



Негеостационарные спутниковые системы — конкуренция или синергия?

Гриценко Андрей Аркадьевич

Генеральный директор, кандидат технических наук

ФОРУМ CSTV.TELECOM&MEDIA'2018

Секция «МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СЕТИ И VSAT.

**Перспективные спутниковые технологии связи и вещания в приложении
к российскому рынку»**

Крокус Экспо, Москва, 31 января 2018 г



Ключевые факторы в системах спутниковой связи

Фактор №1 – используемый диапазон частот

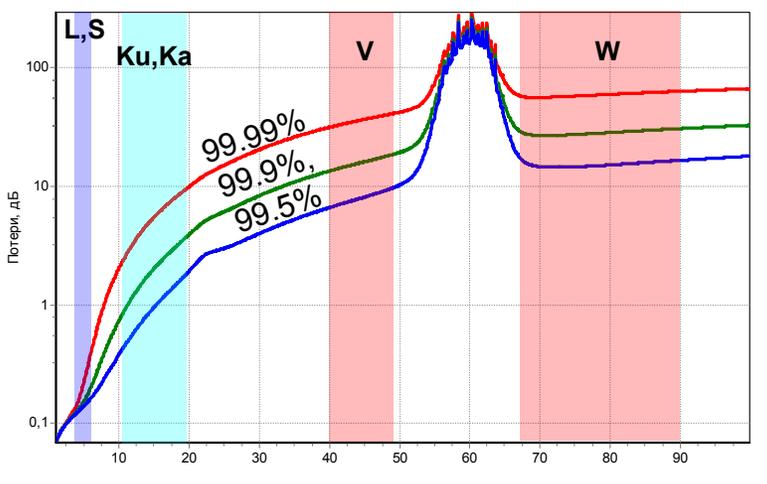


Рис.1 Поглощение в (атмосфера+дождь+облака+сцинтилляции) на участке «Космос-Земля» для УМ=90 град в полосе 1...100 ГГц для г. Санкт-Петербург

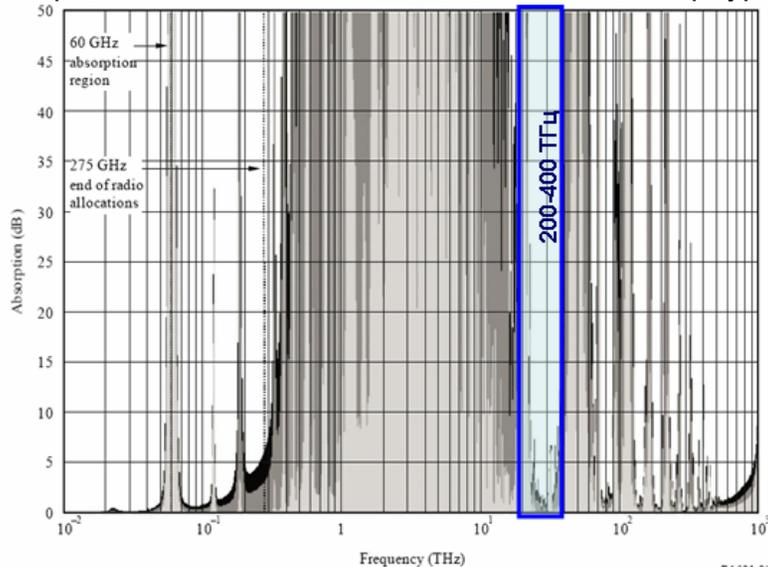


Рис.3 Поглощение в атмосфере на участке «Космос-Земля» в полосе 200 ... 400 ТГц

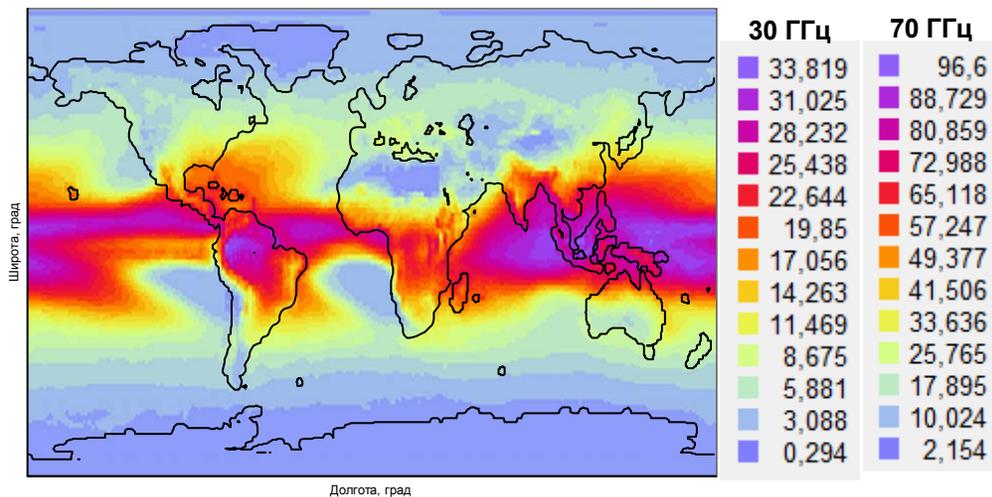


Рис.2 Карта потерь на участке «К-3» (УМ=90 град, P=99.5%)

Некоторые выводы:

- **L,S диапазоны** – «золотые» для узкополосных систем подвижной радиосвязи (тдф, низкоскоростная ПД); простые абонентские станции; малые затухания на трассах; но – малая доступная полоса и проблемы ЭМС; следовательно новые проекты маловероятны, развитие действующих систем
- **Ku и Ka диапазоны** – «золотые» для спутниковых сетей непосредственного вещания и высокоскоростной ПД; есть потери в дожде и облаках, но могут быть скомпенсированы; наиболее оптимальны для реализации новых систем высокоскоростной ПД;
- **V и W диапазоны** - значительные потери в дожде для около экваториальных регионов Земли; наиболее «удобны» для построения фидерных линий, а также для региональных систем с высоким Кг или глобальных систем непостоянной готовности
- **Оптический диапазон** –перспективы для сверхвысокоскоростных систем, но требует детальной проработки применения



Ключевые факторы в системах спутниковой связи

Фактор №2 – малые углы места (УМ)

а) Затенение

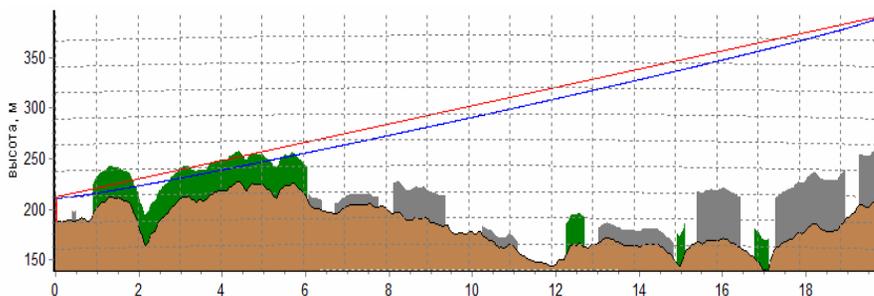


Рис.1 Ослабление сигнала при затенении (дифракция)

б) Отражения

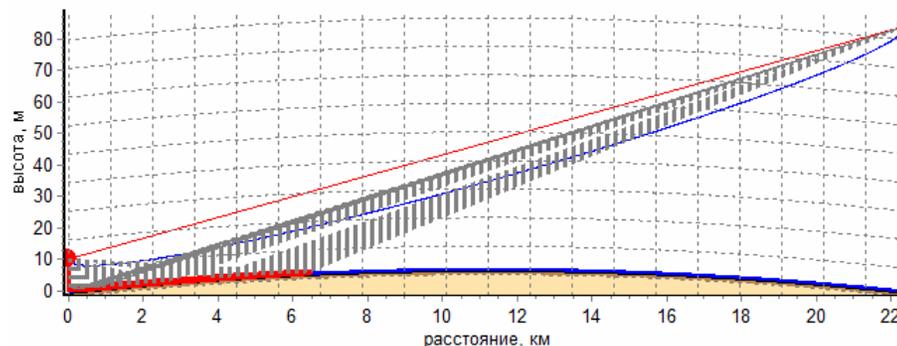


Рис.2 Ослабление/мерцание сигнала при отражениях (на малых УМ)

в) Дополнительные потери

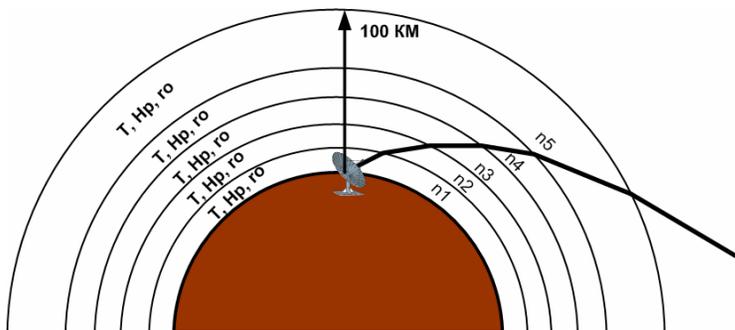


Рис.3 Увеличение длины пути сквозь атмосферу (на малых УМ)

г) Ограничения ППМ

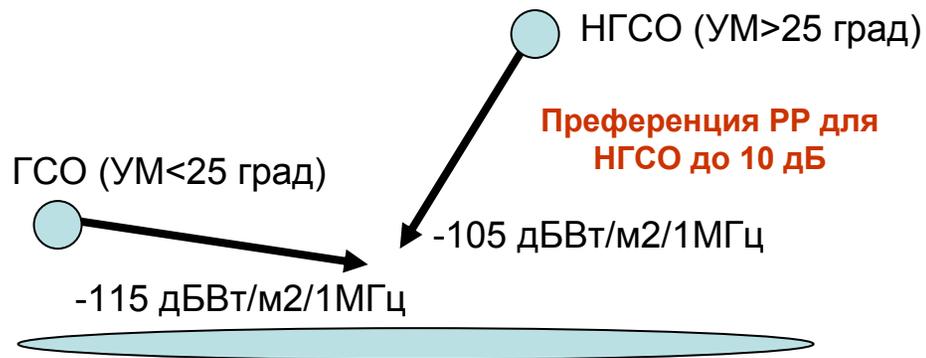


Рис.4 Ограничения РР на макс. значения ППМ при малых УМ



Ключевые факторы в системах спутниковой связи

Фактор №2 – малые углы места

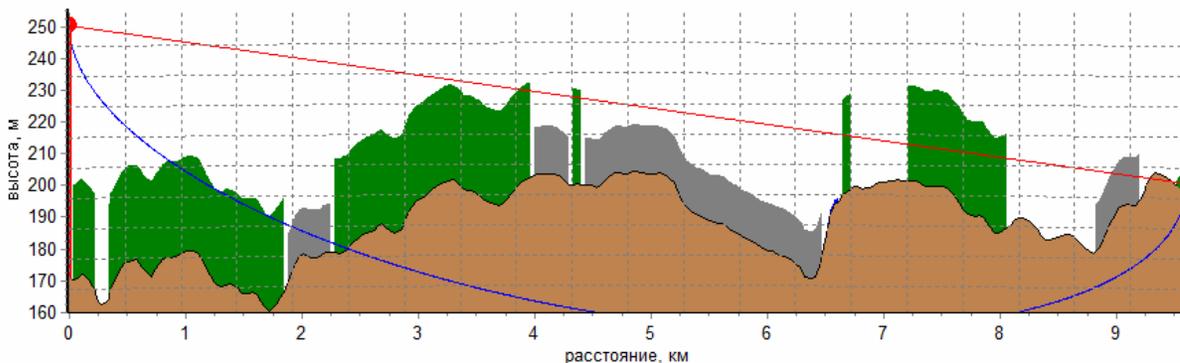


Рис.1 Типовой пример наземной радиолинии

ТТХ наземной радиолинии:

-диапазон частот:	160 МГц;
-дальность:	10 км;
-мощность ПРД:	10 Вт;
-усиление ант. ПРД:	10 дБи;
- потери на рельефе(*):	30 дБ;
-усиление ант. ПРМ:	0 дБи;
-чувствительность:	-104 дБм;
-Р сигнала на входе:	- 76.6 дБм;
- запас на линии:	27,4 дБ;
- надежность:	99,5%.

