



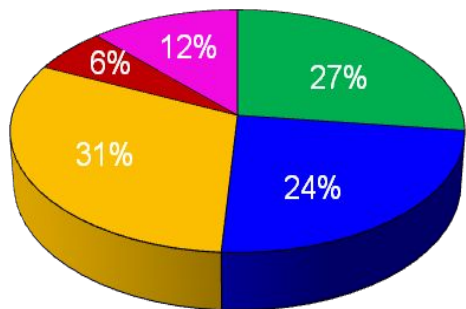
**ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ
РАКЕТНЫХ ВОЙСК СТРАТЕГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ
имени Петра Великого**



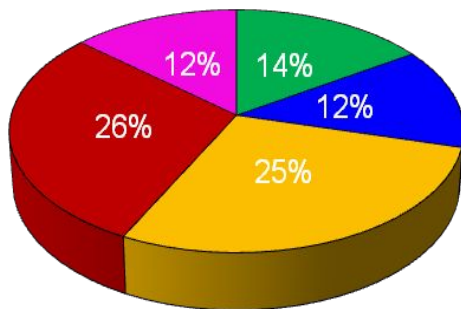
Особенности управления многоспутниковыми орбитальными группировками

*Потюпкин А.Ю.
ВА РВСН имени Петра Великого*

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПУСКОВ НАНОСПУТНИКОВ ПО ГОДАМ И НАПРАВЛЕНИЯМ



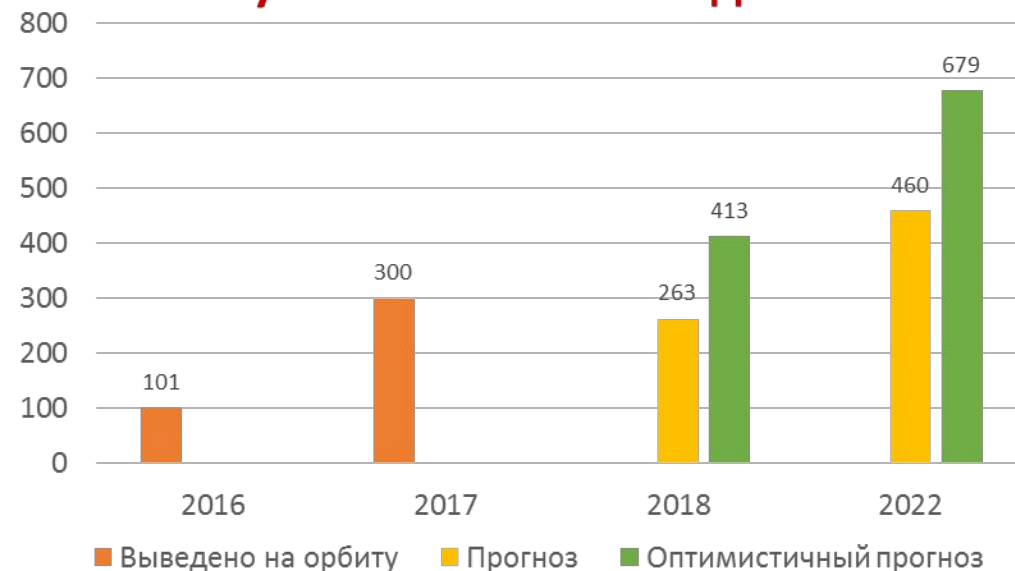
2005 г.



2020 г. (прогноз)

- | | |
|---|---|
| ■ Научные исследования | ■ Дистанционное зондирование Земли |
| ■ Образовательные программы | ■ Специальные задачи |
| ■ Научно-технические эксперименты | |

Запуск МКА весом от 1 до 50 кг



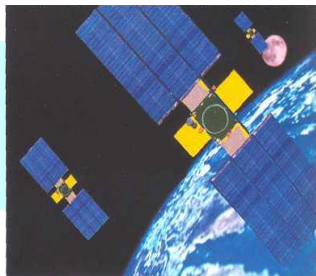
Кол-во



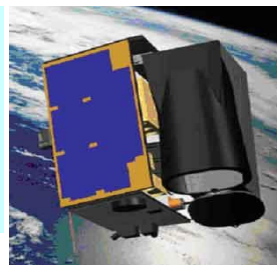
Особенности технического облика малоразмерных космических аппаратов



Микроспутник
TacSat-1 (США)
Масса120 кг



Микроспутник
TacSat-2 (США)
Масса120
кг



Британский
миниспутник
TopSat
Масса90 кг
Разрешение ... 2,8
м



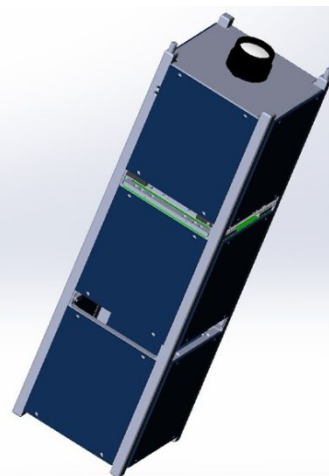
Германский
микроспутник
DRL-Tubsat
Масса45 кг
Разрешение ... 6 м

Снижение массы служебных систем КА за счет применения микроэлектромеханических систем;
Повышение степени стандартизации узлов конструкций КА;
Снижение габаритов и массы оптических систем за счет перехода к гиперспектральной аппаратуре наблюдения;
Усовершенствование систем автономной навигации и ориентации КА на базе бортовых приемников СНС

Ограниченные возможности единичного малогабаритного КА по качеству и продолжительности выполнения целевых задач

Габаритные ограничения;
Низкий уровень энергоемкости

Малая трудоемкость, стоимость, высокая оперативность разработки –
снижение стоимости единицы полезного эффекта



Серия МКА по
технологии
CubSat
различных
форматов



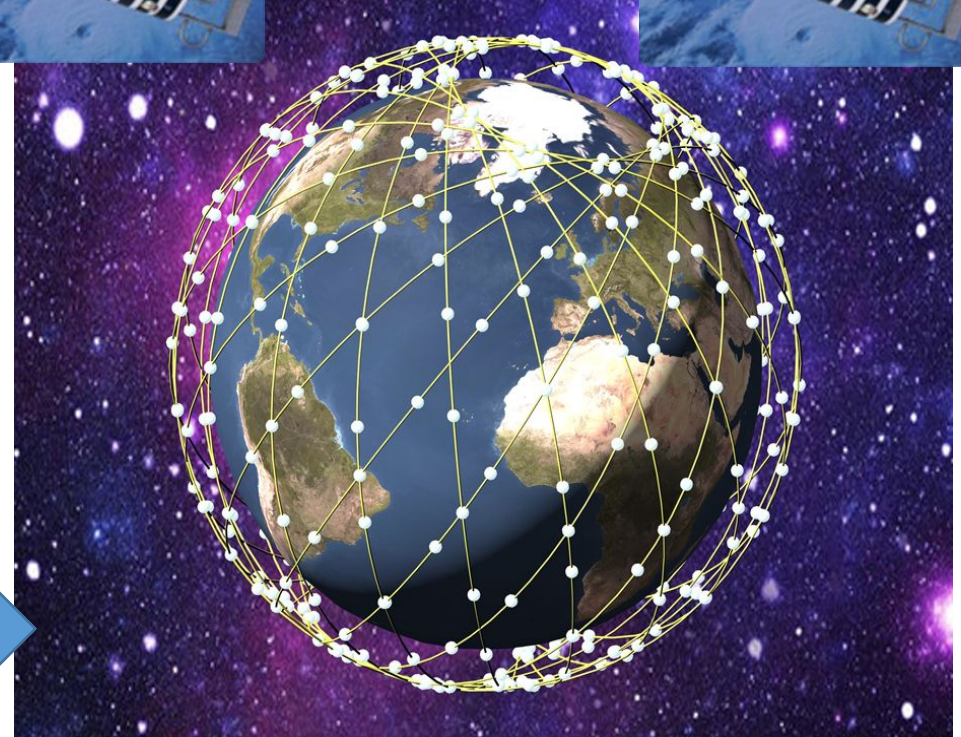
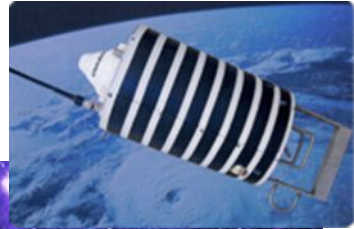
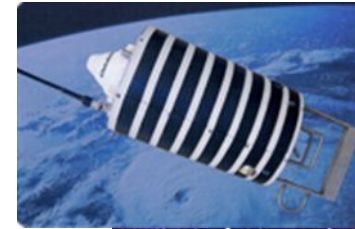
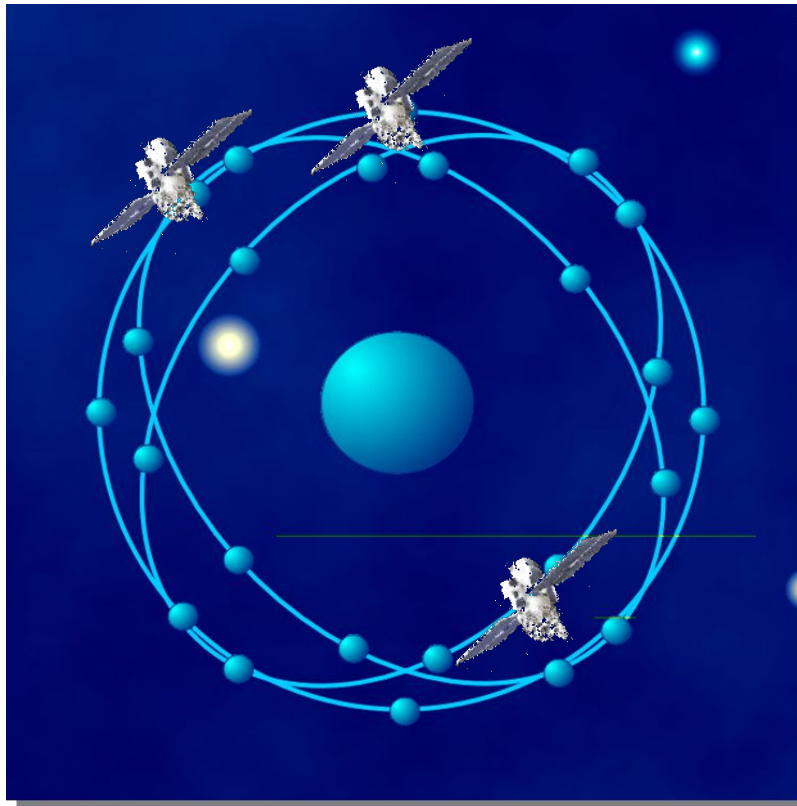
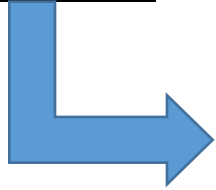
THC – 0
Масса 5
кг

