



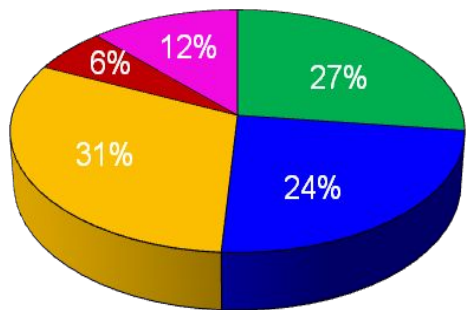
**ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
РАКЕТНЫХ ВОЙСК СТРАТЕГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ  
имени Петра Великого**



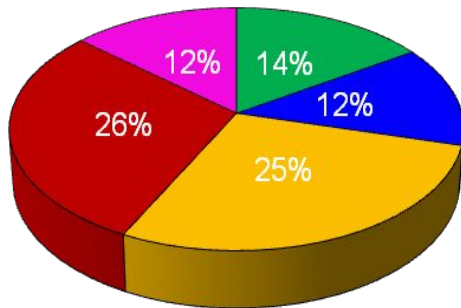
# Особенности управления многоспутниковыми орбитальными группировками

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

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПУСКОВ НАНОСПУТНИКОВ ПО ГОДАМ И НАПРАВЛЕНИЯМ



2005 г.



2020 г. (прогноз)

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

## Запуск МКА весом от 1 до 50 кг



Кол-во

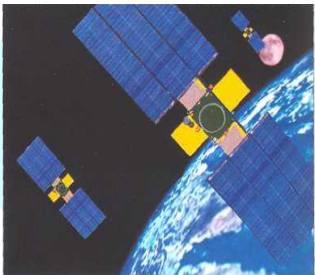




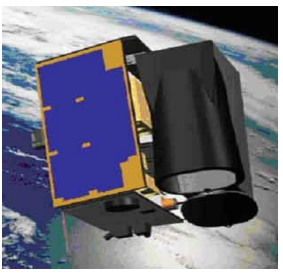
# Особенности технического облика малоразмерных космических аппаратов



*Микроспутник TacSat-1 (США)*  
 Масса .....120 кг



*Микроспутник TacSat-2 (США)*  
 Масса .....120 кг



*Британский миниспутник TopSat*  
 Масса .....90 кг  
 Разрешение ... 2,8 м



*Германский микроспутник DRL-Tubsat*  
 Масса .....45 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