(*) - в соответствии с Рек. Р.530-17

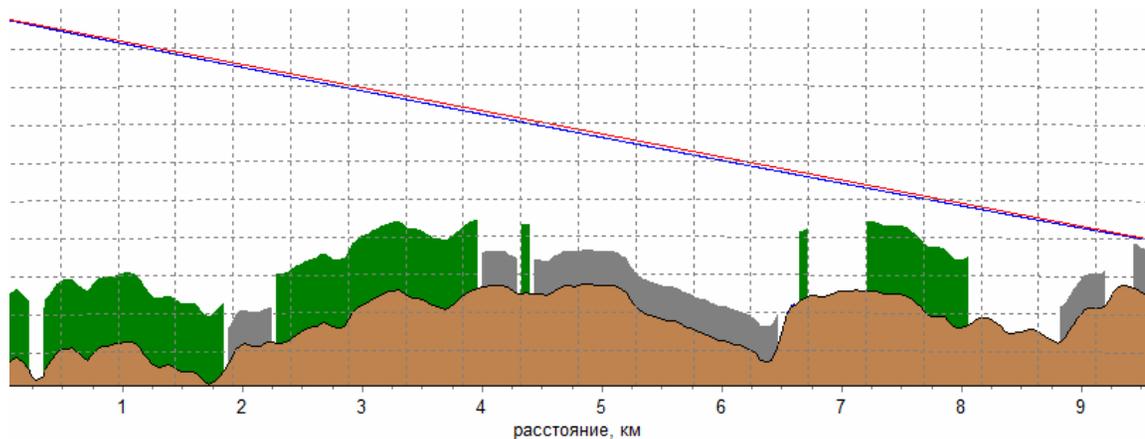


Рис.2 Типовой пример спутниковой радиолинии

Особенности эксплуатации:

- не предусматривается компенсация дифракционных потерь;
- необходимо обеспечить прямую видимость на спутник
- для стационарной станции – необходимо предварительно выбрать место развертывания;
- для подвижного абонента – переместиться в точку, где на спутник есть прямая видимость



Ключевые факторы в системах спутниковой связи

Фактор №2 – малые углы места

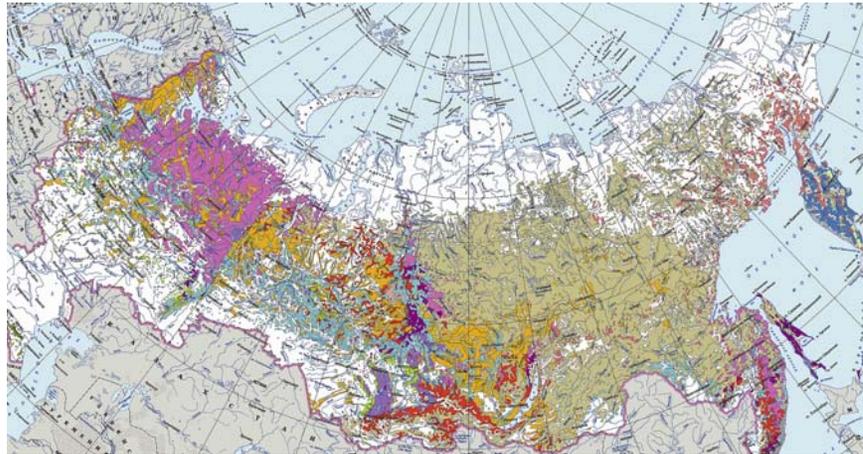


Рис.1 Карта лесов России – леса занимают более 60% территории



Рис.2 Автомобильная дорога, район Орехово-Зуево, лес: сосна высотой 18...22 м

Особенности эксплуатации в России:

- более 60% территории занимают леса;
- типовая полоса отвода на железных дорогах: 20..30 м;
- типовая полоса отвода на автомобильных дорогах: 30..50 м



Рис.3 Железная дорога, район Орехово-Зуево, лес: береза, сосна высотой 17...20 м



Ключевые факторы в системах спутниковой связи

Фактор №2 – малые углы места

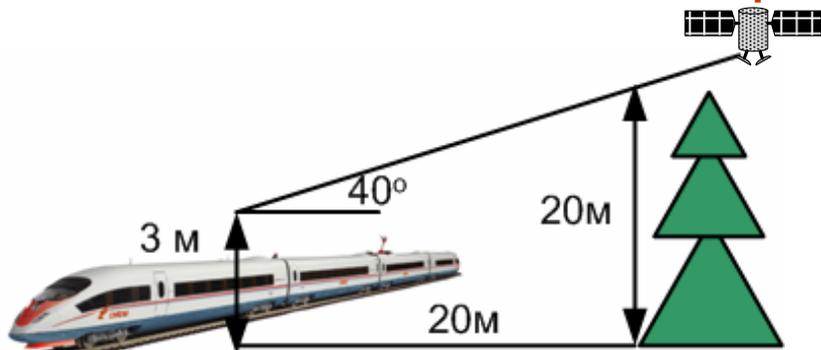


Рис.1 Железнодорожные магистрали: типовые углы перекрытия для локомотивной АС составят **около 40 град**

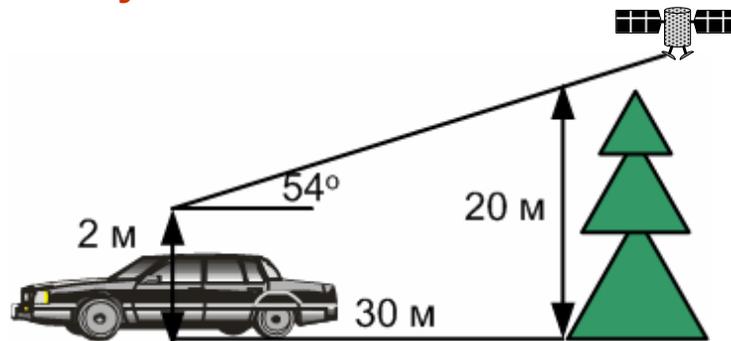


Рис.2 Автомобильные магистрали: типовые углы перекрытия для автомобильной АС составят **более 50 град**

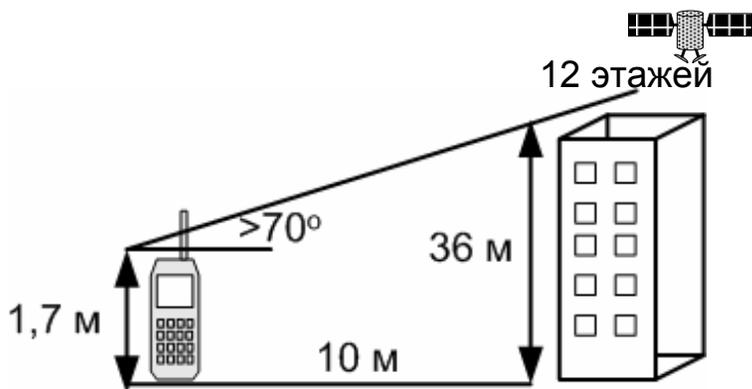
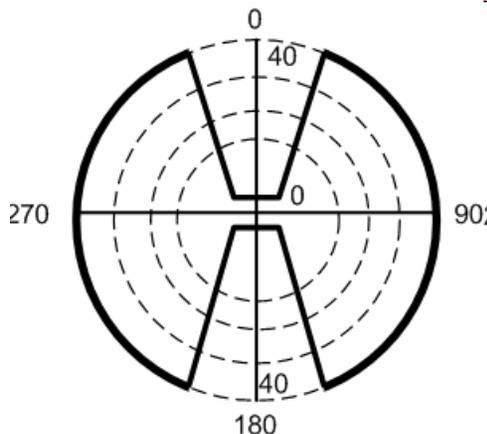
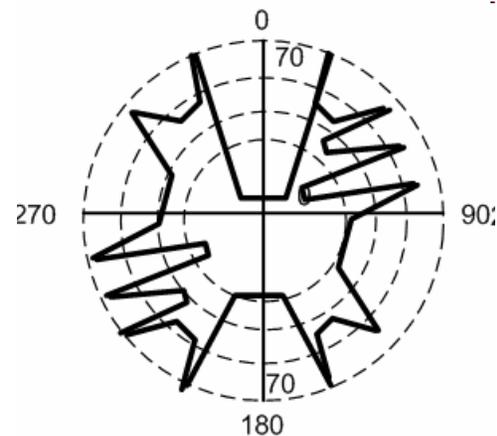


Рис.3 АС в условиях города: углы перекрытия могут **превышать 70 град**



б) на авто- и ж.д магистрали



б) в городских условиях

Рис.4 Типовая диаграмма радиогоризонта



Ключевые факторы в системах спутниковой связи

Фактор №3 – ограничение ППМ на линии «вниз»

Ограничение по ППМ на поверхности Земли от КА (дБВт/м²/1МГц):

	Q<5	5<Q<25	Q>25
- в Ku-диапазоне	-124	$-124+0.5*(Q-5)$	-114
- в Ka-диапазоне	-115	$-115*0.5*(Q-5)$	-105

Q – угол места, град

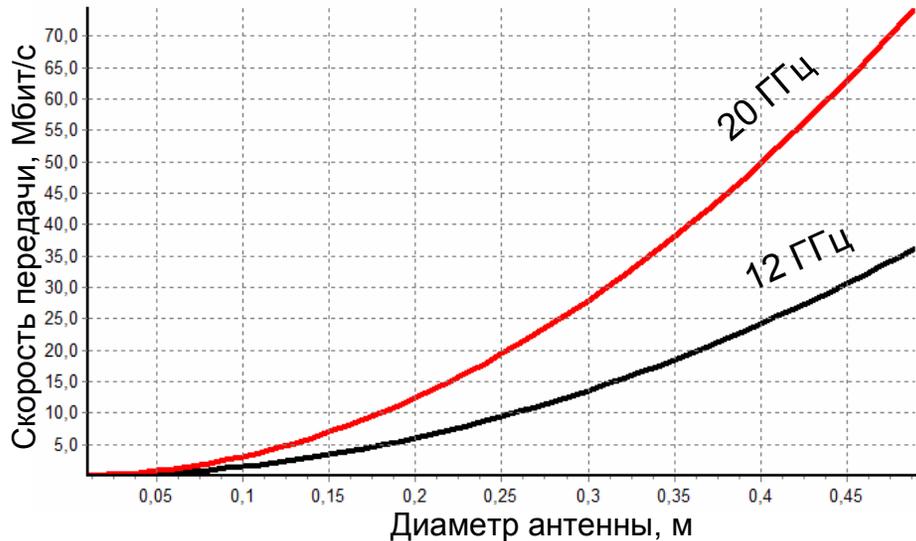


Рис.1 График зависимости предельной скорости в полосе 1 МГц (на линии «вниз») от диаметра антенны абонентской станции (12 ГГц: $E_b/N_0=10$ дБ, $T_{ш}=90$ К и 20 ГГц: $E_b/N_0=15$ дБ, $T_{ш}=110$ К)

Предварительные выводы:

- максимальная скорость передачи обеспечивается при достижении предельных значений ППМ у поверхности Земли;
- в качестве примера, на терминал с антенной диаметром 10 см в полосе 1 МГц можно передать поток: 1.5 Мбит/с (ССК: QPSK, FEC 3/4) в Ku-диапазоне или до 3 Мбит/с (ССК: 16QAM, 3/4) в Ka-диапазоне;
- для углов места ниже 25 град предельное значение ППМ должно быть снижено на 10 дБ, предельная скорость также существенно снижается;



Системы на геостационарной орбите (ГСО)

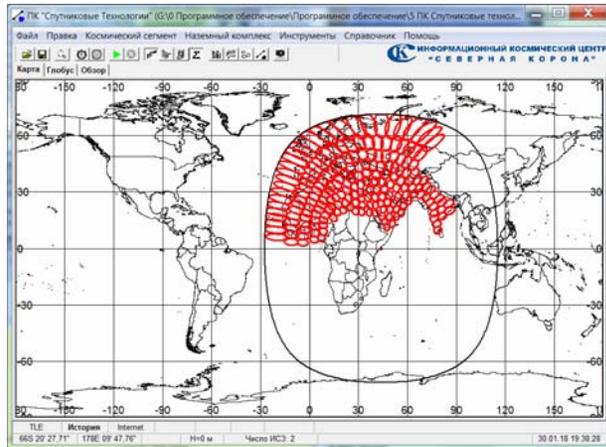


Рис.1 Оценка покрытия КА Thuraya, 44 град в.д., L-диапазон, антенна 16 м, 200 лучей шириной 0.6 град

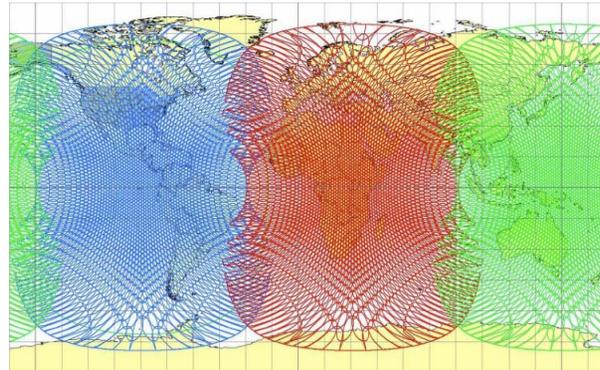


Рис.2 Viasat-3

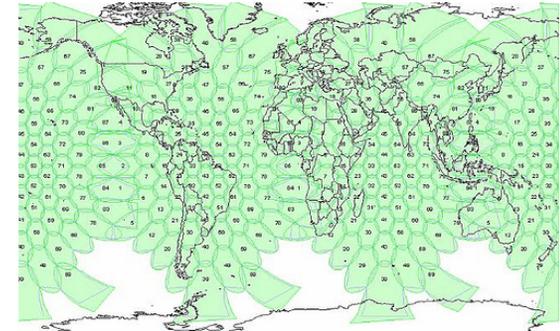


Рис.3 Inmarsat-5 Global Xpress

SES-12, SES-14 and SES-15 HTS spot beam footprints

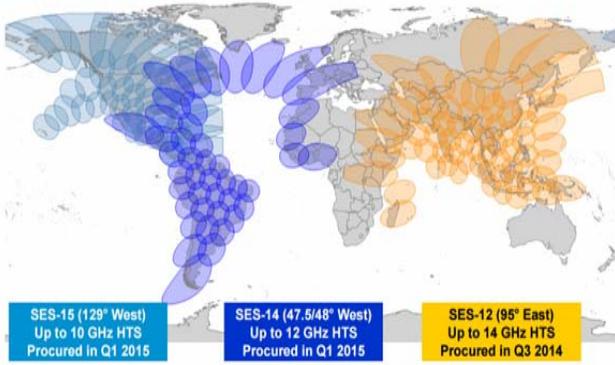


Рис.4 SES-12, -14, -15

Геостационарные системы:

- в L-диапазоне практически невозможно скоординировать новые системы, следовательно, будут модернизироваться действующие (Thuraya, Inmarsat, Terrestar и др.);
- в Ku и Ka диапазонах будут разворачиваться новые системы

Однако, в большинстве ключевых параметров системы на ГСО практически достигли пределов:

- дальнейшее уменьшение ширины луча (менее 0.2 град) не приведет к увеличению скорости, так как вырастут межлучевые помехи (отношение C/I фактически не изменится);
- увеличение числа лучей приводит к росту потребной мощности системы энергоснабжения (СЭС), увеличению площади и массы солнечных батарей, необходимость использования еще более тяжелых РН;
- тактические решения (адаптивная модуляция, «несущая в несущей» и т.д.) ситуацию принципиально не изменят



Системы на геостационарной орбите (ГСО)

ГЗРВ (гарантированная зона радиовидимости) – часть территории Земли, где в течение заданного процента времени $P\%$ наблюдается не менее N спутников системы на углах места, не менее $Ум$.

ГЗРВ – одна из ключевых характеристик многоспутниковых систем.