Классификация КА по массе

мини КА	от 100 до 500 кг
микро КА	от 10 до 100 кг
нано КА	от 1 до 10 кг
пико КА	менее 1 кг

Динамика развития искусственных космических объектов

- Основная тенденция - реализация системного эффекта



От одиночных КА к многоспутниковым (более 100 КА) орбитальным группировкам

Примеры многоспутниковых (более 100 КА) орбитальных группировок

Спутниковые глобальные системы наблюдения

Flok-3M – 150+ КА Dove (Голубь)

Перспективные проекты

Спутниковые глобальные
системы связи

OneWeb - 2000 КА (1972 КА)

– 720 низкие орбиты (1200 км),

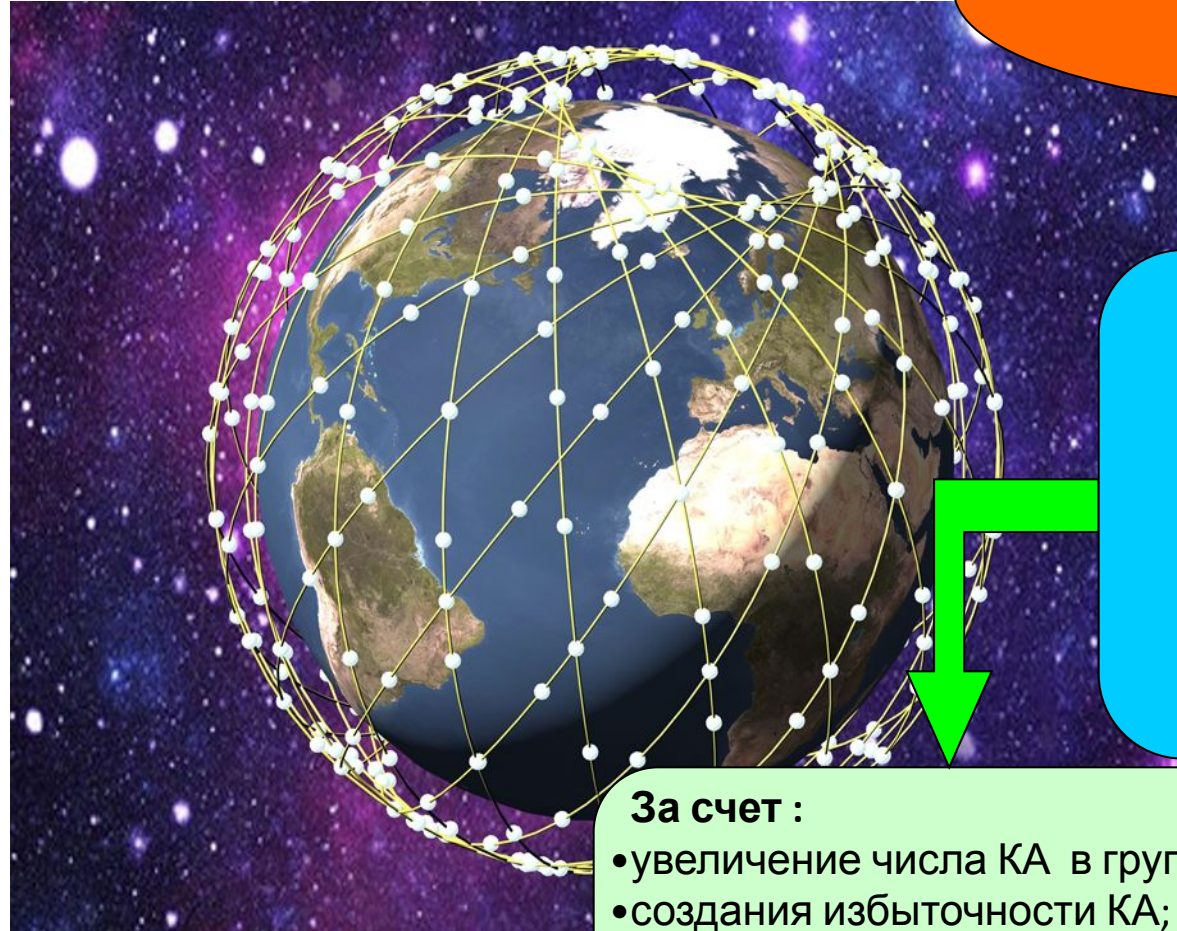
1280 - на средней орбите

Boeing – 1396-2956 КА на

низкой орбите,

SpaceX- 7518 КА.

АО «РКС» - «Сфера» - 640 КА



Реализация системного
эффекта

- Появление новых сервисов;
- Снижение стоимости единицы полезного эффекта;
- Повышение надежности функционирования системы.

За счет :

- увеличения числа КА в группировке;
- создания избыточности КА;
- перехода к пассивным системам ориентации;
- перехода к негерметичным конструкциям;
- реализации модульного принципа построения;
- снижения требований по надежности КА.

Управление космическими аппаратами

Технологический процесс, состоящий из взаимосвязанных и распределенных по времени операций управления (видов работ), **направленный на обеспечение выполнения космическим аппаратом (КА) задач в соответствии с его назначением; комплекс специальных работ, процессов, операций, направленный на эффективное выполнение программы полета и решение целевых задач космическими аппаратами.**

Управление КА в полёте включает: разработку и передачу на борт рабочих (временных) программ и управляющих команд, контроль их прохождения и исполнения; корректировку текущих задач и программ в ходе полета; измерение параметров движения КА, определение и прогнозирование параметров орбит и, при необходимости, их коррекцию; телеметрический контроль и техническое диагностирование систем и агрегатов КА; корректировку бортовой шкалы времени; восстановление работоспособности и обеспечение максимального срока активного функционирования КА; обеспечение устойчивости и регулярности всех видов связи Земля-борт-Земля; взаимодействие со специальными наземными комплексами.

Управление КА обеспечивается с помощью средств АСУ в составе **наземного комплекса управления** космическими аппаратами и **бортового комплекса управления.**

Всякая многоспутниковая система создаётся для реализации некоторого системного эффекта, характеризующегося целевыми показателями

Помимо общих показателей, таких как глобальность, непрерывность, оперативность и массовость, т.н. кортеж <ГНОМ>, выделяют и показатели целевого предназначения.

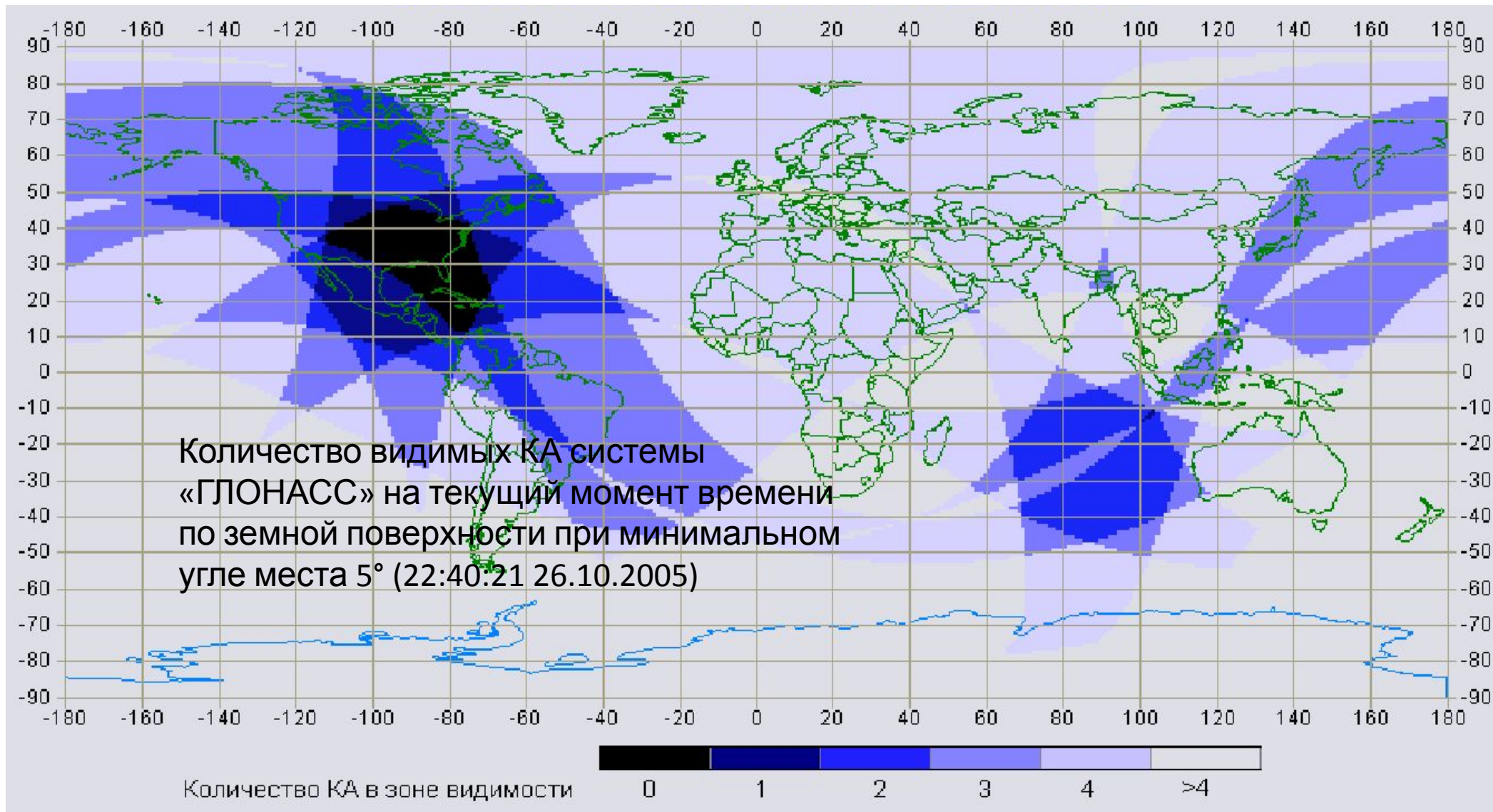
- для КНС – доступность и целостность системы, точность определения координат;**
- для систем ДЗЗ – периодичность наблюдения, информационная производительность, вероятность получения информации с требуемым качеством;**
- для систем связи – множество предоставляемых сервисов, вероятность вхождения в связь за заданное время, задержка при передаче речи и т.д.**
- Важным показателем является стоимость единицы полезного эффекта**

Переход от традиционных задач управления отдельным КА в полёте к другому классу задач управления – управлению системой КА