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



*Серия МКА по технологии CubSat различных форматов*



*THC – 0*  
 Масса 5 кг

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

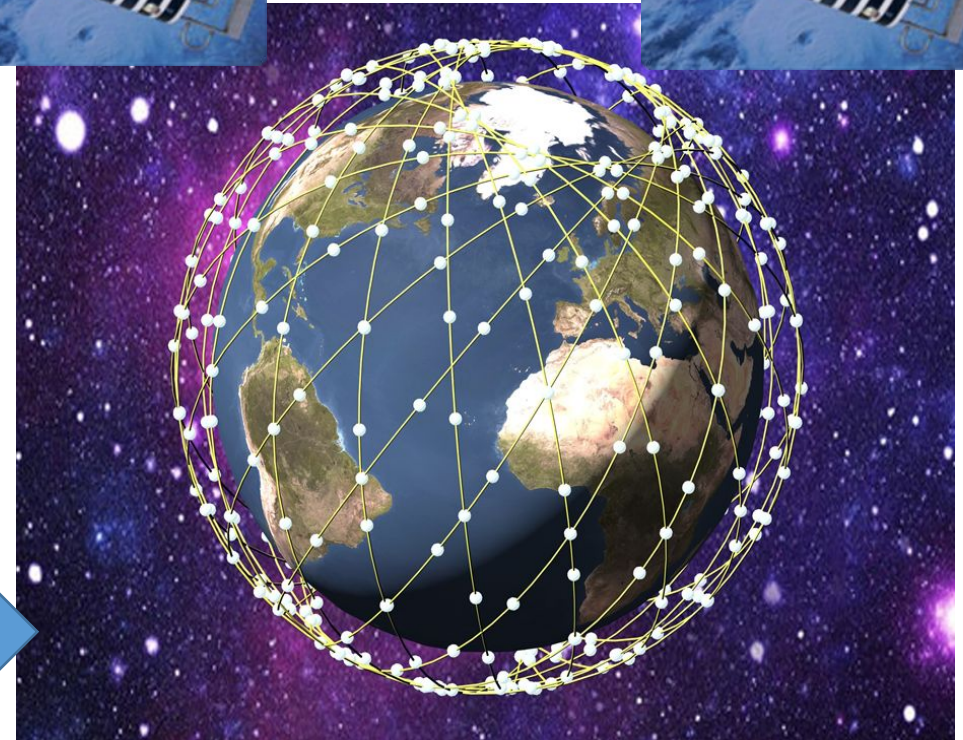
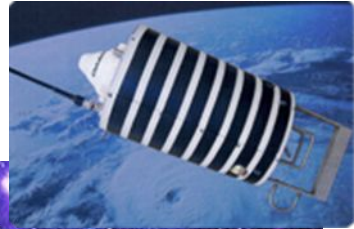
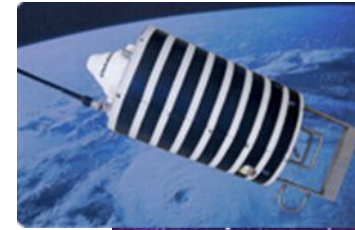
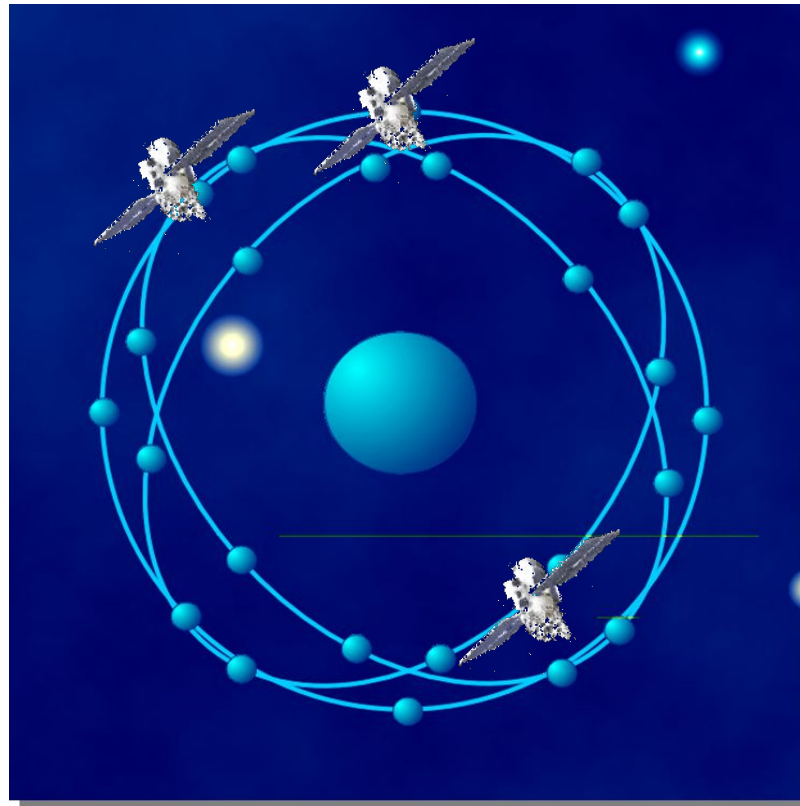
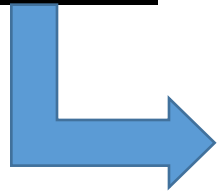
**Габаритные ограничения;  
 Низкий уровень энергоемкости**