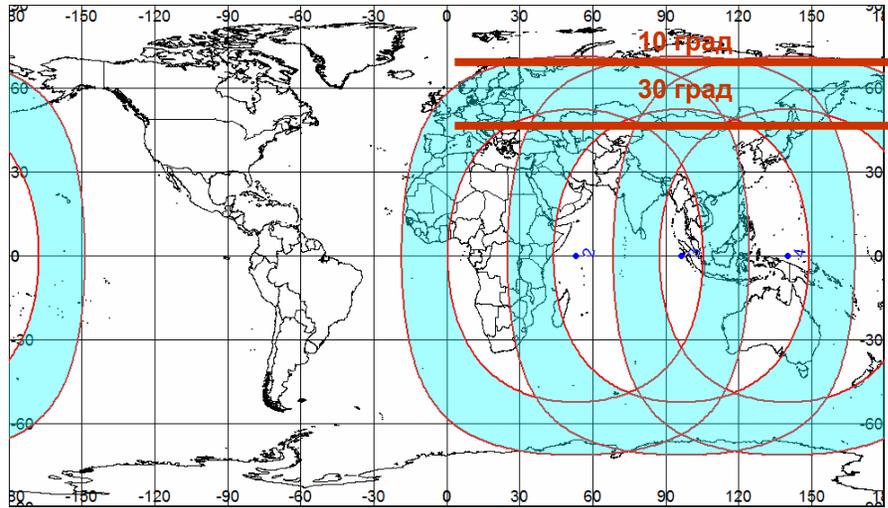


Рис.1 ГЗРВ системы из 3-х КА на ГСО ($P=100\%$, $N=1$, $30 < Ум < 10$ град)

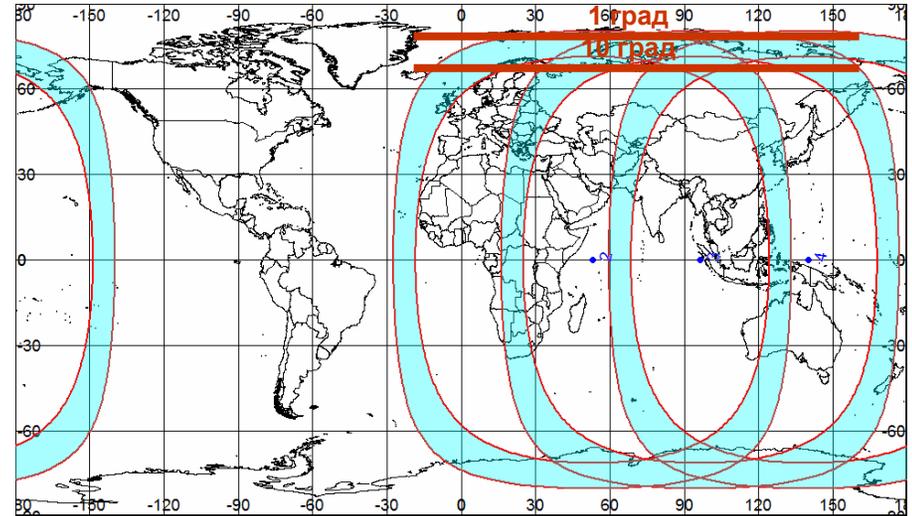


Рис.2 ГЗРВ системы из 3-х КА на ГСО ($P=100\%$, $N=1$, $10 < Ум < 1$ град)

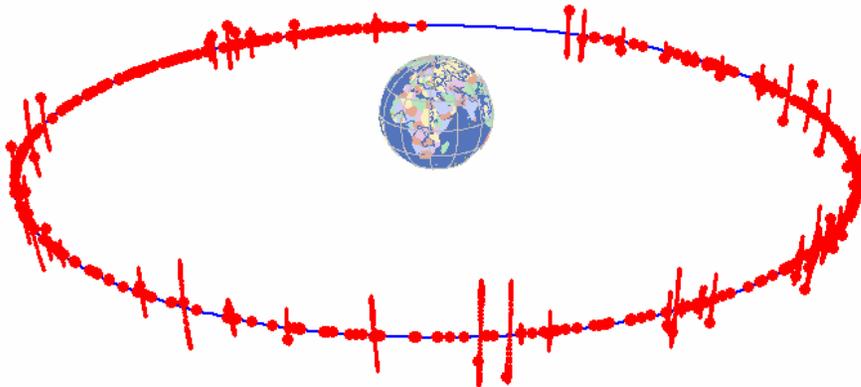


Рис.3 Ситуация на ГСО по состоянию на январь 2018

Выводы:

1. Максимальные углы места на ГСО по территории РФ не превышают 30 град;
2. Арктическая зона и Северный морской путь (СМП) обслуживаются на углах места менее 10 град
3. Типовые абонентские станции - стационарные;
4. Подвижная связь может быть реализована только «на остановке», с выбором места развертывания;
5. Могут использоваться системы подвижной связи, но с крайне низким коэффициентом готовности



Ключевые факторы в системах спутниковой связи

1. Атмосфера Земли

Срок баллистического существования КА на высотах

- 200 км – около 3-х дней;
- 300 км – около 20 дней;
- 400 км – около 4 мес;
- 500 км – примерно 1.2 года

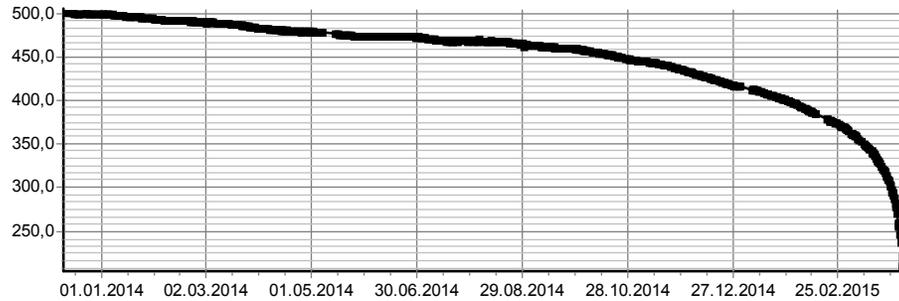


Рис.1 Уменьшение высоты орбиты спутника SENSE SV1 (САС составил около 1.2 года)

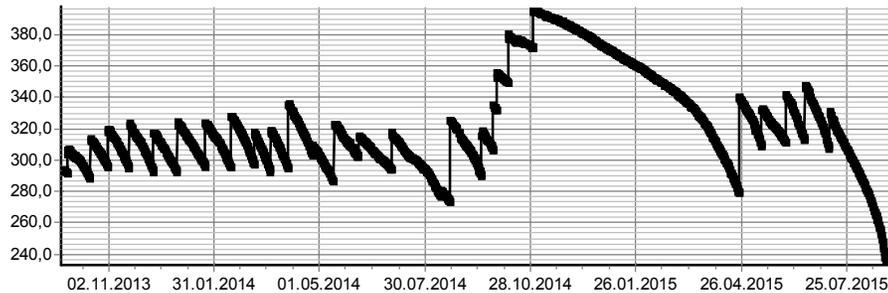
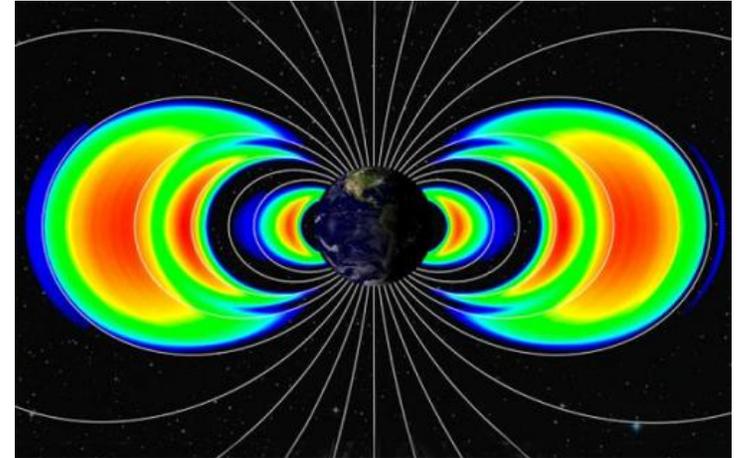
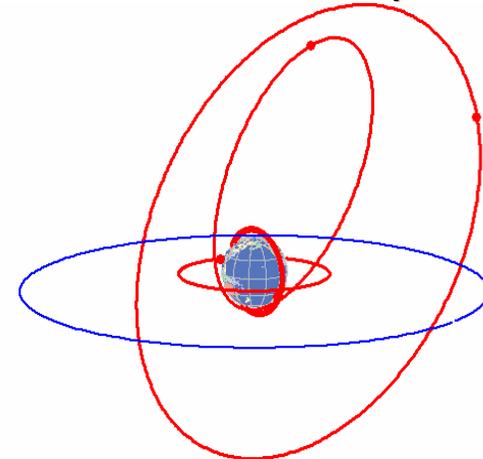


Рис.2 Работа системы коррекции спутника KUAIZHOU-1 по парированию влияния атмосферы

2. Радиационные пояса



Основные типы орбит



Основные типы орбит:

- GEO - геостационарная
- NEO высокоэллиптические (Молния, Кентавр, Тундра)
- MEO средние круговые
- LEO низкие круговые



Системы на ВЭО (региональные системы)

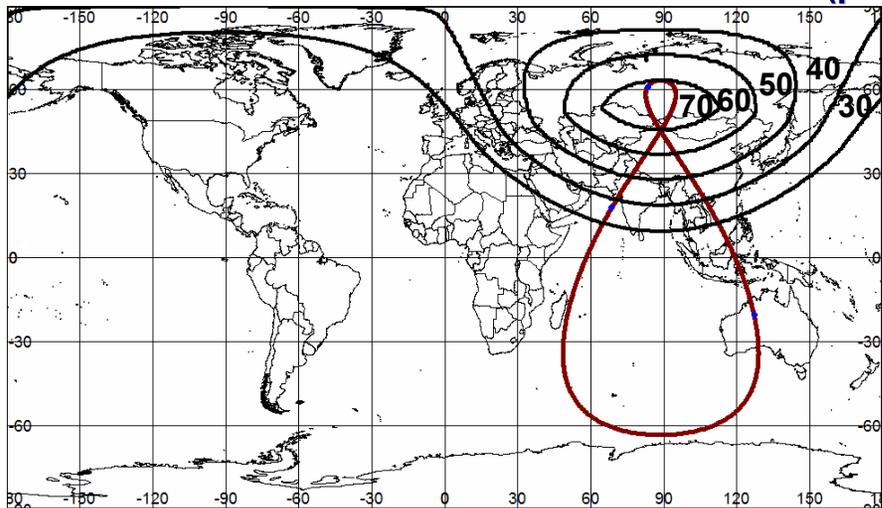


Рис.1 ГЗРВ системы из 3-х КА на орбите «Тундра»
(для УМ 30, 40, 50, 60 и 70 град)

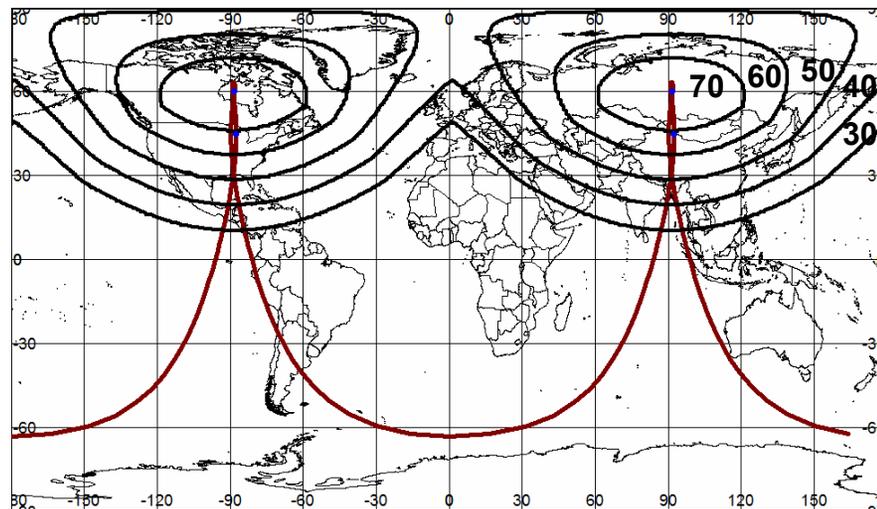


Рис.3 ГЗРВ системы из 4-х КА на орбите «Кентавр» (для
УМ 30, 40, 50, 60 и 70 град)

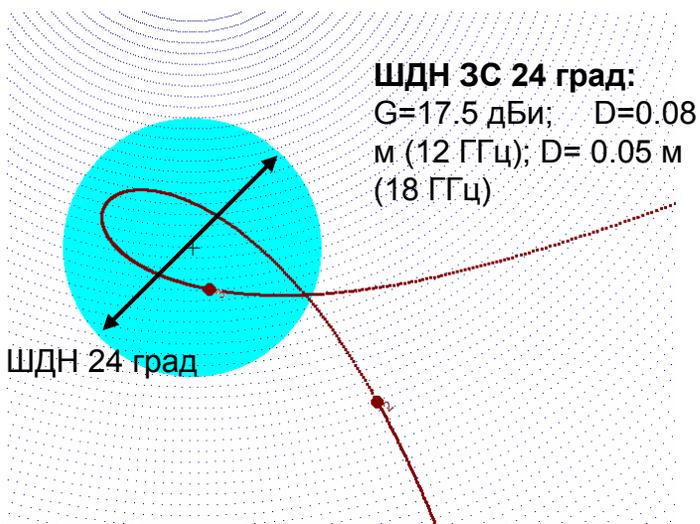


Рис.2 Трек спутников на орбите «Тундра», ДНА шириной 24 град, ЗС г. Москва

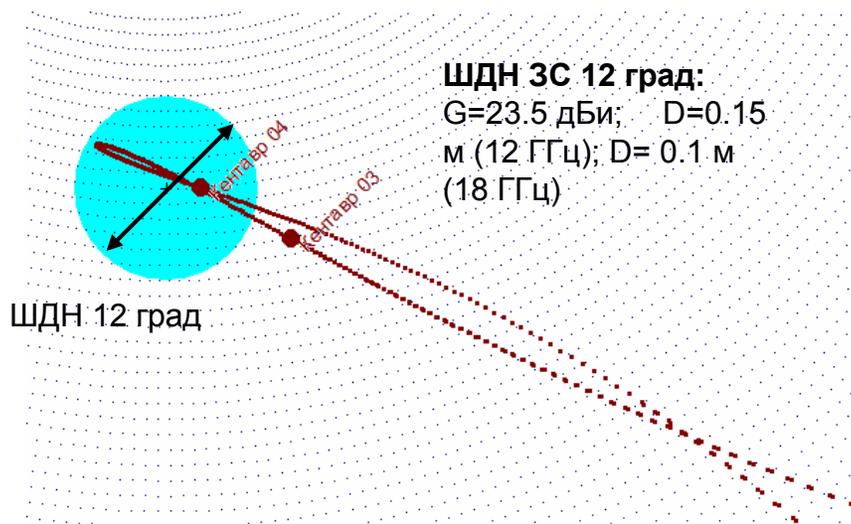


Рис.4 Трек спутников на орбите «Кентавр» в ДН (ширина 12 град) антенны ЗС (г. Москва)