- Актуальной является разработка новых технологий управления многоспутниковыми группировками **МКА** как **новым типом космических объектов**.
- В основе должен лежать **переход от управления отдельными КА к управлению целевым эффектом** всей космической системы .
- Особенность отечественной АСУ КА – ограниченные возможности НАКУ, что предполагает **перенос части функций НКУ на БКУ, развитие сетевых методов управления**.
- Целесообразно обеспечить широкое внедрение методов управления, позволяющих обеспечить баланс между процессами деградации системы и её упорядоченности **в условиях ограниченности ресурсов**

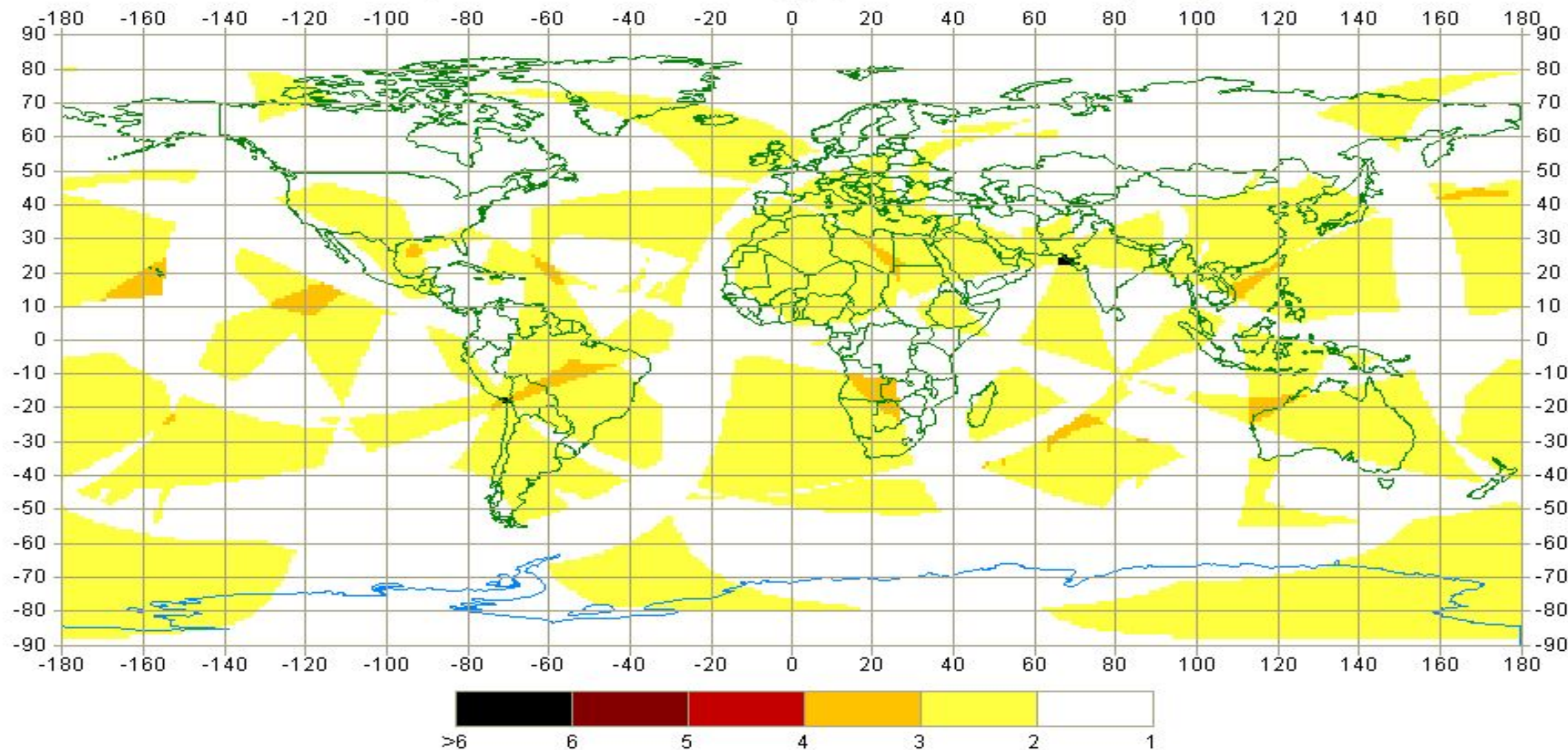
Пример системного эффекта

Доступность и целостность системы ГЛОНАСС



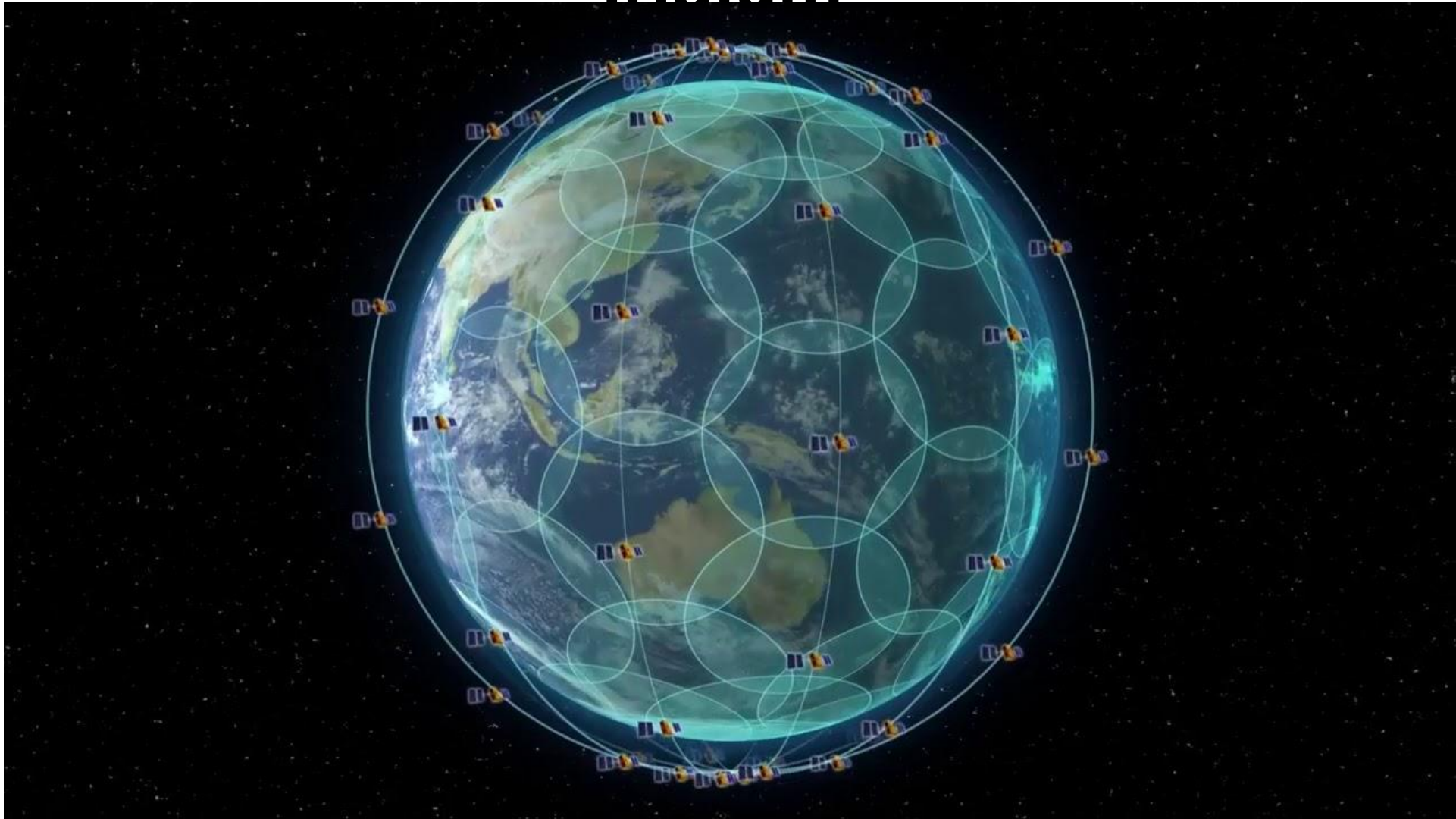
Мгновенная доступность ГЛОНАСС

Время: 10:45:54 01.04.2019 (декретное Московское время)



Значения позиционного геометрического фактора PDOP
на текущий момент времени ($PDOP \leq 6$)

Глобальность покрытия системы низкоорбитальной спутниковой связи Iridium



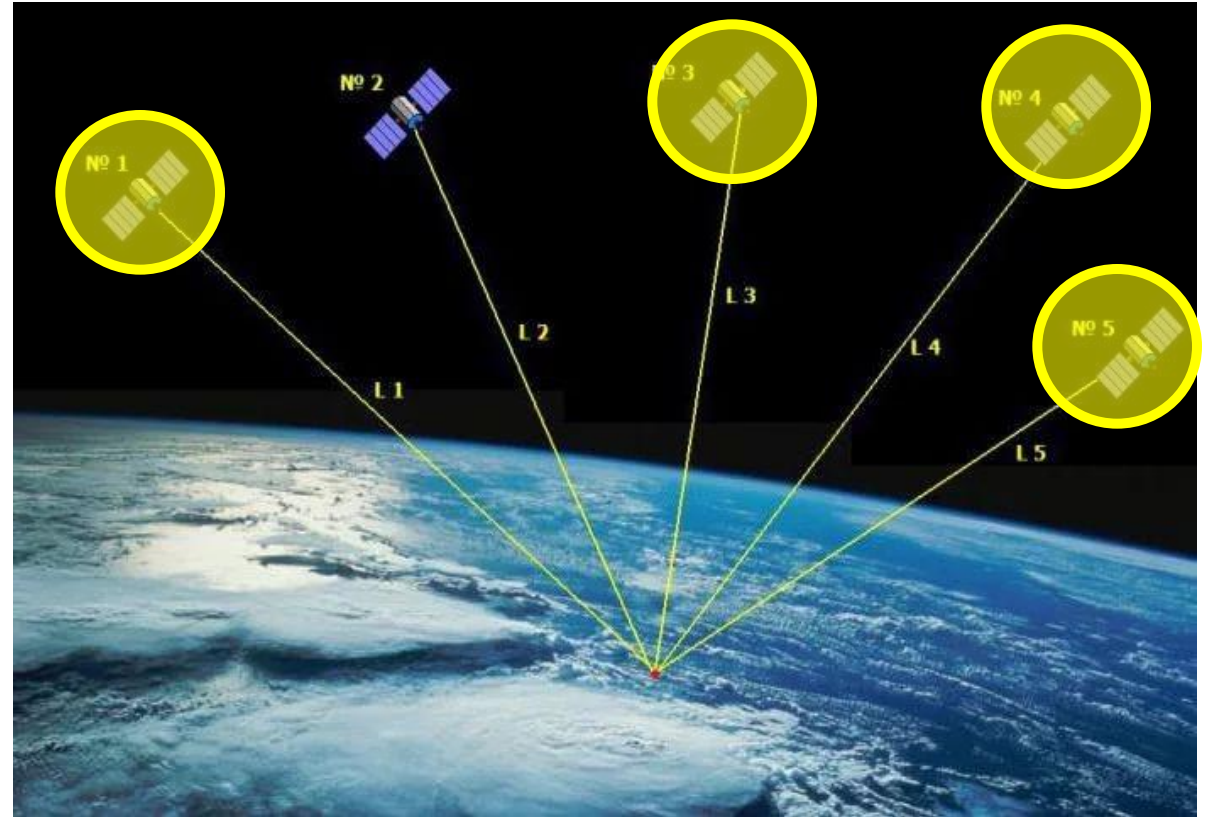
Достижение системного эффекта

Системный эффект достигается за счёт реализации ряда целевых эффектов (ЦЭ) многоспутниковой системы

