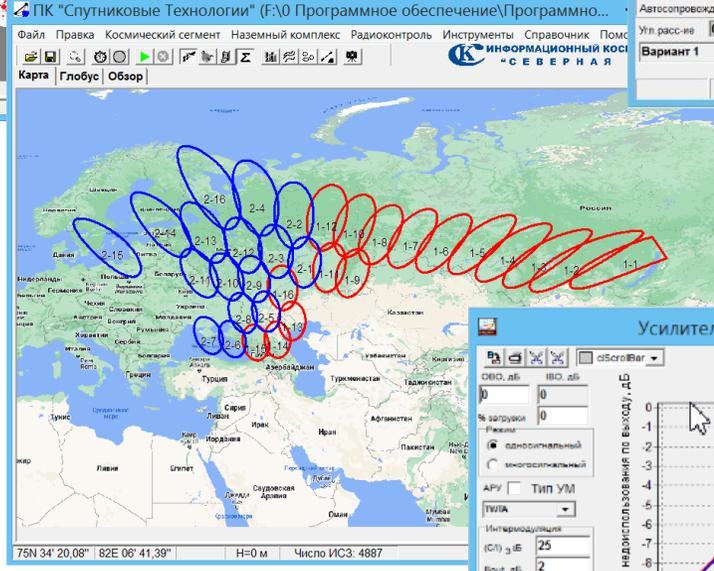
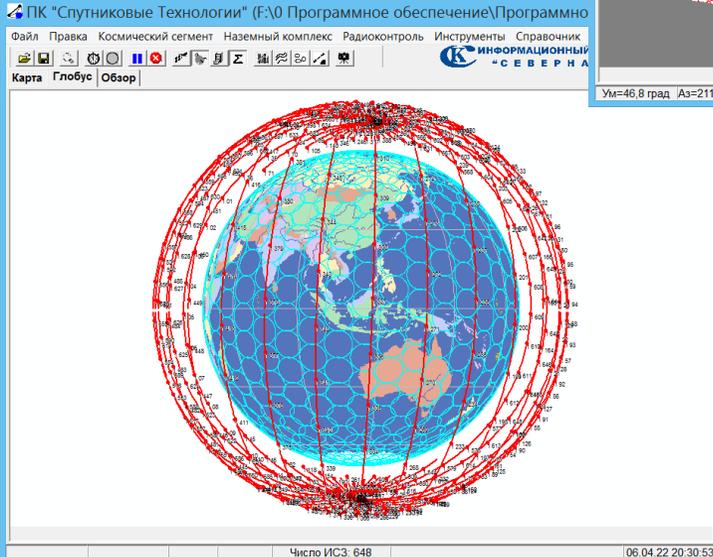
Файл Сервис Отчет Справка

Центральная земная станция		Трасса		Спутник связи		Трасса		Периферийная ЗС	
Модем	АФУ	Наименование КА	Позиция, град	Наименование КА	Позиция, град	Модем	АФУ	Модем	АФУ
FEC	Модуляция	Без имени	36,0	Без имени	36,0	ИС/И, дБ	Е/И, дБ	ИС/И, дБ	Е/И, дБ
нет	ВРФК	ИВО, дБ	0	ИВО, дБ	0	6,43	7,22	6,43	7,22
Риско-С	V, кбит/с	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт
нет	0,4	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт
ИВО, дБ	0,2	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт
Е/И, дБ	6,43	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт
ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт
ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт
ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	18,345	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт	ИЗИМ, дБВт

Центральная ЗС: Широта, град 60,0; Долгота, град 36,0; Высота, м 162,0; Угол места 21,933; Азимут 180,0; Дальность, км 39364; Т, С 1,5; Инт. дождя 30,909; Водяной пар 13,139; Автосопровождение ; Упл. рас-ие 0; Вариант 1

Периферийная ЗС: Широта, град 60,0; Долгота, град 36,0; Высота, м 162,0; Угол места 21,933; Азимут 180,0; Дальность, км 39364; Т, С 1,5; Инт. дождя 30,909; Водяной пар 13,139; Автосопровождение ; Упл. рас-ие 0

23.07.20 09:47:40



Спутники связи

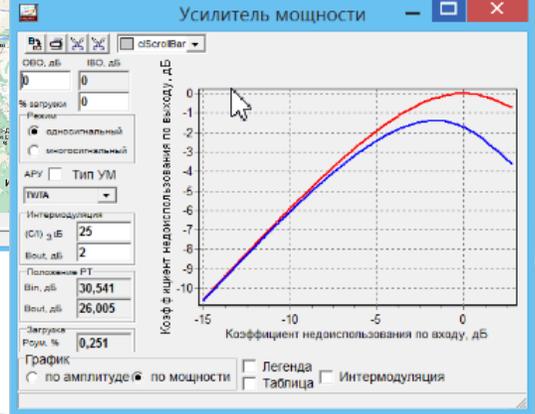
Файл Вид

Космический аппарат

Наименование	Общие данные	Антенны	Усилители мощности	Стволы	ЧТП
Ямал-601	Ствол	Параметры ствола	Параметры линии		
Ямал-402	Ствол	Полоса, МГц	Полоса, МГц		
Ямал-401	Ствол	ОВО, дБ	Частота, МГц		
Ямал-202	Ствол	SFD, дБВт/м2	№ луча		
Ямал-300К	Ствол	Антенна ПРМ	Поляризация		

Параметры ствола: Полоса, МГц 500; Тип УМ: 1; ОВО, дБ 2,5; ИЗИМ луча, дБВт 64,5; SFD, дБВт/м2 -81,8; Г/Т луча, дБ/К 16,8; Антенна ПРМ AntFider1-4Msk; "Вверх"; Фидерная; Антенна ПРД AntUserPRD; "Вниз"; Абонентск;

Параметры линии: № 1; Полоса, МГц 225; Частота, МГц 27625; 19825; № луча 1; 5; Поляризация RHCP; RHCP





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 и, соответственно, в ближайшей перспективе маловероятна.
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. 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.



Информационный Космический Центр «Северная Корона»

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