Системы на ВЭО – «Росинфоком» (региональные системы)

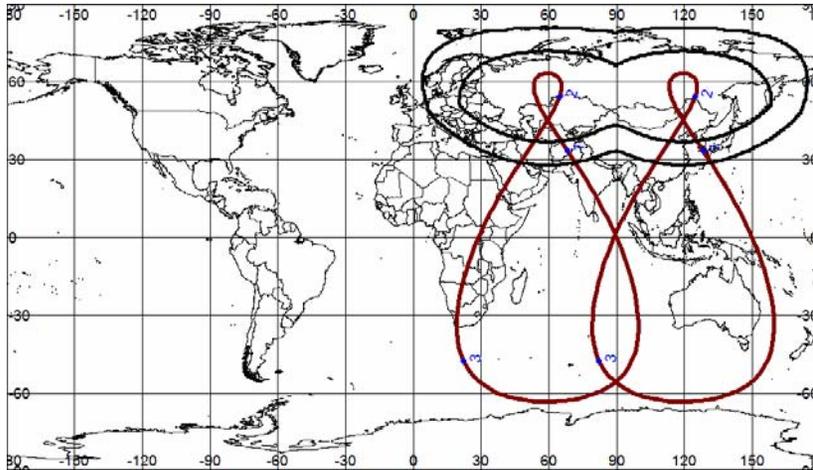


Рис.1 ГЗРВ системы «Росинфоком»
(УМ=50 и 60 град)

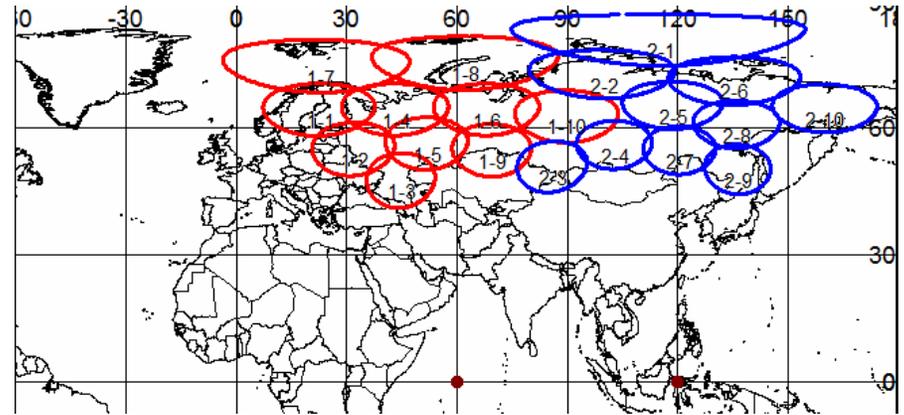


Рис.2 Система «Росинфоком» - пример покрытия 10-ю лучами с ШДН 2 град

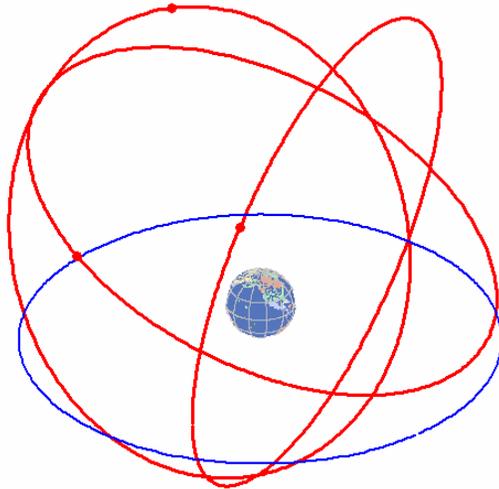


Рис.3 Структура ОГ системы на орбите
типа «Тундра»

Система «Росинфоком»:

- 10-ть Ки-лучей с ШДН 2 град ($G=39$ дБи);
- ЭИИМ луча 57 дБВт;
- антенна размером 20*20 см (эквив. диаметр 0.24 см, усиление 27 дБи)
- добротность : 2.6 дБ/К
- обеспечивается более 20 Мбит/с ($E_b/N_0=10$ дБ)



Системы на ВЭО – «Экспресс-РВ» (региональные системы)

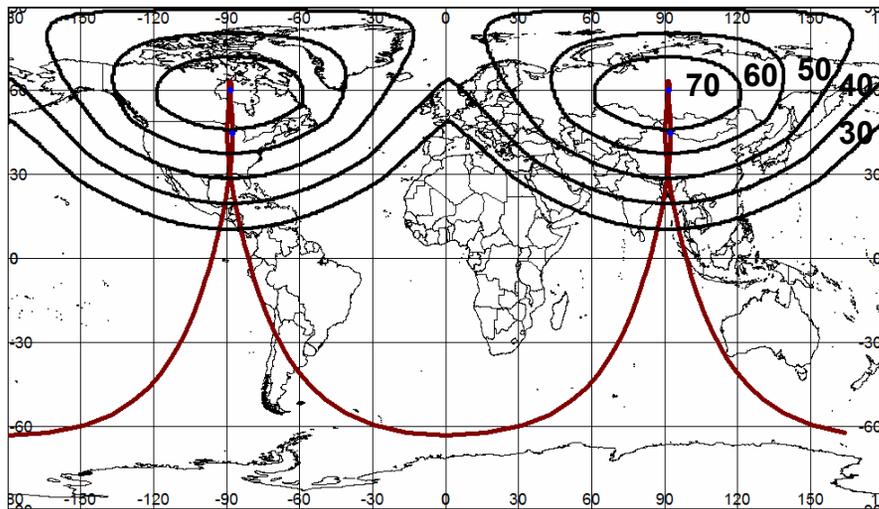


Рис.1 ГЗРВ системы «Экспресс-РВ»

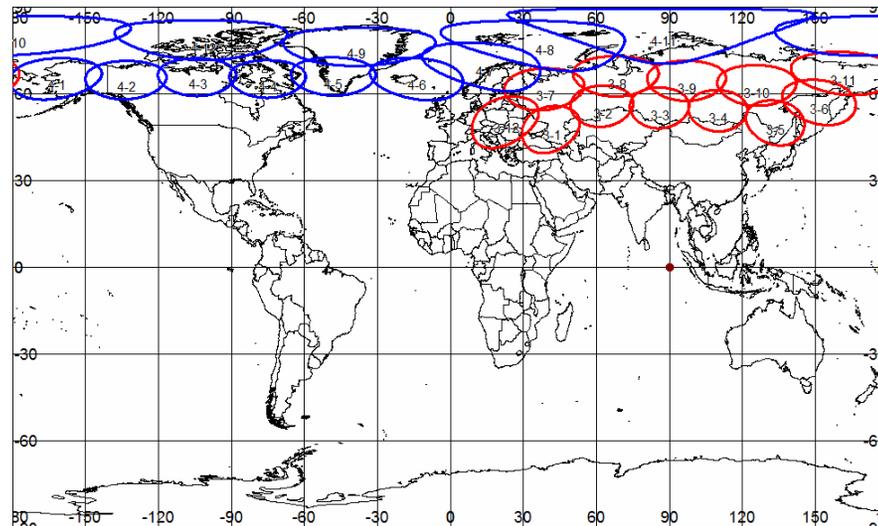


Рис.2 Система «Экспресс-РВ» - пример покрытия

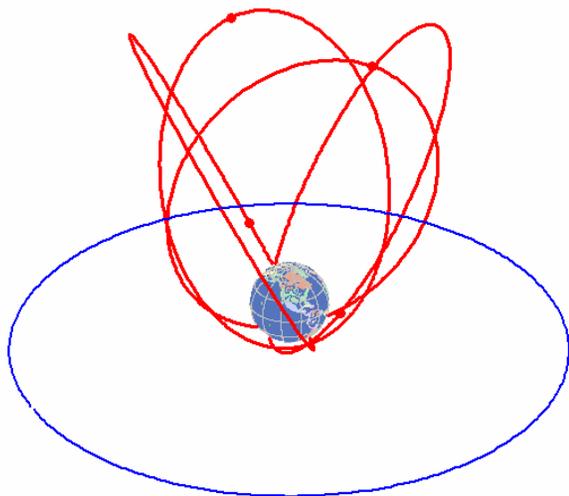


Рис.3 Структура ОГ системы на орбите
типа «Кентавр»

Система «Экспресс-РВ»:

- 12-ть Ки-лучей с ШДН 2.75 град ($G=36$ дБи);
- ЭИИМ луча: 54 дБВт (Рум менее 60 Вт);
- диаметр антенны АС: 0.7 м ($G=36$ дБи)
- добротность АС: 11 дБ/К;
- обеспечивается более 60 Мбит/с (при $E_b/N_0=10$ дБ)



Орбиты типа «Молния» и «Кентавр»

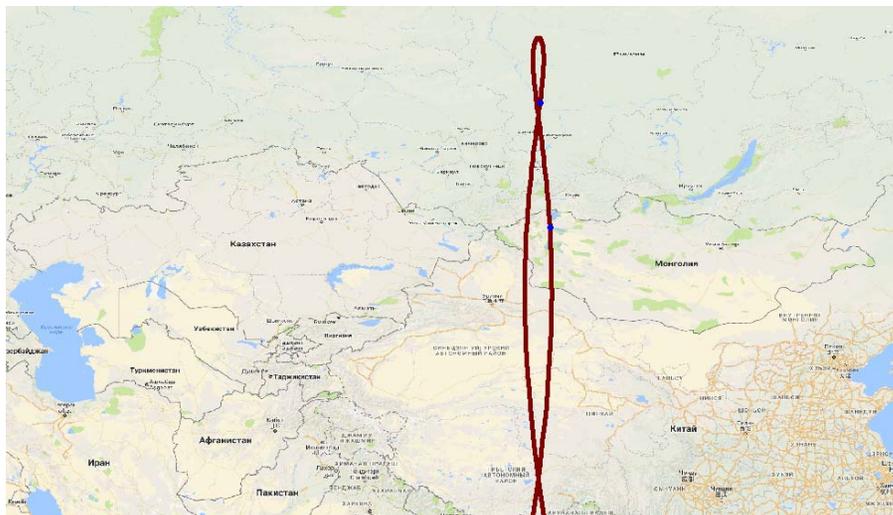


Рис.1 Трасса (апогейный участок) орбиты типа «Кентавр»

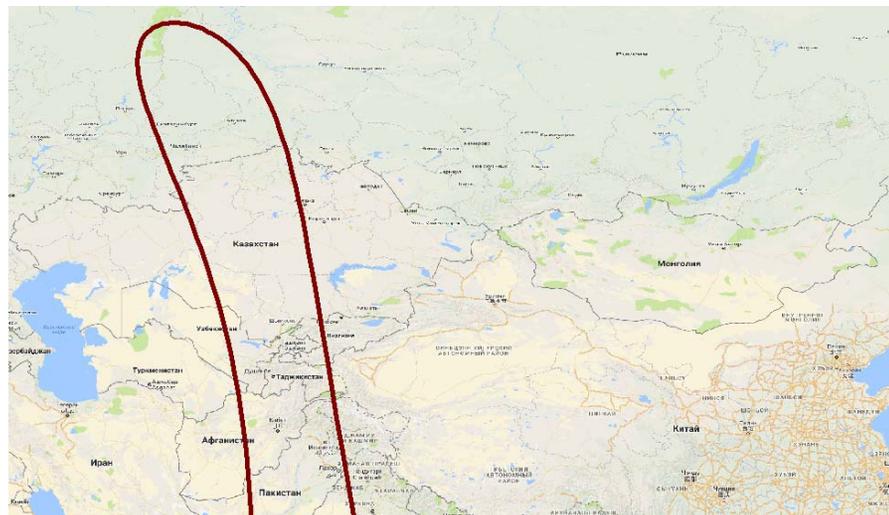


Рис.2 Трасса (апогейный участок) орбиты типа «Молния»



Орбита «Кентавр»: Патент РФ №2223205 «Система спутников на эллиптических орбитах, эмулирующая характеристики системы спутников на геостационарной орбите». Патентообладатель: АО «ИКЦ «Северная Корона»

Авторы: Витер В.В., Гриценко А.А., Липатов А.А., Степанов А.А. и др.