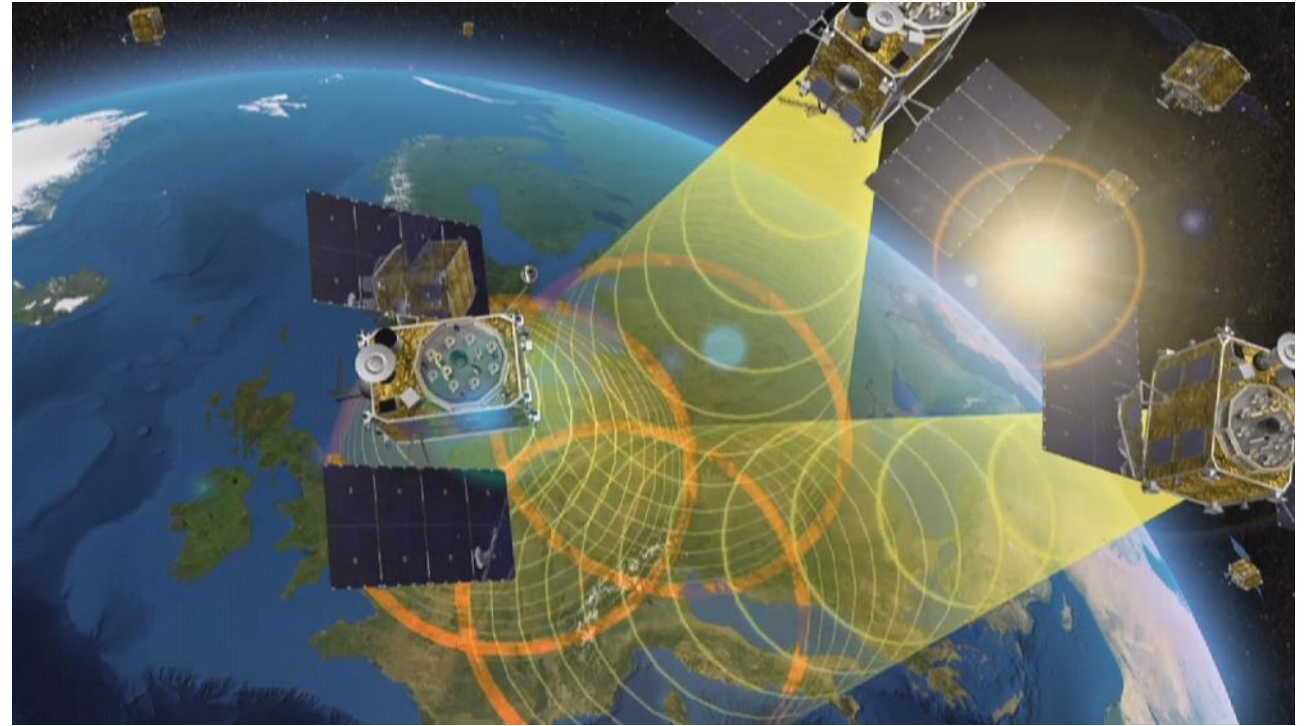
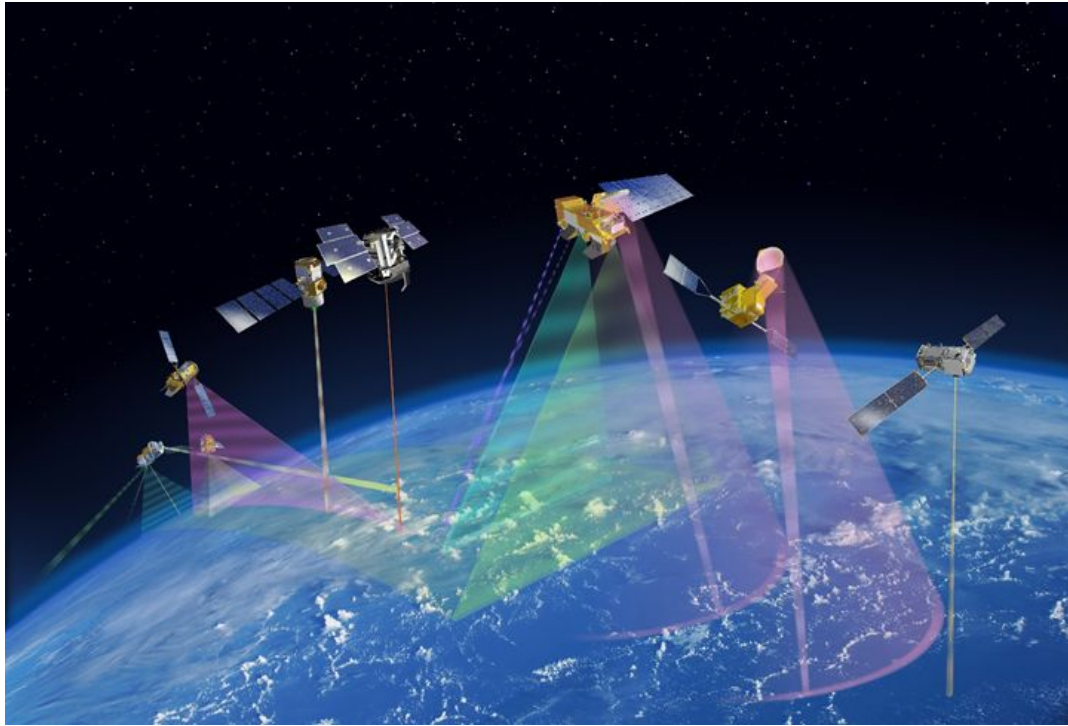
Например,

- для КНС необходимым условие решения навигационной задачи является обеспечение требуемого геометрического фактора выбором необходимого созвездия НКА;
- для систем связи - наличие в зоне видимости абонента хотя бы одного КА связи, в ряде случаев n - кратность перекрытия зон радиовидимости;
- для систем ДЗЗ - попадание объекта наблюдения в полосу захвата БСА, для более сложных случаев - реализация целевых эффектов непрерывности, многопозиционности, стереосъёмки,

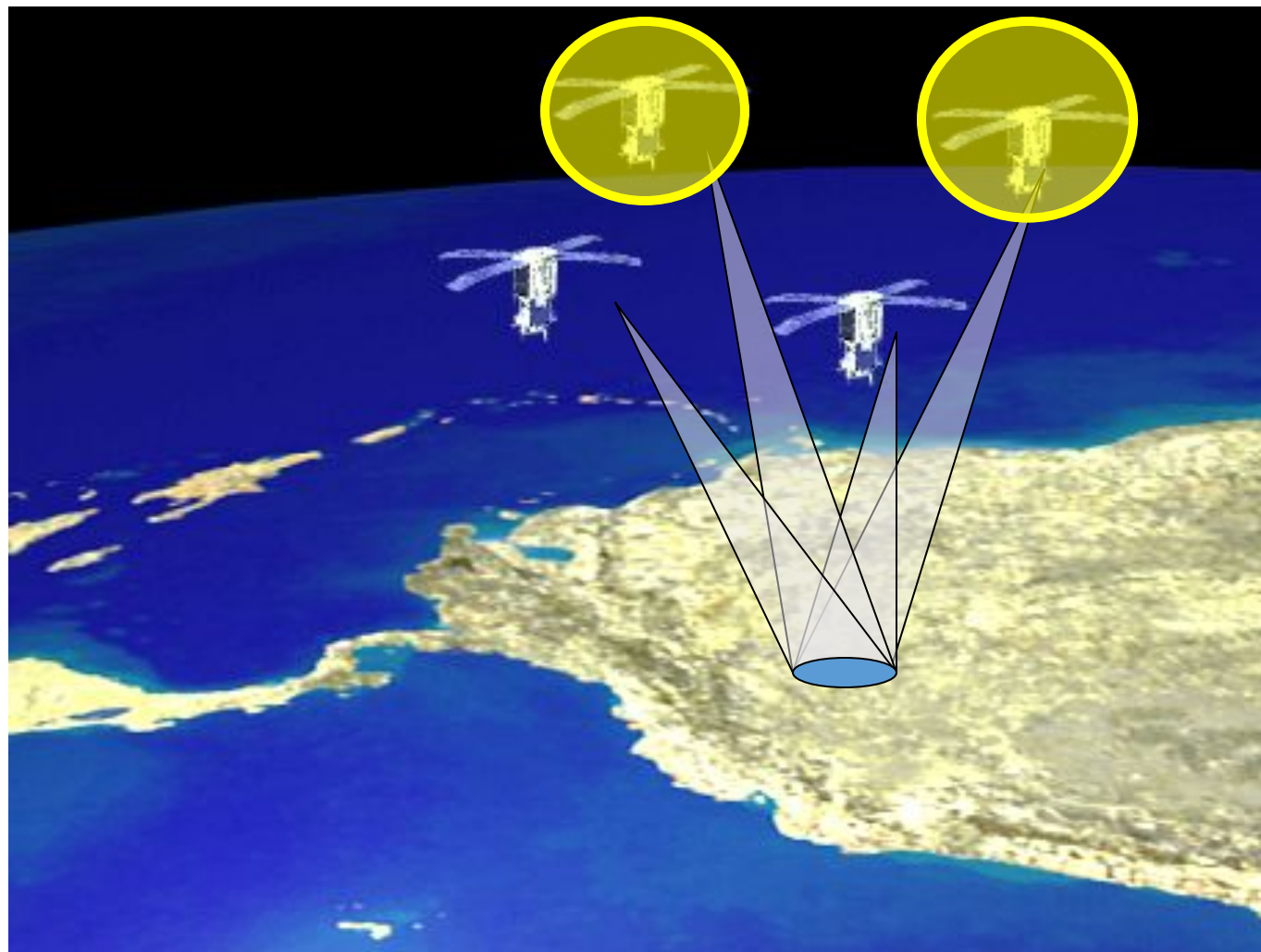
Целевой эффект КНС ГЛОНАСС - обеспечение требуемого геометрического фактора выбором необходимого созвездия