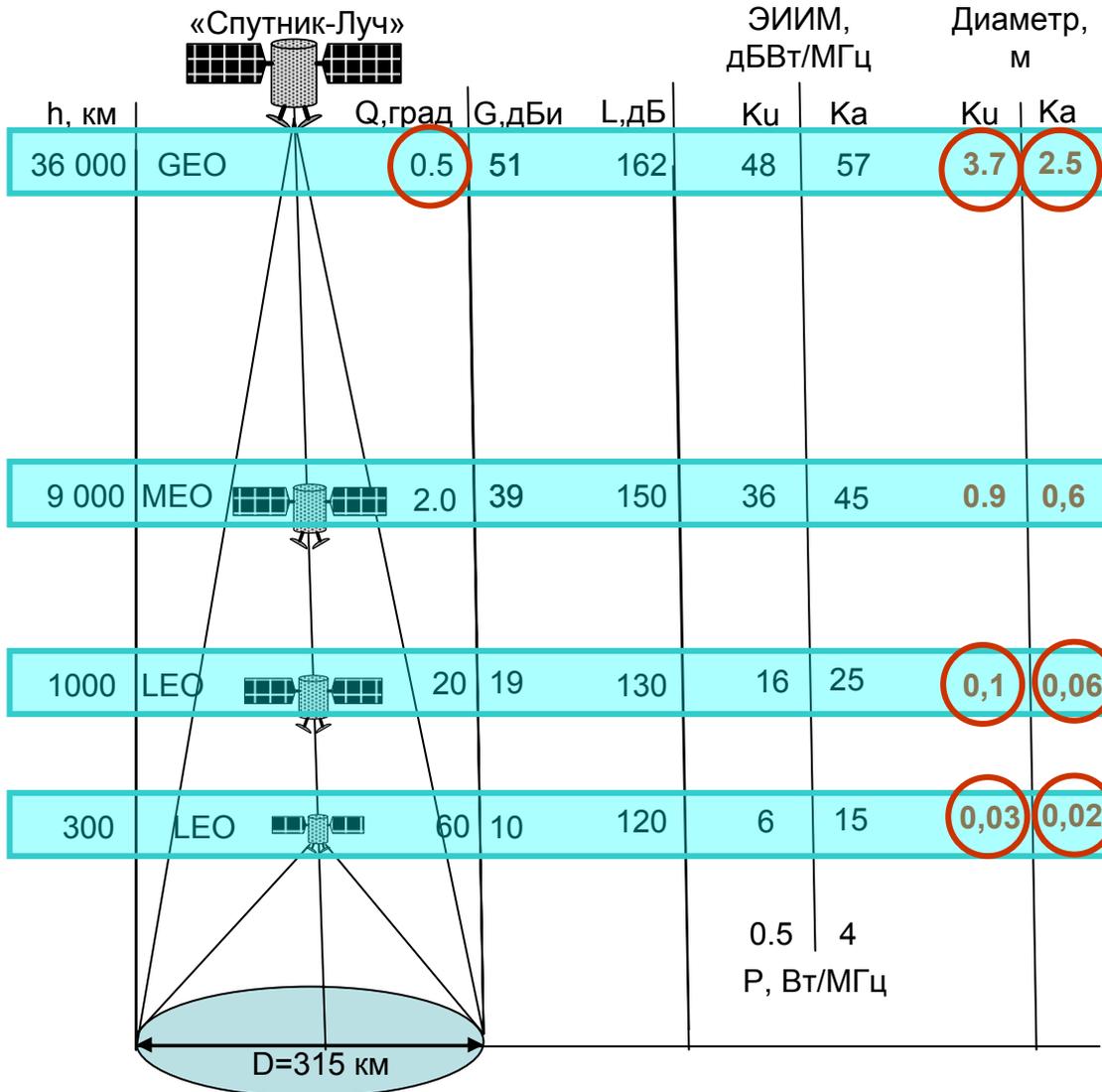
Орбита «Кентавр» - это 12-и часовая ВЭО (типа «Молния»), трасса которой на апогейном участке описывает характерную «восьмерку».

Работа КА связи осуществляется в верхней «петле» восьмерки.



Ключевые факторы в системах спутниковой связи

Фактор №5 – влияние высоты орбиты на массово-габаритные характеристики КА



Мощность УМ:

- в Ku диапазоне: 0.5 Вт/МГц;

- в Ka диапазоне: 4 Вт/МГц.

Для обеспечения максимальной доступной скорости передачи в зоне обслуживания (диаметром, например, 315 км) необходимо использовать бортовую антенну диаметром:

А) для Ku-диапазона:

- 3 см для KA на высоте 300 км;

- 10 см для KA на высоте 1 тыс. км;

- 90 см для KA на высоте 9 тыс. км;

- 3,7 м для KA на высоте 36 тыс. км.

Б) для Ka диапазона:

- 2 см для KA на высоте 300 км;

- 6 см для KA на высоте 1 тыс. км;

- 60 см для KA на высоте 9 тыс. км

- 2,5 м для KA на высоте 36 тыс. км.

Вывод: при переходе с высоты 1 тыс. км на 36 тыс. км потребный диаметр антенны KA возрастает более чем 37 раз.



Ключевые факторы в системах спутниковой связи

«Предельные спутники»

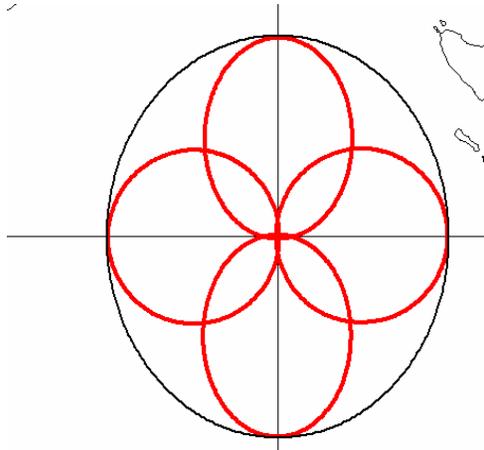


Рис.1 Четыре луча

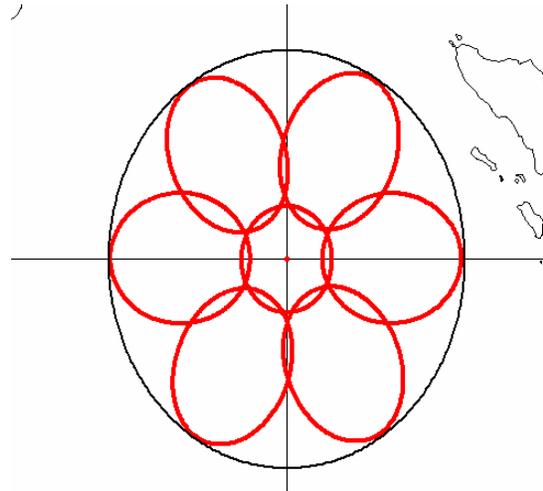


Рис.2 Семь лучей

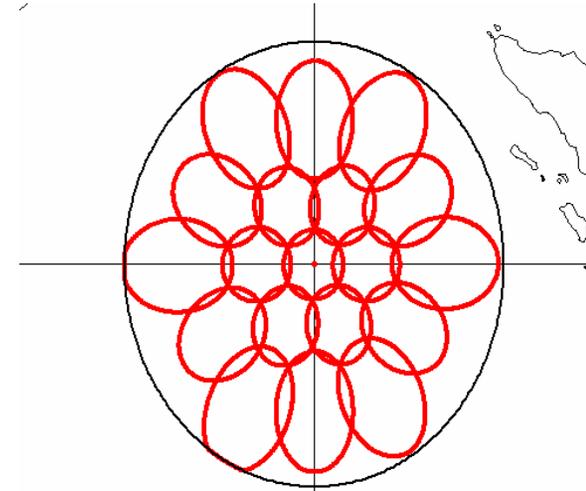


Рис.3 Девятнадцать лучей

Для «предельного спутника», при увеличении числа лучей:

- рост диаметра бортовой антенны (например, с 3 см до 7 см);
- рост усиления каждого луча;
- пропорциональное снижение мощности передатчика на луч.

Следовательно: обеспечивается рост пропускной способности без увеличения (теоретически) требуемой мощности на систему энергоснабжения.



Ключевые факторы в системах спутниковой связи

Межспутниковые линии связи (МЛС)

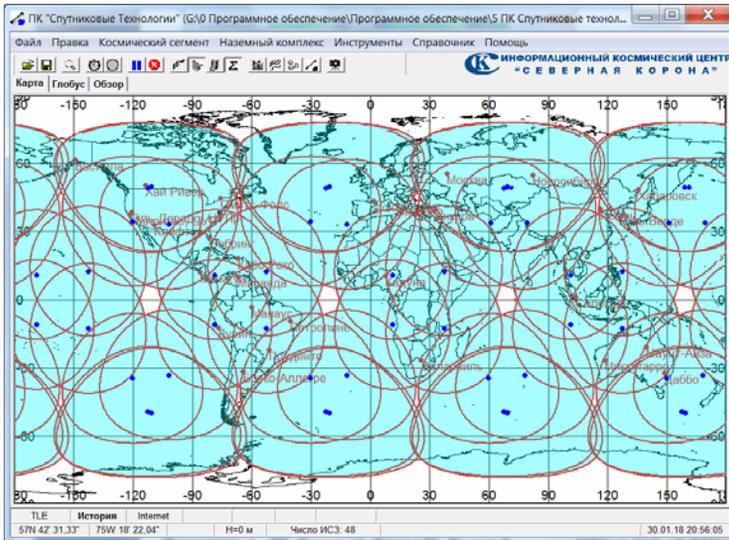


Рис.1 Мгновенная зона радиовидимости КА системы Orbcomm

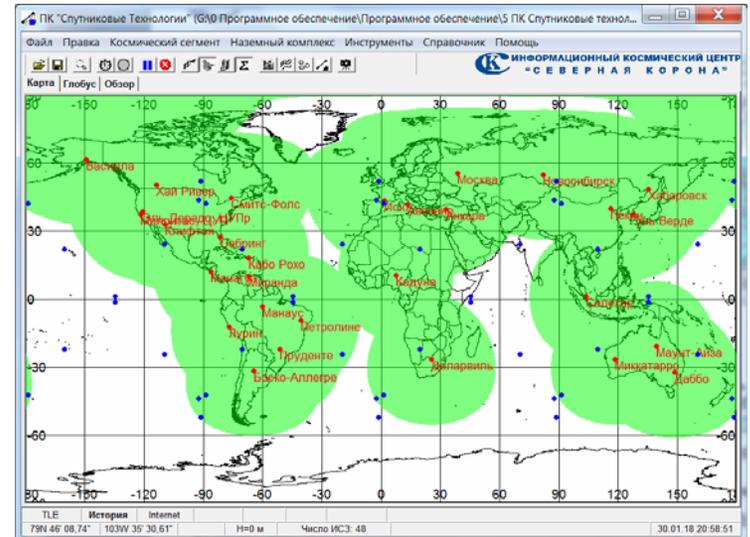


Рис.2 Зона радиовидимости шлюзов системы Orbcomm

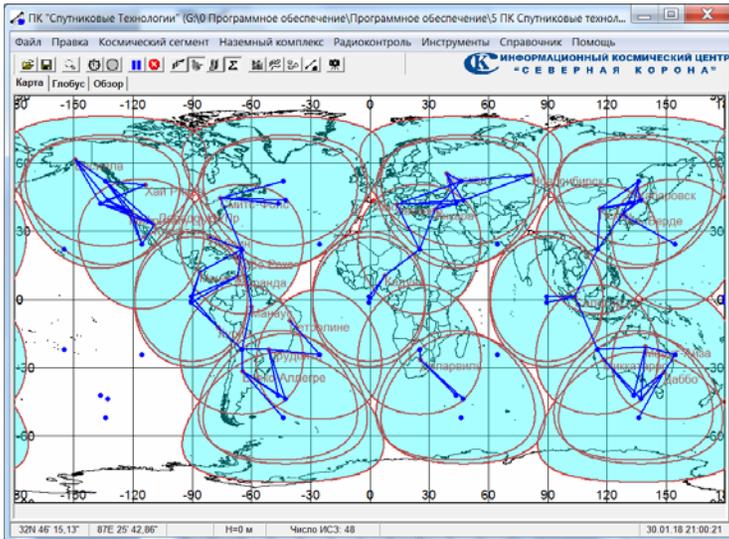
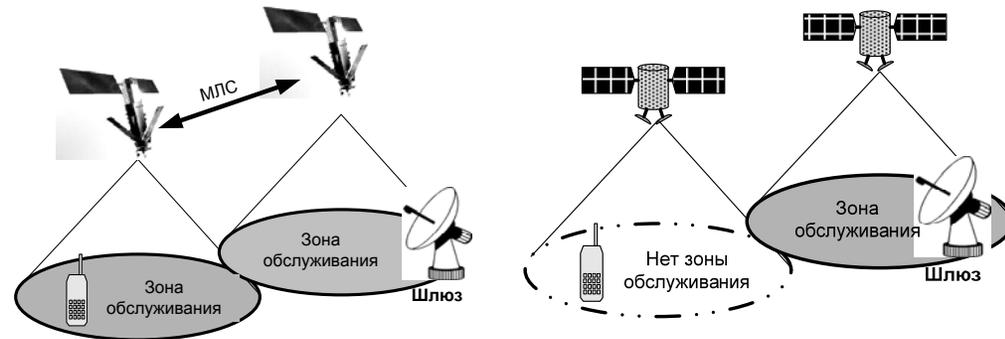


Рис.3 Мгновенная зона обслуживания системы Orbcomm (с учетом шлюзов)



А) Системы с МЛС

Б) Системы без МЛС

Рис.4 Принцип формирования зоны обслуживания



Ключевые факторы в системах спутниковой связи

«Концентрация КА на полюсах»

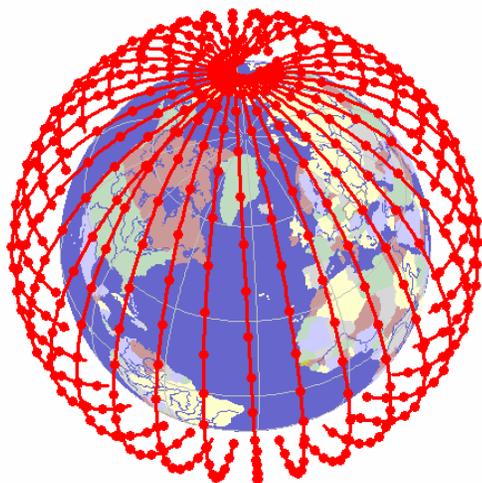


Рис.1 Структура ОГ сети «102»

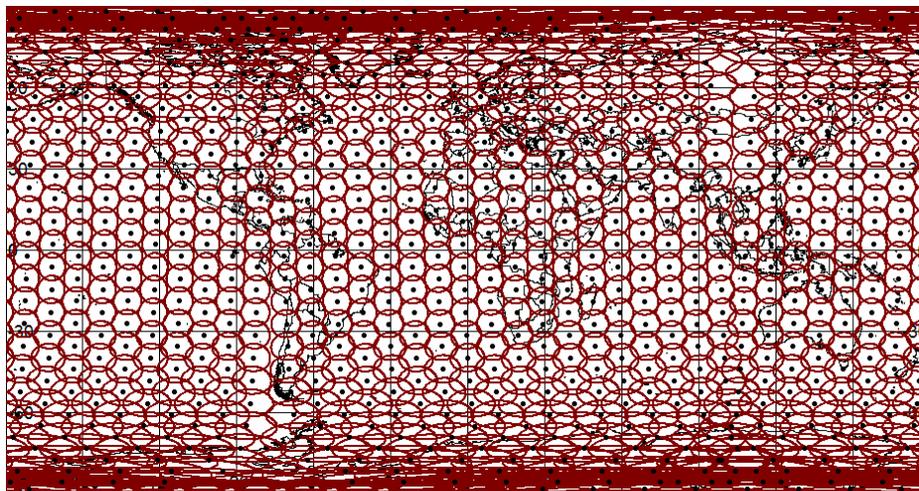


Рис.2 Мгновенная зона радиовидимости сети «102»

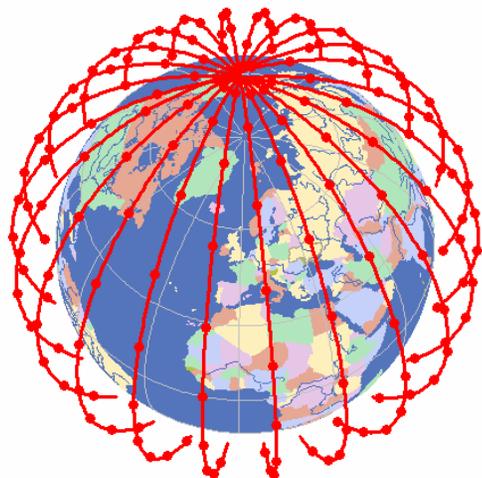


Рис.3 Структура ОГ ЗЕСОМ

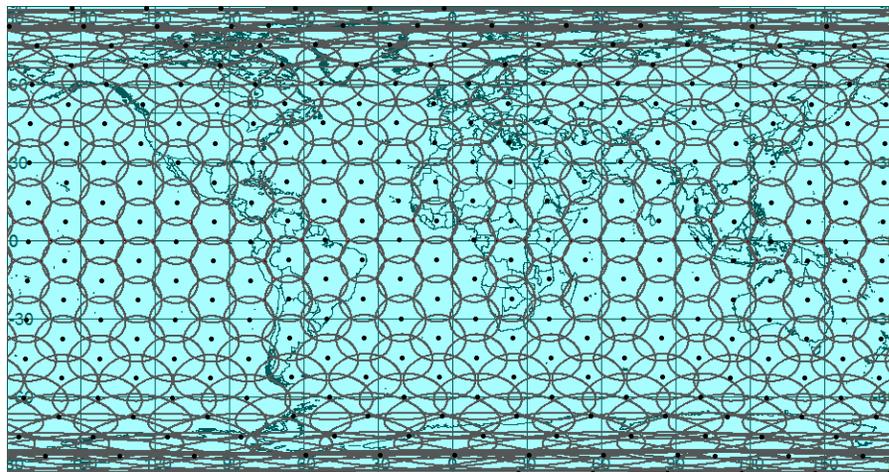


Рис.4 Мгновенная зона радиовидимости ЗЕСОМ



ОЗВ

первая действующая НГСО (МЕО) HTS система

Космический сегмент

- Орбита: высота 8070 км, наклонение 0 град;
- ОГ: 1 плоскость и 10 КА (+2 резервных КА);
- планируются дополнительные КА в экваториальной плоскости + наклонные орбиты;
- зона обслуживания в широтной полосе до 45 град (граничный угол места 20 град);
- масса КА 700 кг, САС 10 лет,
- 10 абонентских и 2 для фидерных линий антенн в карданном подвесе (+-26 град);
- диаметр зоны 500 км;
- Полоса луча: 216 МГц на прием и 216 МГц на передачу; пропускная способность КА до 12 Гбит/с;
- обработка на борту - нет;
- межспутниковые линии – нет;
- изготовитель КА Thales Alenia Space

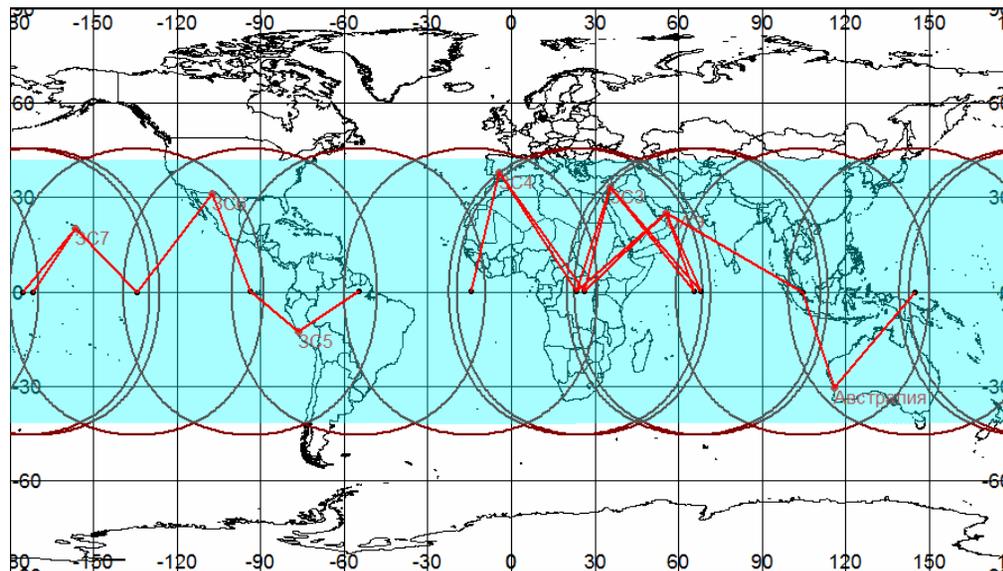


Рис.1 ГЗРВ системы (7 станций сопряжения, УМ=20 град)

Наземный сегмент

- диапазон частот Ка: вверх 27.6 – 29.1, вниз 17.8 – 19.3 ГГц;
- 7 станций сопряжения;
- поляризация – круговая (левая и правая);
- время работы через 1 КА – около 45 мин с последующим перенацеливанием антенны на следующий КА, либо использование 2-х антенных систем;
- используется стандарт DVB-S2 ACM.

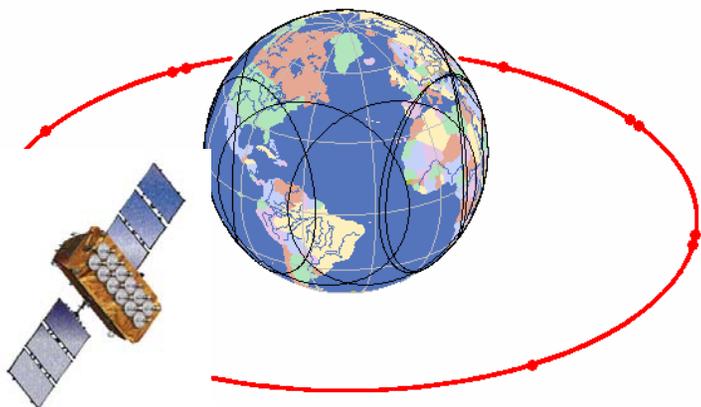


Рис.2 Структура ОГ системы ОЗВ



«Скиф» Российский проект МЕО HTS системы

Основные характеристики системы:

- Орбита: МЕО, высота 8070 км, наклонение 88,2 град;
- ОГ: 1 или 2 плоскости по 5 КА, всего 5-10 КА;
- минимальный угол места 10 град;
- диапазон частот Ка;
- межспутниковые линии: нет
- обработка на борту: да
- принадлежность: Россия

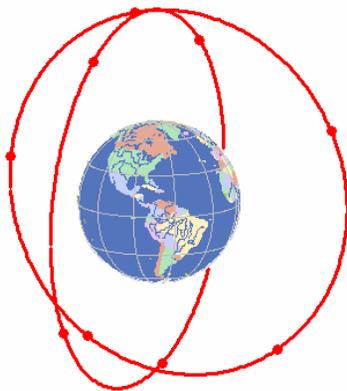


Рис.1 Структура ОГ

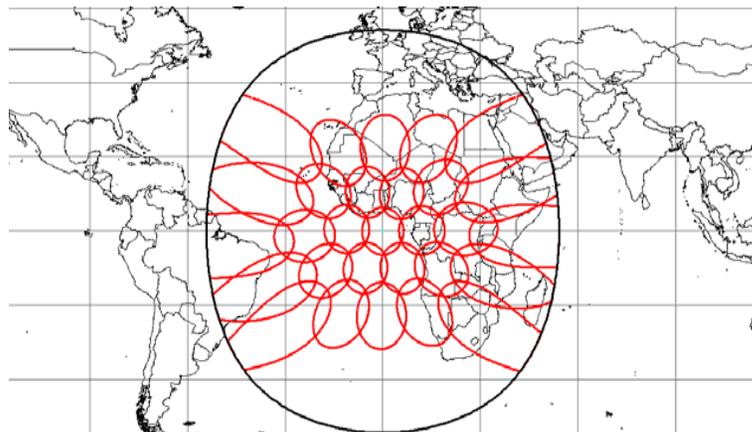


Рис.2 Пример покрытия (29 лучей, 10x10 град)

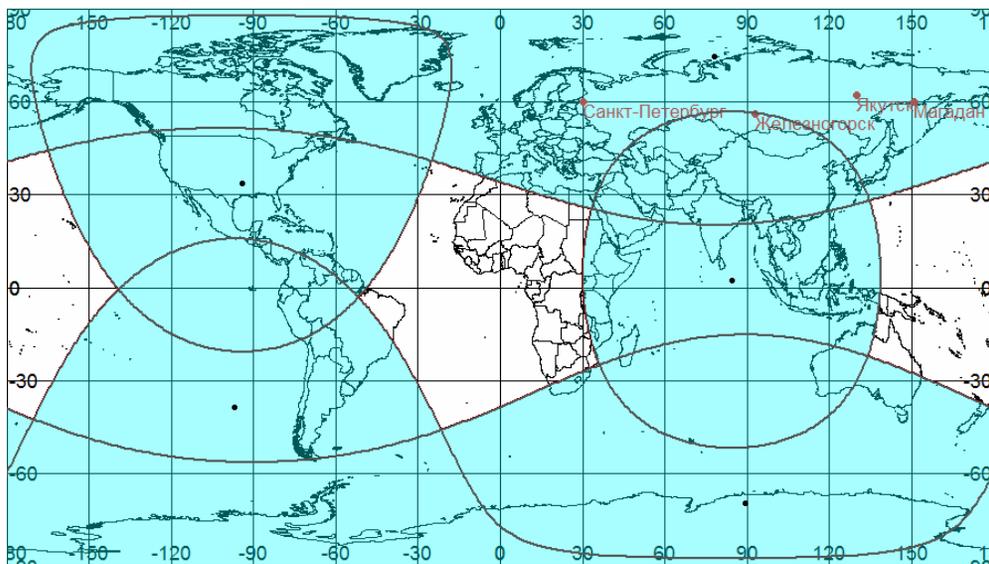


Рис.3 Мгновенная зона радиовидимости системы (УМ=10 град)

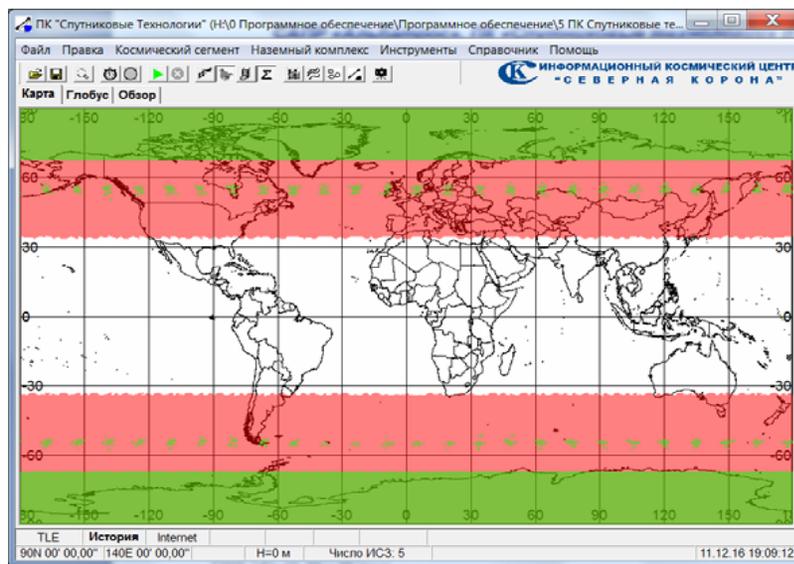


Рис.4 ГЗРВ (УМ=20 и 30 град)



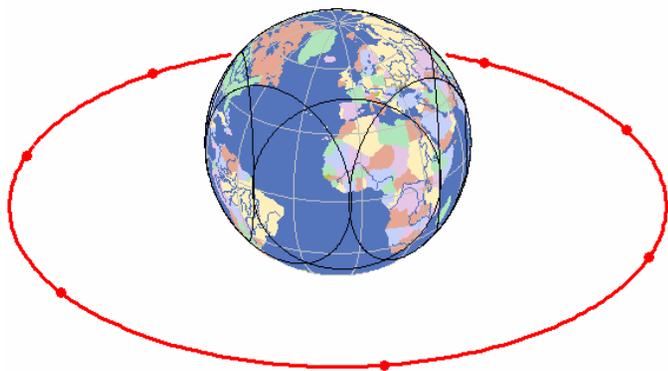
Laser Light

проект первой системы спутниковой лазерной связи

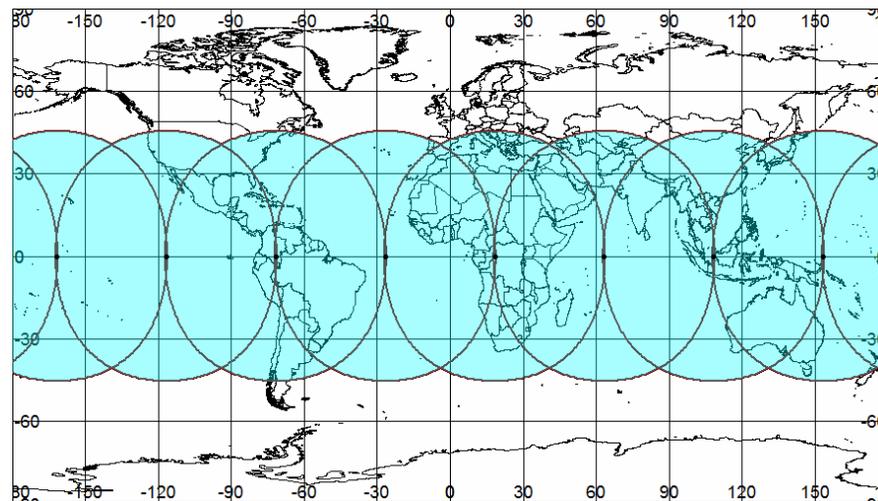
Космический сегмент

- Орбита: высота 8050 км, наклонение 0 град;
- ОГ: 1 плоскость и 8 - 12 КА;
- межспутниковая связь: лазерная;
- перенацеливаемые лучи на КА;
- 72 лазерных абонентских линии на скоростях до 100..200 Гбит/с в направлении К-З и З-К (верх и вниз);
- 48 межспутниковых лазерных линий по 200 Гбит/с;
- пропускная способность системы 6 Тбит/с;
- запуск первых 2-х КА для тестирования – в 2017-2018

г.