Целевой эффект ССС - наличие в зоне видимости абонента хотя бы одного КА связи, в ряде случаев n - кратность перекрытия зон радиовидимости



Целевой эффект системы ДЗЗ : Многопозиционность наблюдения, стереосъемка



Стереосъемка объекта

Возможности:

- получение стереоизображения подвижной (быстроизменяющейся) цели;
- определение динамики изменения объекта;
- устранение ошибки определения координат высокоскоростных целей, характерную для наблюдения технически более совершенным, но одиночным локатором;

Содержание частных задач управления

- **управление целевым эффектом**

- задание множества ЦЭ
- выбор ЦЭ для решения системных задач
- определение исходных данных для реализации выбранного (выбранных) ЦЭ

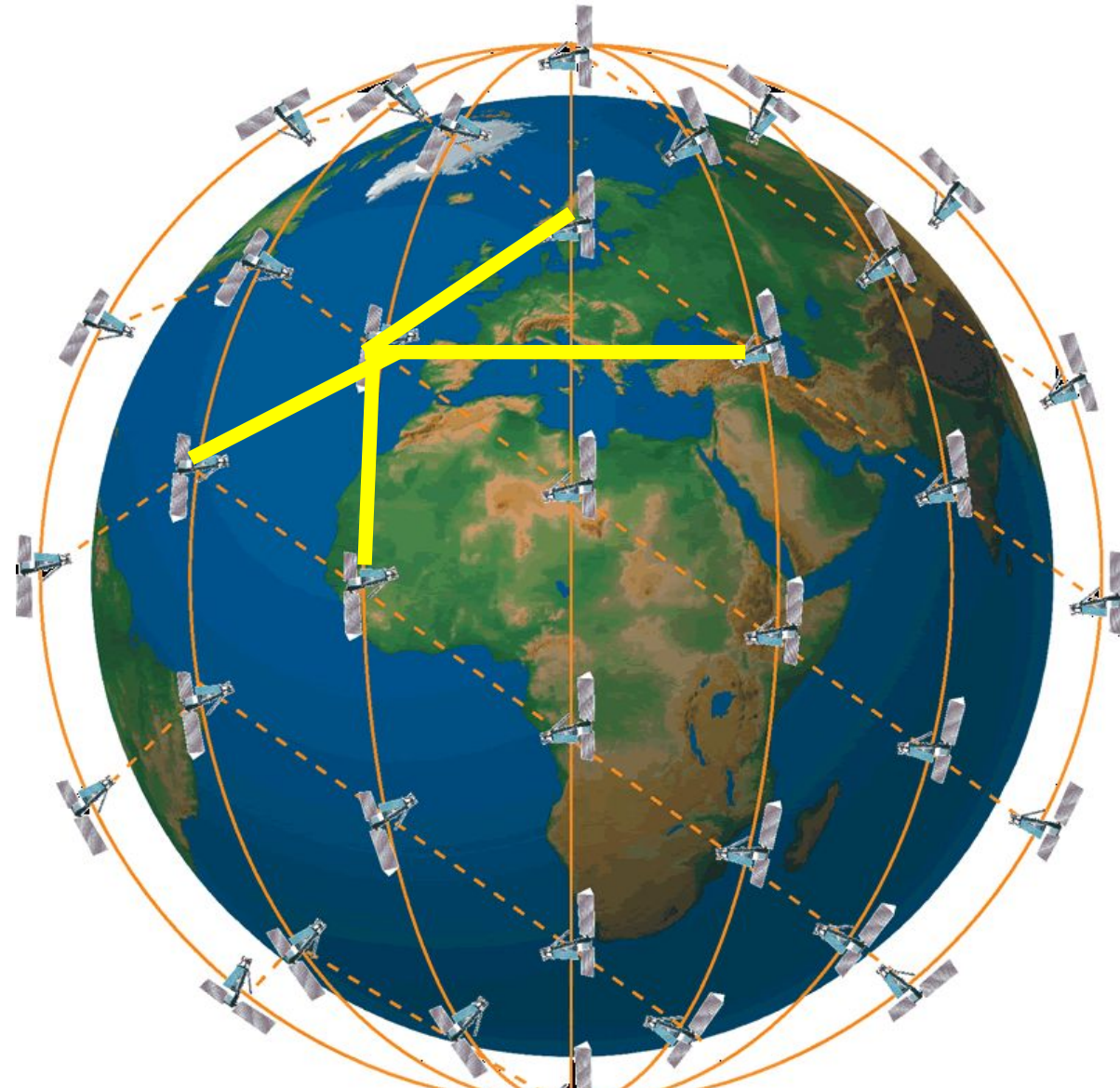
- **управление орбитальной структурой**

- создание и поддержание баллистической структуры всей группировки
- оперативный выбор орбитальных структур для реализации текущих ЦЭ
- задание баллистических параметров реализации текущих ЦЭ

Пример выбора орбитальной структуры для реализации целевого эффекта

Для реализации выбранного целевого эффекта необходимо:

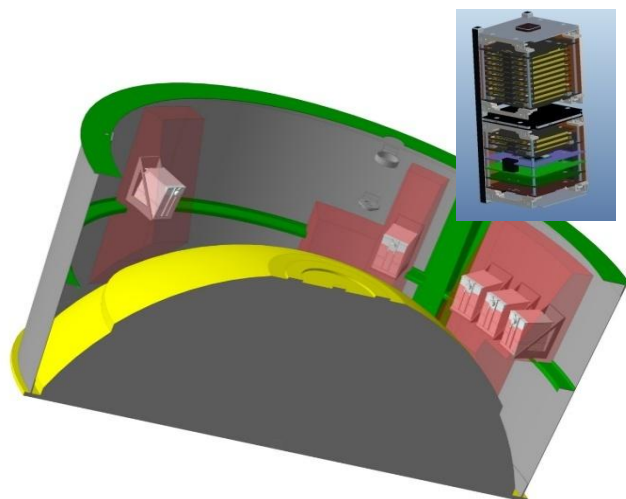
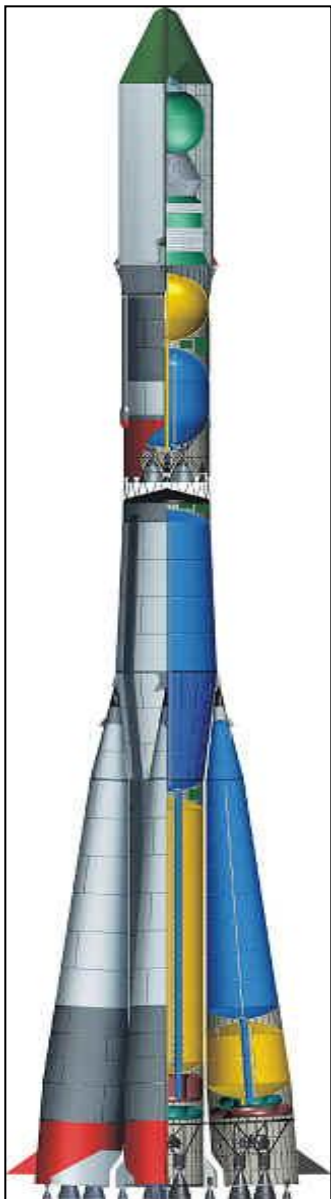
- выбрать орбитальную структуру,
- обеспечить техническую готовность КА и наличие требуемых ресурсов,
- обеспечить обмен информацией между КА, НКУ и НСК в том числе и по сетям передачи данных,
- в случае реализации распределенной бортовой обработки информации обеспечить управление вычислительной сетью GRID.



Содержание частных задач управления

- **управление численностью орбитальной группировки**
 - выведение на орбиту заданного числа КА
 - восполнение орбитальной группировки
- **управление ресурсами системы**
 - оценка технического состояния
 - учет энергоресурса и запаса РТ
 - выбор КА, способных реализовать ЦЭ
 - управление параметрами как специальной, так и обеспечивающей бортовой аппаратуры

Варианты выведения МКА



«Старт»



ЗМЗ7 «Штиль»

Морской ракетно-космический комплекс на базе ПЛАРБ

Выведение кластеров МКА с помощью РН «Днепр»



**2013 год -
кластерный
запуск
33 МКА
(РФ - 1МКА)**



Содержание частных задач управления

- **управление сетью передачи данных**

В разработанных рекомендациях сектора телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) задачи системы управления определены как **общие и прикладные**. **Общие** состоят в сборе, обработке, хранении и выдаче информации управления.

Прикладные задачи определены по следующим функциональным направлениям:

- управление конфигурацией сети;
- управление устранением отказов;
- управление качеством;
- управление расчетами;
- управление защитой информации.

При управлении конфигурацией решаются задачи формирования и развития сети, реконфигурации сети, планирования услуг, ведения банка данных.

При управлении устранением отказов решаются задачи контроля за состоянием сети и ее элементов в реальном времени, обнаружения и локализации повреждений, восстановления трафика, оперативного перестроения сети, устранения повреждений, оповещение пользователей о проводимых работах.

При управлении качеством решены задачи сбора и анализа статистических данных по функционированию сетей и их элементов, регулирование трафика, расширение диапазона услуг связи и другое.

Содержание частных задач управления

Грид-вычисления (англ. grid — решётка, сеть) — это форма распределённых вычислений, в которой «виртуальный суперкомпьютер» представлен в виде кластеров, соединённых с помощью сети, слабосвязанных гетерогенных компьютеров, работающих вместе для выполнения огромного количества заданий (операций, работ).

С точки зрения сетевой организации представляет собой согласованную, открытую и стандартизованную среду, которая обеспечивает гибкое, безопасное, скоординированное разделение вычислительных ресурсов и ресурсов хранения информации, которые являются частью этой среды, в рамках одной виртуальной организации.