Структура ОГ системы Laser Light



Мгновенная зона видимости системы (УМ=20 град)

Наземный сегмент

- диапазон частот: 191.6 – 196.5 ТГц (1525 - 1565 нм);
- РЧ спектр - не используется;
- 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;
- влияние облаков и турбулентности атмосферы.



OneWeb

Космический сегмент

- Орбита: LEO, высота 1200 км, наклонение 87.9 град;
- ОГ: 18 плоскостей по 36 (с увеличением до 40 и до 49) КА, всего 648/720/882 КА;
- первый запуск – начало 2018 г;
- полное развертывание – 2020 г;
- изготовитель КА – Airbus;
- масса КА 150 кг;
- используется орбита захоронения;
- групповой вывод 30 КА одной РН;
- граничный угол места: 55 град.

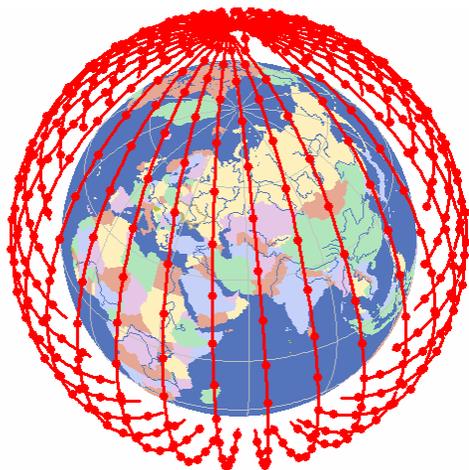
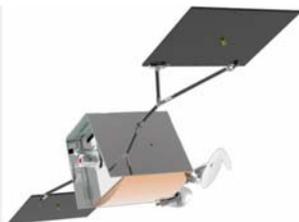


Рис.2 Структура ОГ

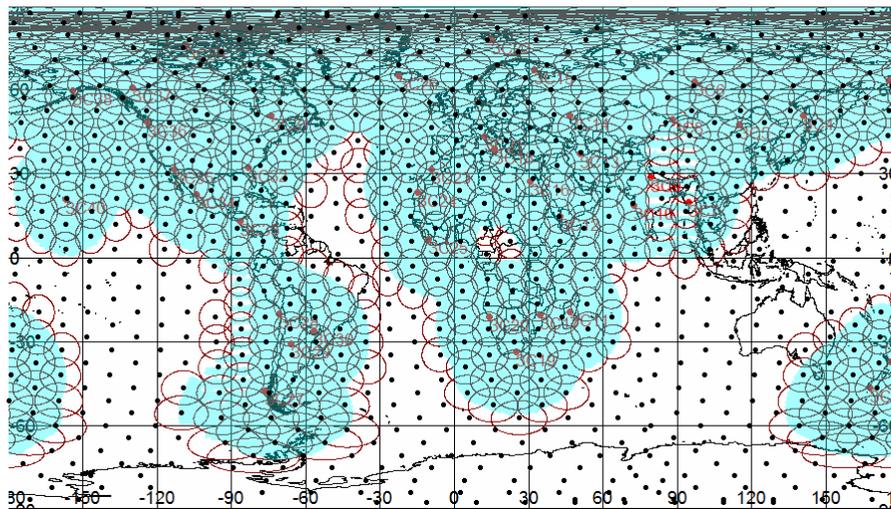


Рис.1 Вероятная ГЗРВ (с учетом 40 шлюзов) и мгновенная зона радиовидимости системы (УМ=55 град)

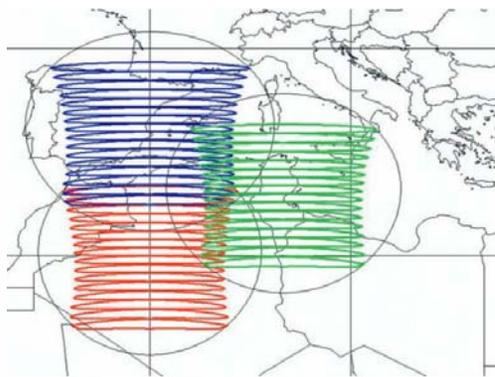


Рис.3 Формирование зоны обслуживания

Наземный сегмент

- диапазон частот Ku (14/11-12 ГГц)
- число шлюзов – от 55 до 75;
- покрытие – глобальное с учетом шлюзов, не обеспечивается на экваторе из за помех ГСО;
- скорости в абонентских линиях до 50 Мбит/с;
- 16 эллиптических абонентских лучей на КА 3x48 град;
- пропускная способность на луч 225 Мбит/с.



OneWeb

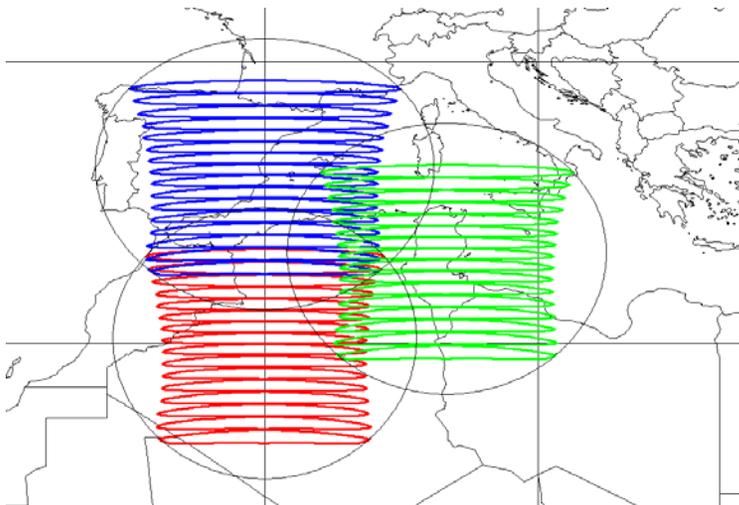


Рис.1 Зона обслуживания на экваторе

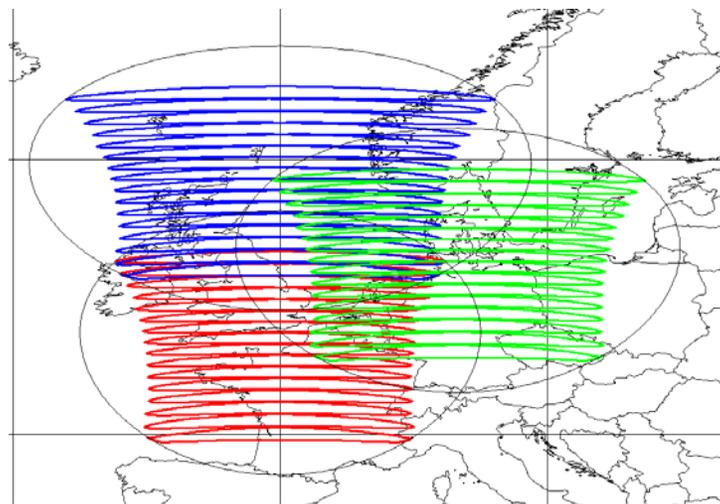


Рис.2 Зона обслуживания на широте 50 град

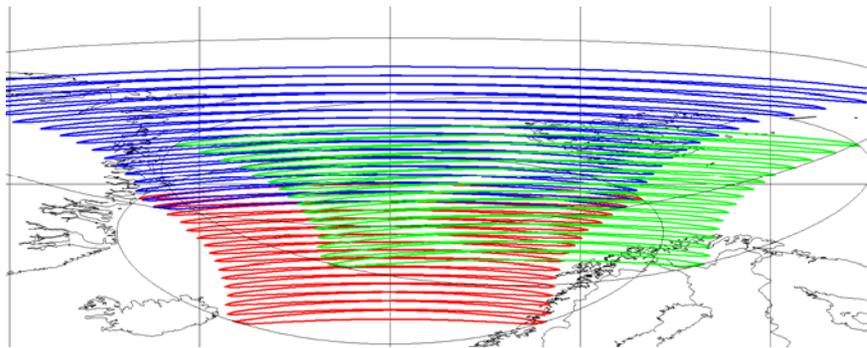


Рис.3 Зона обслуживания на широте 70 град

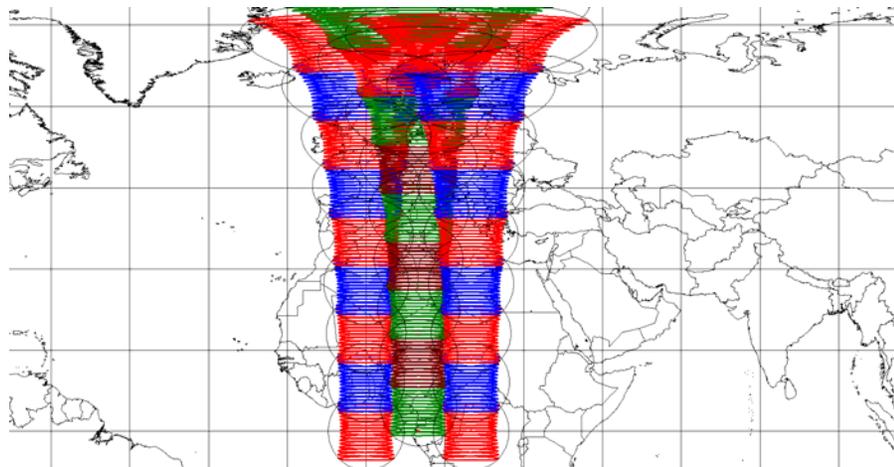


Рис.4 Зона обслуживания для 3-х цепочек



SpaceX

Основные характеристики системы:

- Орбита: LEO, высота 1150 км, наклонение 53 град;
- ОГ: 32 плоскости по 50 КА (+2 КА резерв в каждой плоскости), всего 1600 КА;
- минимальный угол места от 40 град;
- диапазон частот абонентских линий Ku, шлюзы Ka;
- лазерные межспутниковые линии.

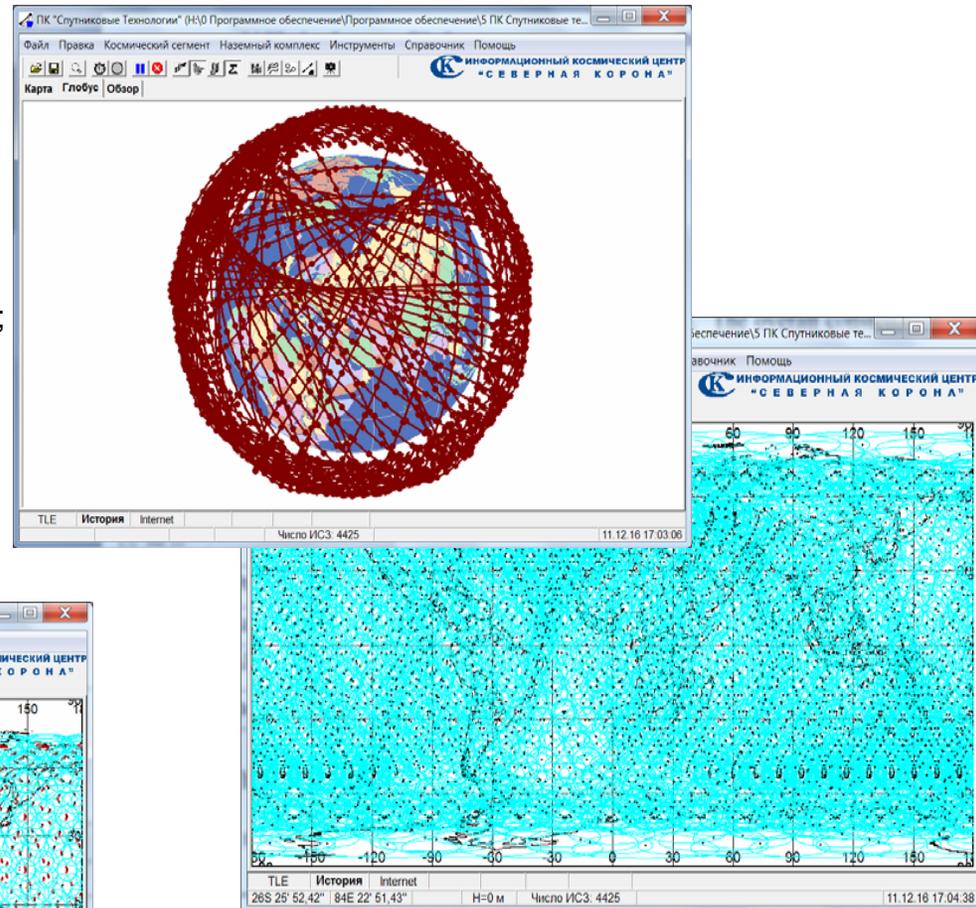
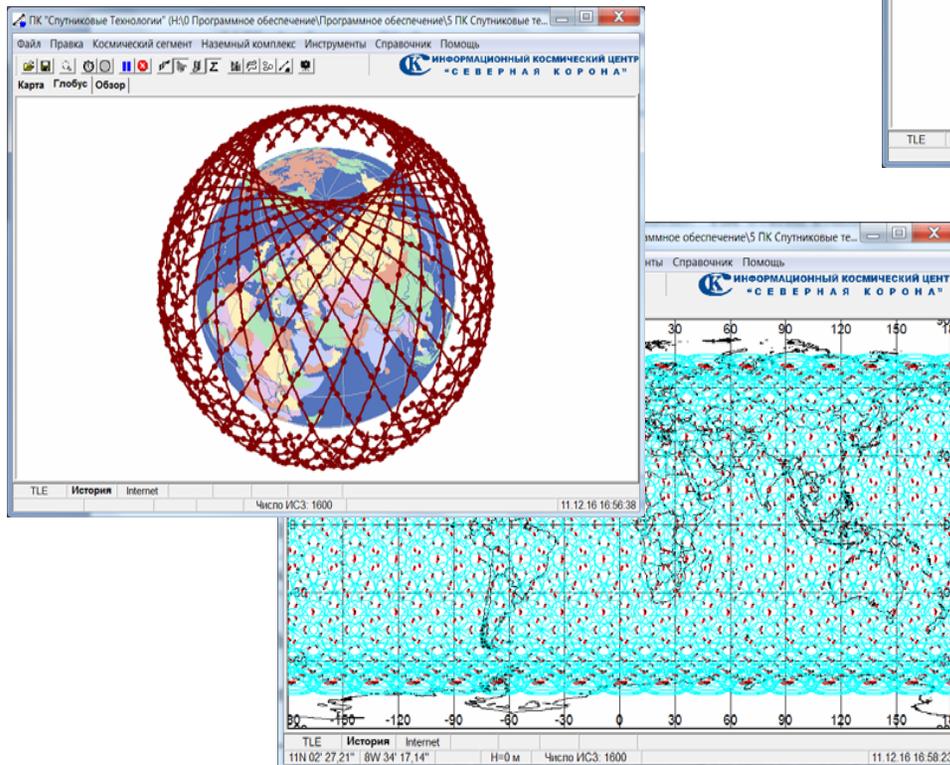