- **Управление вычислительной сетью GRID**

- контроль состояния сети
- распределение вычислительных задач
- хранение данных
- обработка данных и анализ результатов

Управление системным эффектом

управление целевым эффектом

задание множества ЦЭ

выбор ЦЭ для решения системных задач

определение исходных данных для реализации ЦЭ

управление орбитальной структурой

создание баллистической структуры

создание орбитальной структуры для реализации ЦЭ

управление численностью орбитальной группировки

выведение на орбиту заданного числа КА

восполнение орбитальной группировки

управление ресурсами системы

оценка технического состояния

учет энергоресурса и запаса РТ

выбор КА, способных реализовать ЦЭ

управление сетью передачи данных

контроль состояния сети

маршрутизация сообщений

Управление вычислительной сетью GRID

контроль состояния сети

распределение вычислительных задач

хранение данных

обработка данных и анализ результатов

Показатели качества системы управления КА и НАКУ в целом

- 1) *Глобальность;*
- 2) *Непрерывность;*
- 3) *Оперативность;*
- 4) *Точность прогноза движения на момент решения целевых задач;*
- 5) *Надежность управления КА;*
- 6) *Производительность;*
- 7) *Пропускная способность.*

Проблемные вопросы

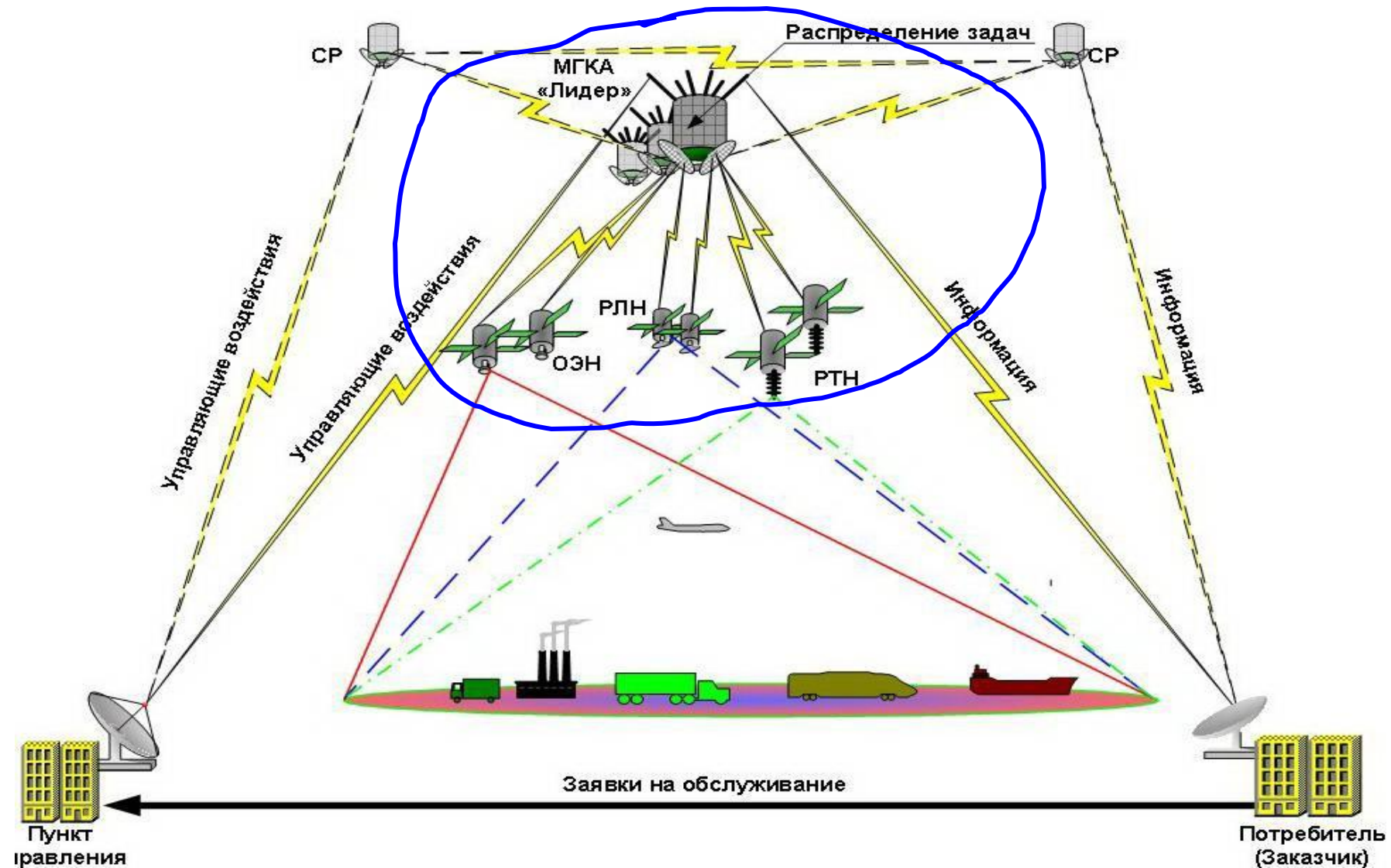
- Модель функционирования объекта управления – многоспутниковой орбитальной группировки МКА
- Варианты обеспечения глобальности управления - выбор метода управления: централизованный – обслуживание каждого МКА по отдельности средствами НКУ во время нахождения его в ЗРВ ; сетевой - обслуживание каждого МКА по отдельности средствами орбитальной сети передачи данных
- Содержание типового ТЦУ для многоспутниковой орбитальной группировки МКА
- Содержание задачи информационного обеспечения управления – КПО, НБО, ИТО и ЧВО для нового объекта управления

Модель функционирования системы МКА – совокупность режимов функционирования

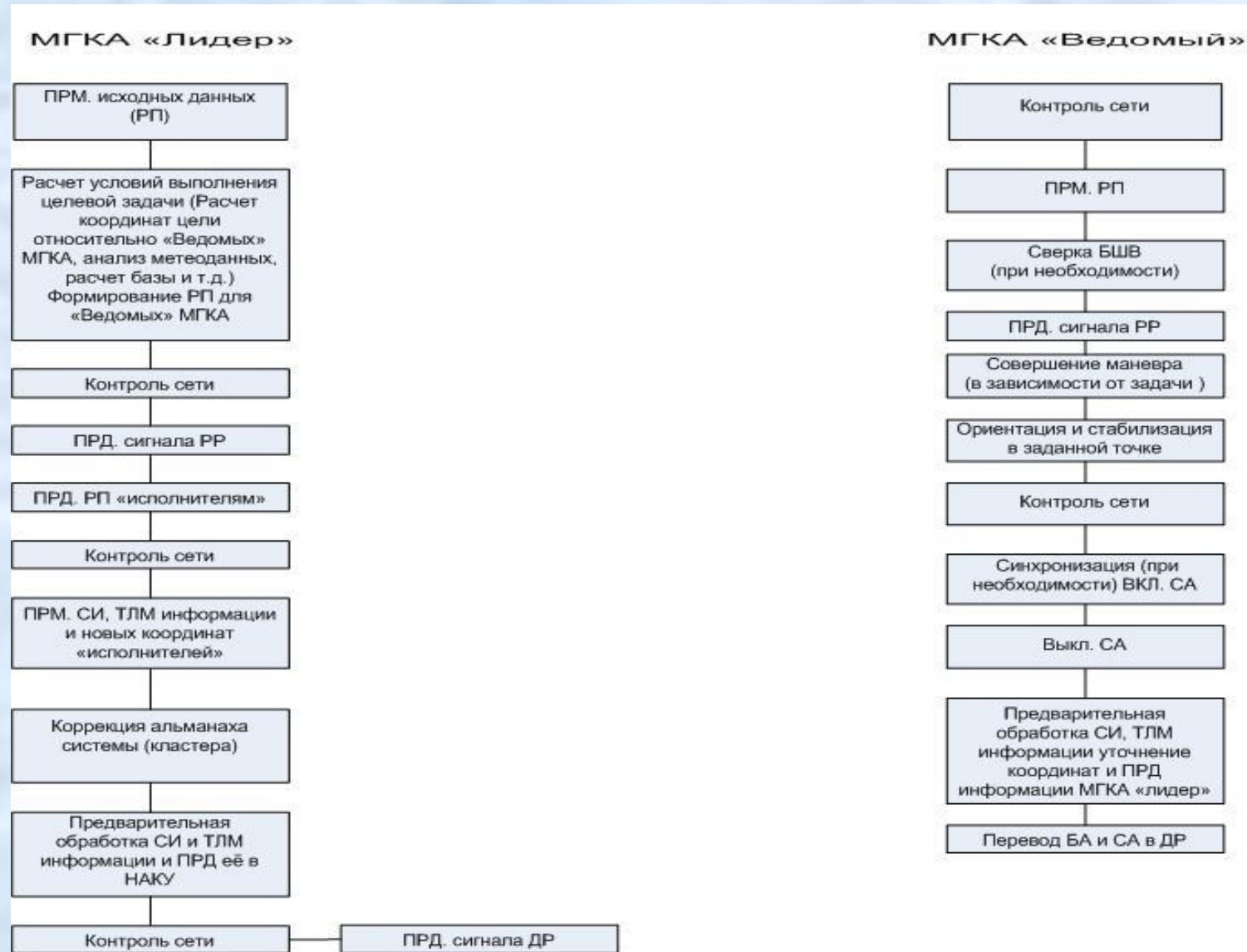
Режимы функционирования системы МКА:

- **режим первоначальной ориентации и формирования исходной структуры системы МКА;**
- **дежурный режим;**
- **режим формирования рабочей структуры системы МКА;**
- **автономный режим – индивидуальный для каждого МКА**

Пример функциональной структуры кластера МКА ДЗЗ



Режим формирования рабочей структуры кластера МКА



Вариант **Режимы функционирования кластера**

Кластер	Режимы функционирования кластера и содержание их алгоритмов								
	Режим формирования кластера			Дежурный режим			Рабочий режим		
МГКА «Лидер»	Вкл. БВС	ПО	КС	КС	ДБС	ФТЛМ НАКУ	КС	Прм. СИ и ТЛМ	КАС
	АН	КО	КАС	АН	СБШВ	Прм.ИД	ПО СИ и ТЛМ	Прд. СИ и ТЛМ в НАКУ	ДР
	СБШВ	ФС ДР	ФТЛМ	РВЗ	ФС РР	Прд.РП			
			НАКУ			«исполн и- телям»			
МГКА «Ведомый»	Вкл. БВС	ПО	КС	КС	ДБС	ФТЛМ «Лидер»	КО	ОС	Вкл.СА
	АН	КО	ФТЛМ «Лидер»	АН	СБШВ	Прм. РП	Выкл.С А	ПО СИ	КС
	СБШВ						Прд СИ и ТЛМ «Лидер»	ДР	

Вкл. БВС – включение бортовой вычислительной сети, ПО – первоначальная ориентация, АН – автономная навигация, КО – коррекция орбиты, КС – контроль сети, ФТЛМ – формирование телеметрической информации, КАС – коррекция альманаха системы, СБШВ – сверка бортовой шкалы времени, ФС ДР – формирование сигнала дежурный режим, ДБС – диагностика бортовых систем, Прм. ИД – прием исходных данных, РВЗ – расчет выполнения задачи элементами системы, ФС РР – формирование сигнала рабочий режим Прд. РП – передача рабочей программы «исполнителям». ОС – ориентация и стабилизация, ПО СИ – предварительная обработка специальной информации.