Рис.2 Финишная конфигурация (4 эшелона, всего 4425 КА)

Рис.1 Начальная конфигурация (1 эшелон, 32 плоскости по 50 КА, всего 1600 КА)



ГМИСС – глобальная многофункциональная инфокоммуникационная спутниковая система

Основные характеристики системы:

- Стоимость 299 млрд. руб.(5\$ млрд.)
- Заказчик – «Роскосмос»
- Головной исполнитель – АО «РКС»
- Проработка концепции – до марта 2018 г
- Создание консорциума – март июнь 2018 г
- Замысел: «система, аналогичная OneWeb и Iridium Next, или лучше»

Источник информации: по материалам РБК

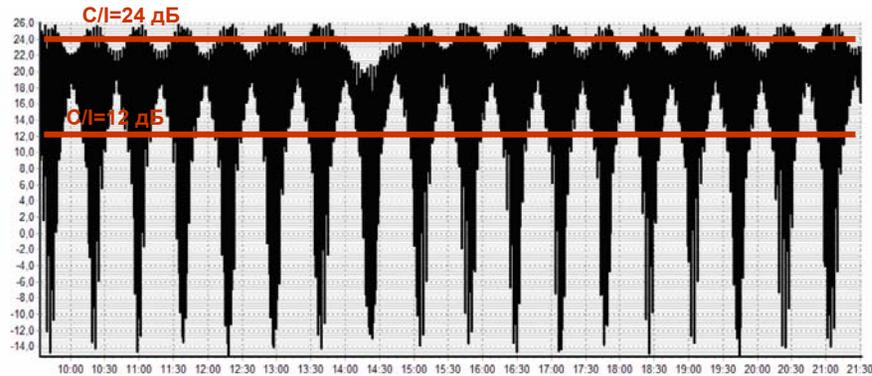
Технические характеристики



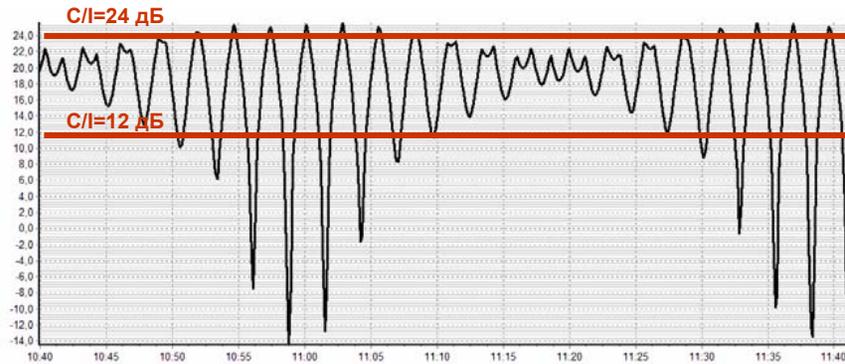


Ключевые факторы в системах спутниковой связи

Фактор №3 - Проблемы ЭМС НГСО систем



А) на интервале 12 ч



А) на интервале 1 ч

Рис.1 Отношение C/I (дБ) на входе приемника абонентской станции (с антенной 40 см) системы «Экспресс-РВ» от спутников системы OneWeb при работе в сопряженной полосе частот

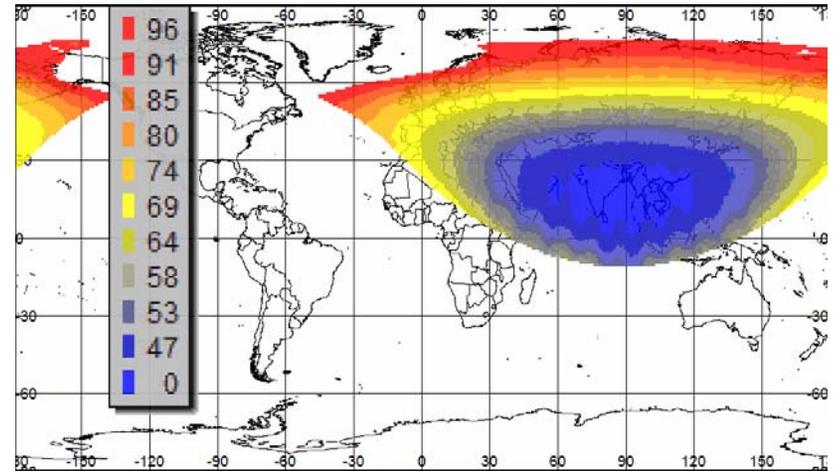


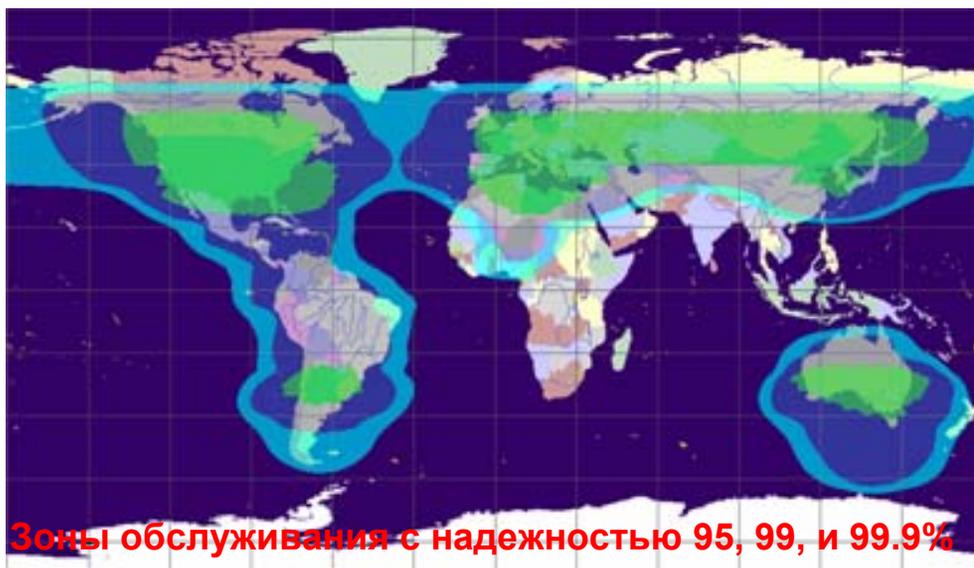
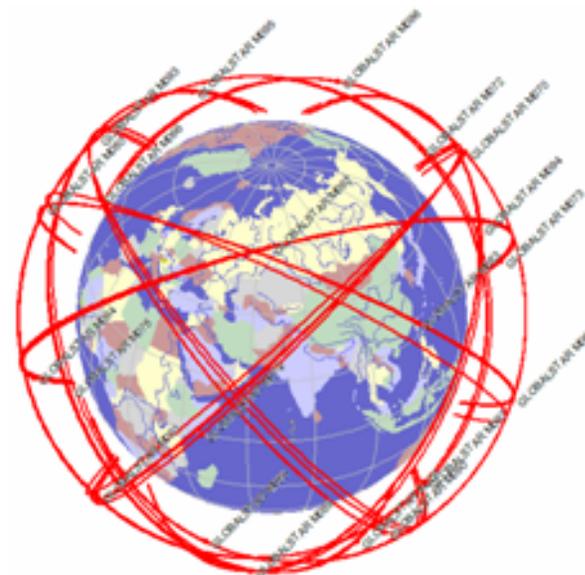
Рис.2 Распределение вероятности помех для абонентской станции с антенной 40 см системы «Экспресс-РВ»

Некоторые выводы:

- НГСО системы, работающие в сопряженной полосе частот, будут/могут создавать недопустимые помехи друг другу;
- обеспечение ЭМС НГСО 2-х систем возможно при детальной проработке возможных условий их совместного функционирования;
- обеспечение ЭМС нескольких НГСО систем, работающих в сопряженной полосе частот, труднореализуемо.



GLOBALSTAR



Достоинства: простые портативные абонентские станции.

Специфика: узкополосная система, в н.в. обеспечивает V до 9.6 Кбит/с.

Недостатки:

- зона обслуживания (надежность 99%) ограничена широтой 65 град, система не способна обеспечить покрытие в Арктике;
- для формирования зоны обслуживания необходимо большое число шлюзовых станций



IRIDIUM

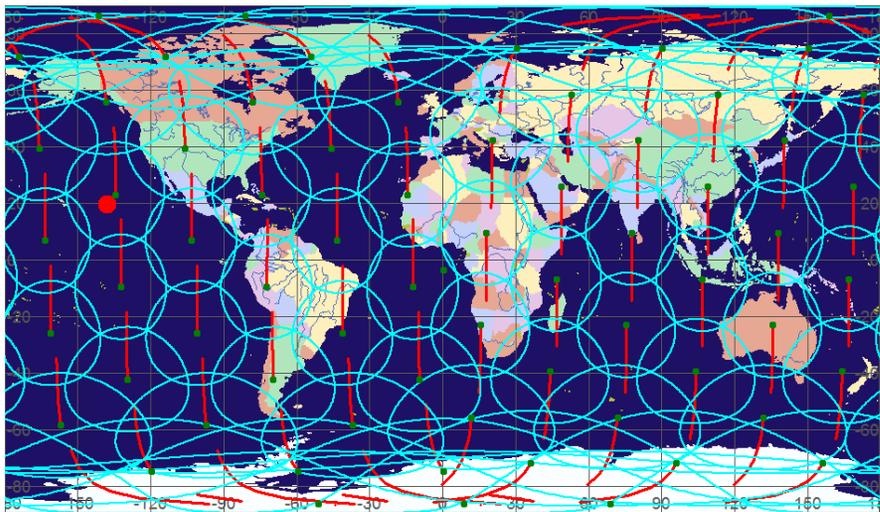


Рис.1 Мгновенная зона радиовидимости (УМ=10 град)

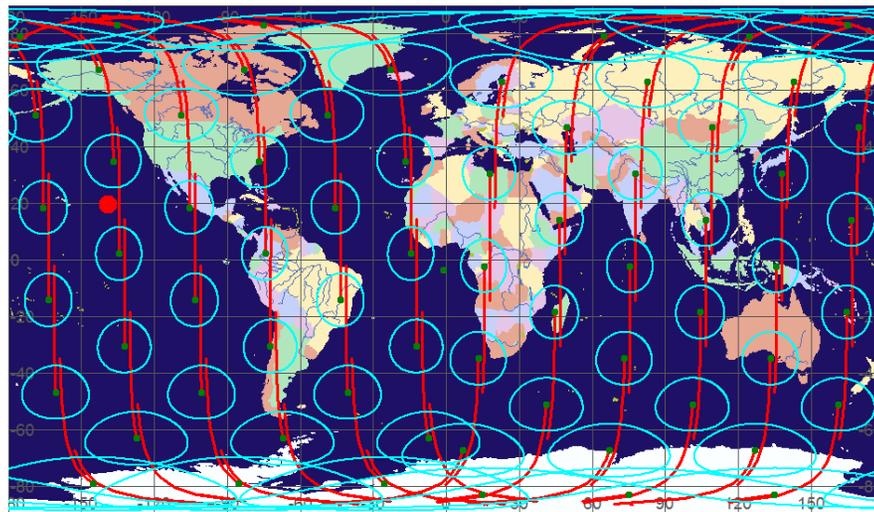


Рис.2 Мгновенная зона радиовидимости (УМ=30 град)

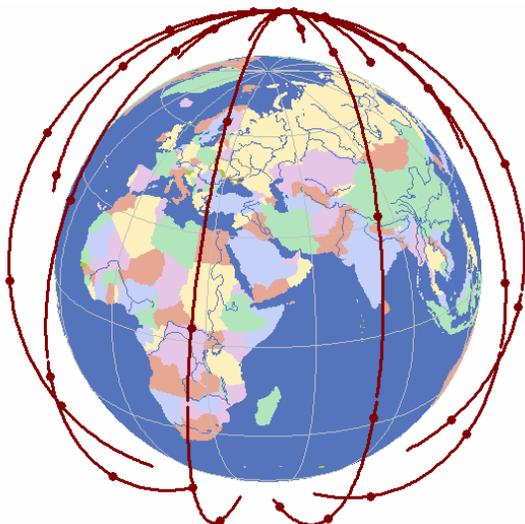


Рис.4 Структура ОГ

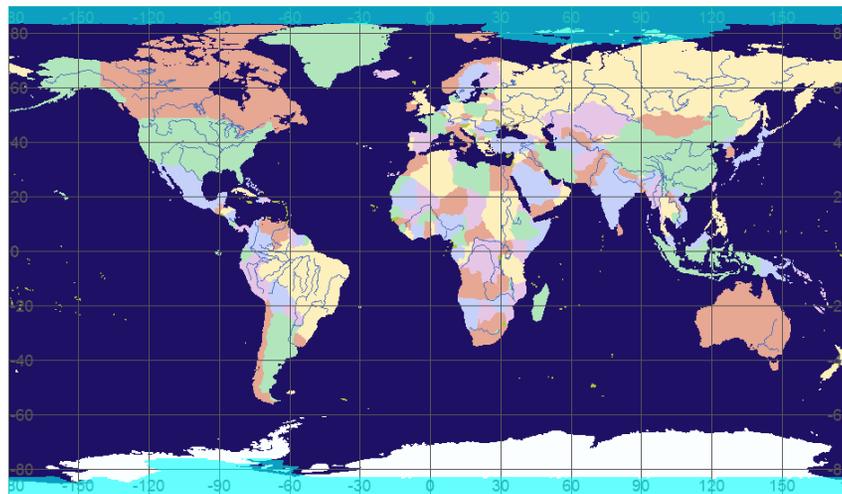


Рис3 ГЗРВ УМ=30 град



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