Новые задачи по видам информационного обеспечения управления

Командно-программное обеспечение	Навигационно-баллистическое обеспечение	Информационно-телеметрическое обеспечение	Частотно-временное обеспечение
Выдача исходных данных для формирования рабочей структуры. Управление конфигурацией системы и рабочих структур. Решение задач маршрутизации передачи служебной и специальной информации. Формирование и поддержание альманаха системы.	Расчет и прогнозирование движения ЦМ каждого МКА. Расчет и поддержание баз в установленных пределах. Прогнозирование баллистического существования системы и отдельных структур.	Контроль состояния и функционирования каждого МКА. Контроль состояния БЦВК отдельных КА и сети ЭВМ в целом; состояния линий связи и СПД в целом. Оценка состояния системы в целом. Оценка качества выполнения целевой задачи.	Синхронизация и поддержание групповой шкалы времени системы. Синхронизация бортовой шкалы времени на всех элементах системы.

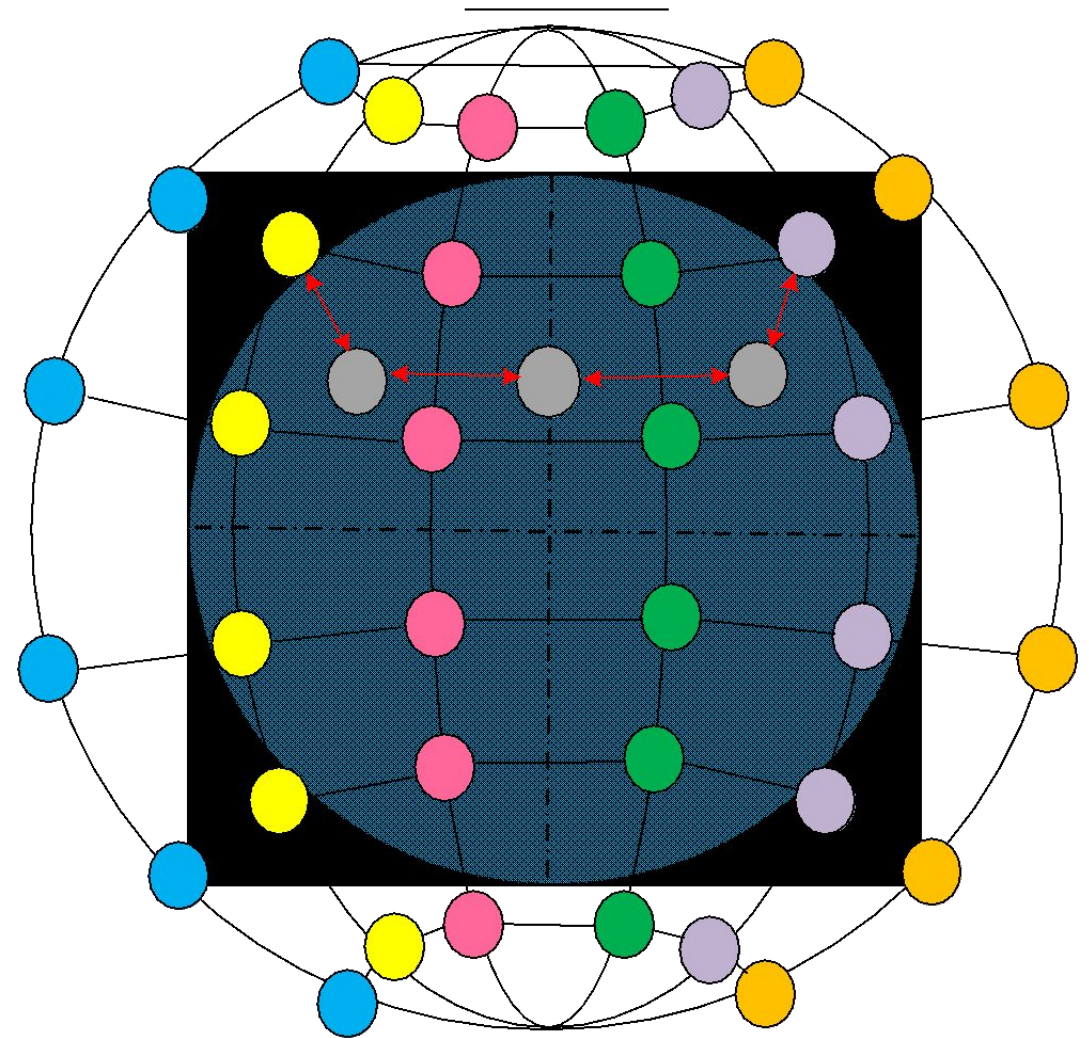
Предварительные выводы

- Без глобального управления нет реализации системного эффекта
- Ограничения возможности НКУ при «старой» технологии управления приведут к значительному повышению стоимости системы
- Целесообразен переход на сетевые методы управления
- Ввиду ограниченности возможностей БА МКА реализация сетевых методов не даст должного эффекта без увеличения степеней свободы МКА, «жесткий» контроль его вектора состояния ресурсозатратен.
- Целесообразно переходить на т.н. гомеостатические методы управления

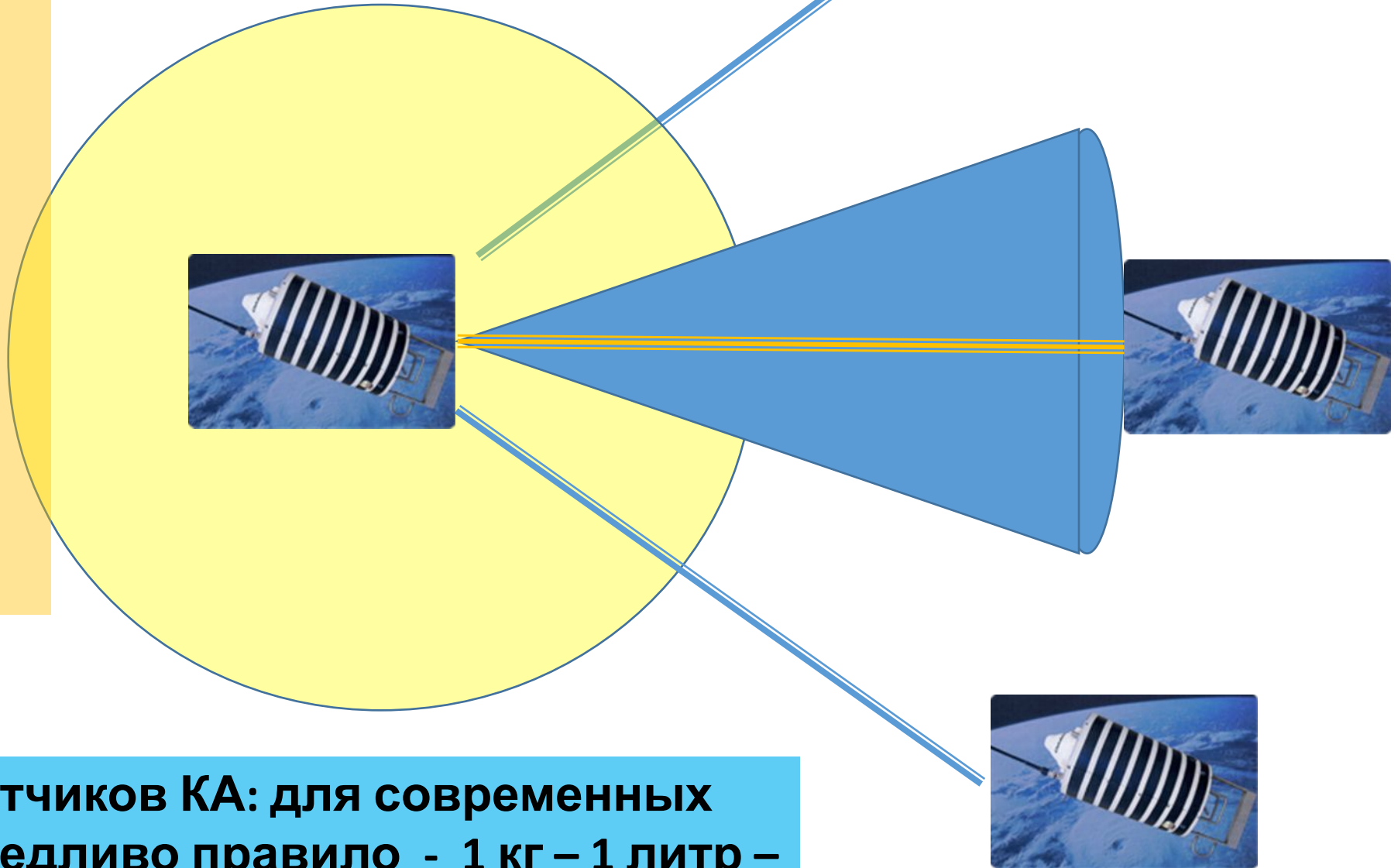
Проблемные вопросы реализации сетевых методов управления

Вопросы исследования :

- 1) как баллистическое построение будет влиять на качество межспутниковых линий связи и наоборот;
- 2) Зависимость реализации методов сетевого управления от типа МКА (нано, микро,...) и типа БСА
- 3) Функциональная специализация МКА и возможность создания сети «базовых станций» внутри многоспутниковой группировки



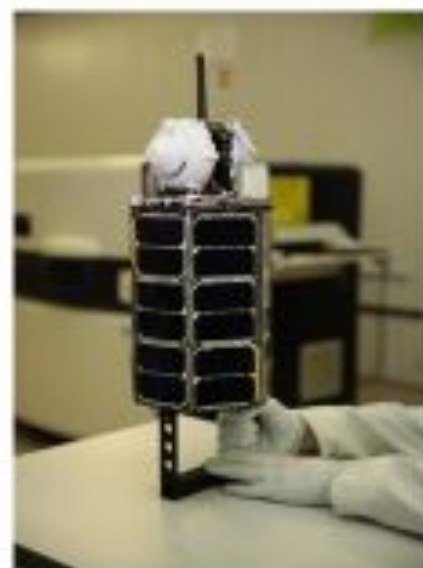
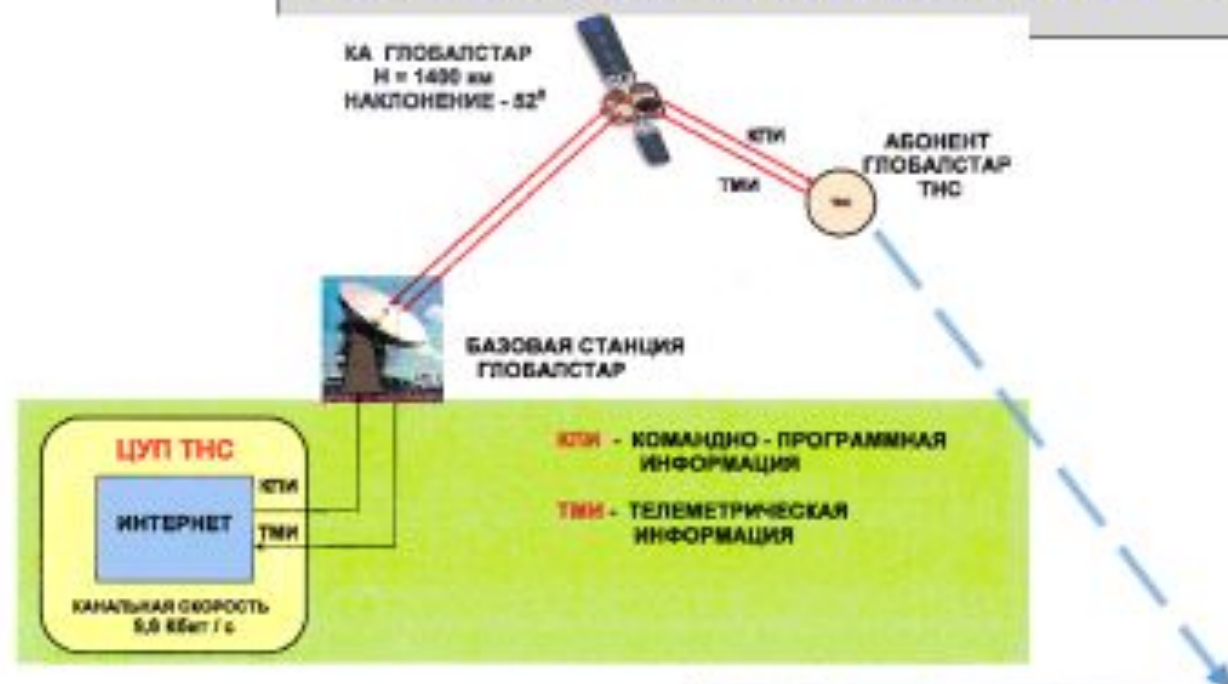
**Дальность радиолинии определяется её энергетикой –каким энергетическим ресурсом обладает каждый МКА данного типа в сети?
Какой должна быть ДН антенной системы для реализации методов сетевого управления?
Какова периодичность обмена служебной информацией?**



Из опыта разработчиков КА: для современных технологий справедливо правило - 1 кг – 1 литр –

1 Вт

СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ КА ТНС-0 АО «РКС»



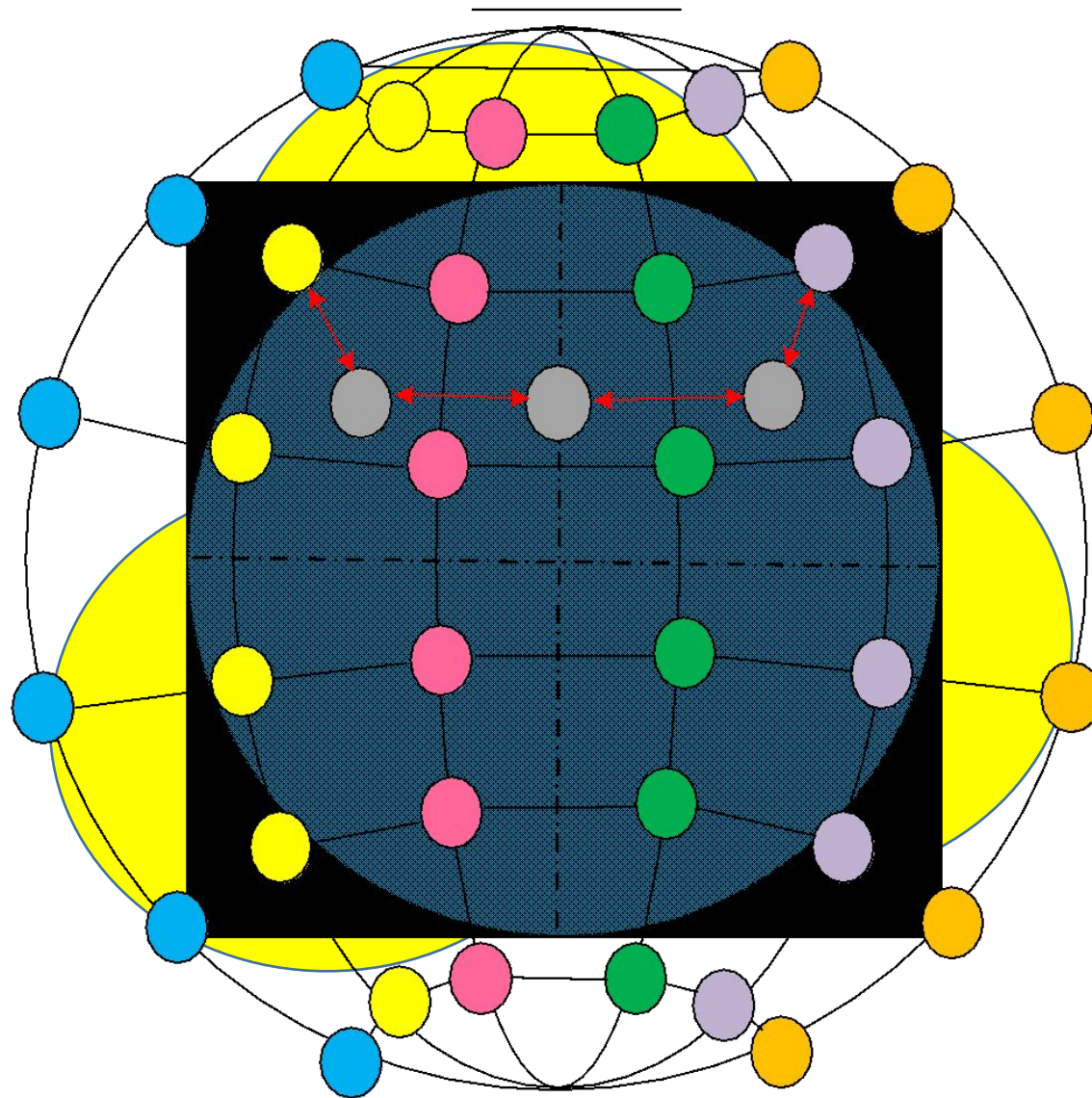
ТНС - 02



УКВ Радиостанция IC-910H фирмы
ICOM

Создание орбитальной сети базовых станций

Возможна функциональная специализация МКА в сети и создание сети «базовых станций - ретрансляторов» на основе выбранных МКА внутри многоспутниковой группировки. Тогда остальные МКА выступят в качестве абонентов, оснащенных модемами сети



Сложность системы МКА определяет высокую вероятность возникновения нештатных ситуаций

- Методы компенсации - т.н. гомеостатические методы управления, позволяющие обеспечить баланс между процессами деградации системы и её упорядоченности в условиях ограниченности ресурсов
- **Гомеостаз системы** предполагает наличие своеобразных «уступок» антагонистам – естественным процессам деградации, предоставление определённых степеней свободы элементам системы и разработку способов компенсации их негативных проявлений
- Важным направлением является создание избыточности ресурсов на орбите для обеспечения решения целевой задачи, например, по количеству КА.

- **с одной стороны,** допускается определённое снижение показателей упорядоченности, например,
 - отказ от жёсткой баллистической структуры;
 - понижение требований к точности занятия орбитальной позиции КА;
 - стохастический вывод КА на орбиту;
 - отказ от резервирования части подсистем;
 - использование элементной базы с менее строгими требованиями по надёжности – коммерческой электроники (например, «Industrial» вместо «Space»);
 - использование «наземных» решений для отработки и проведения испытаний из опыта автомобильной и электронной промышленности и т.д.;
- **с другой стороны,** разрабатываются способы компенсации влияния факторов разрушения, например,
 - способы управления системой с нарушенной баллистической структурой;
 - своевременное восполнение системы в случае отказа элементов;
 - перенос функций управления на борт КА;
 - целенаправленное использование наличных ресурсов и т.д.

Примерный состав альманаха системы МКА -как обобщающей характеристики системы

1. Календарный номер суток внутри периода.
2. Литер несущей частоты.
3. Условный номер i -го МКА в системе.
4. Условный номер типа i -го МКА в системе.
5. Поправка к среднему значению наклона орбиты i -го МКА, рад.
6. Поправка к среднему значению драконического периода обращения i -го МКА, с.
7. Аргумент перигея орбиты i -го МКА, рад.
8. Эксцентриситет орбиты i -го МКА.
9. Грубое значение сдвига шкалы времени i -го МКА относительно шкалы времени системы, с.
10. Скорость изменения драконического периода обращения i -го МКА.
11. Прогнозная оценка времени баллистического существования рабочей структуры системы.
12. Количество технически исправных МКА в системе на текущий момент времени, усл. номера.
13. Исходные данные расхода ресурса по типам МКА в соответствии с режимами функционирования.
14. Таблица маршрутизации сообщений.

НА ОРБИТЕ 150+ НАНОСПУТНИКОВ ДЗЗ Dove (Голубь) Satellite



IMAGE © PLANET LABS INC.
ALL RIGHTS RESERVED

Габариты
10 x 10 x 34 см,
вес - 5 кг.
Орбиты - 380–410
км.
Пространственное
разрешение 5 м.
*Ежесуточный
мониторинг
практически всей
поверхности
Земли*



12 наземных станций
размещены в US, UK, New
Zealand, Germany and Australia



Выполнены по технологии планшета,
резервирования нет – есть избыточность по
количеству КА.

Основные испытания проводятся в космосе
с 2013 г. 40% КА уже сошло с орбиты,
всего запускалось на орбиту >300,
из-за аварий РН выведено >270

Одиночный кластерный запуск – 88 КА февраль 2017

Проблемные вопросы:

- **Распределение функций между НКУ и БКУ в АСУ многоспутниковой космической системы МКА, определение требований к АСУ КА и составу НКУ**
- **Содержание типового ТЦУ для многоспутниковой орбитальной группировки МКА в зависимости от назначения и типа МКА**
- **Новые параметры по видам информационного обеспечения управления и способы их определения**
- **Состав альманаха системы как обобщающей системной характеристики**
- **Принципы построения орбитальной сети передачи данных и её функционирования**
- **.....**

Общий вывод

Практическая реализация отечественных проектов создания многоспутниковых орбитальных группировок, в частности, анонсированного проекта «Сфера», возможна при условии успешного решения задачи управления нового класса – управление системным эффектом многоагентной системы при ограниченности ресурсов управления.

- **Перечень прорывных технологий (ТОП-10) Роскосмоса - п.1.3. Группировки малоразмерных КА с возможностями больших спутников (включая технологии управления роем спутников). Многоспутниковая многофункциональная система.**

***Благодарю за
внимание!***

***Потюпкин Александр Юрьевич, ДТН, профессор,
ВА РВСН имени Петра Великого***

Тел. 8- 903-592-77- 31 fotin853@mail.ru