## 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),

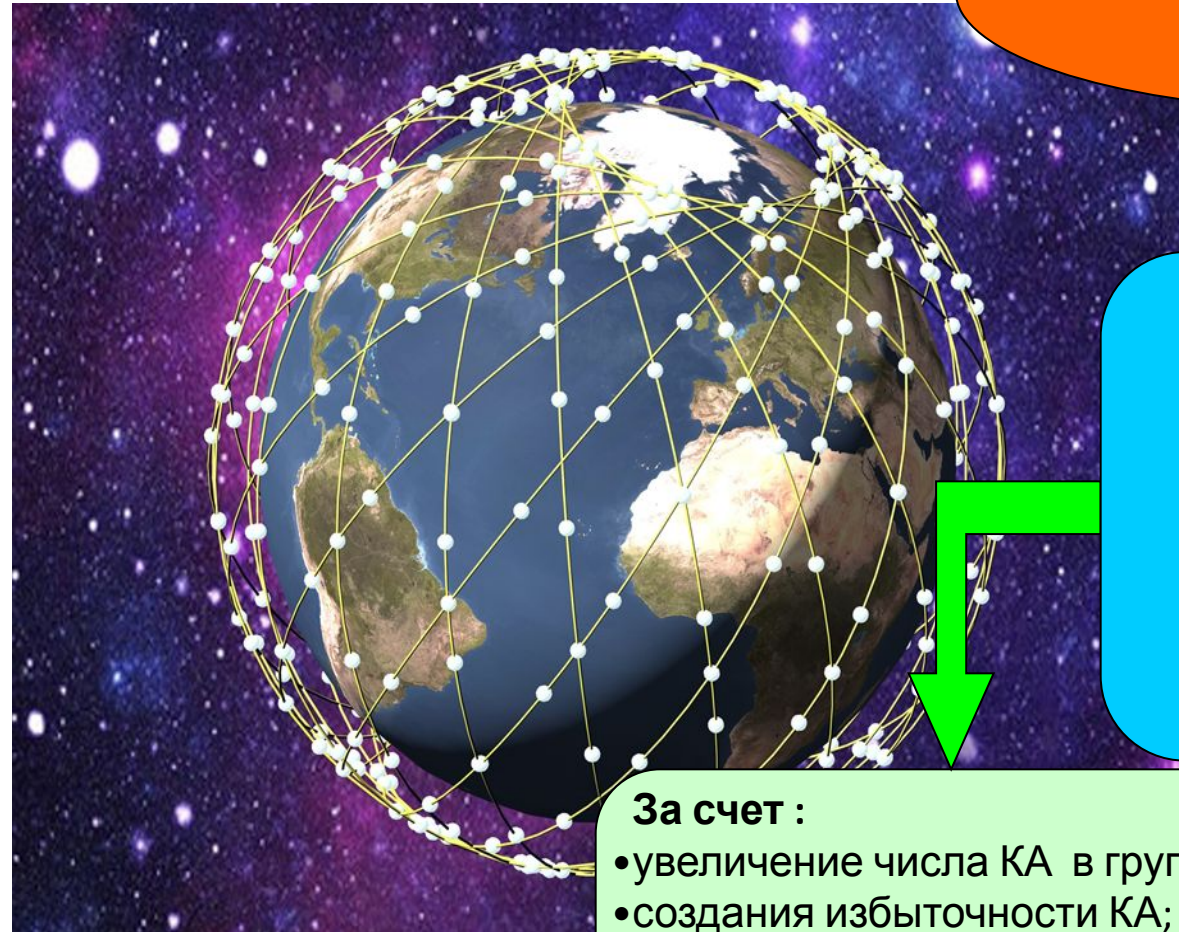
1280 - на средней орбите

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**

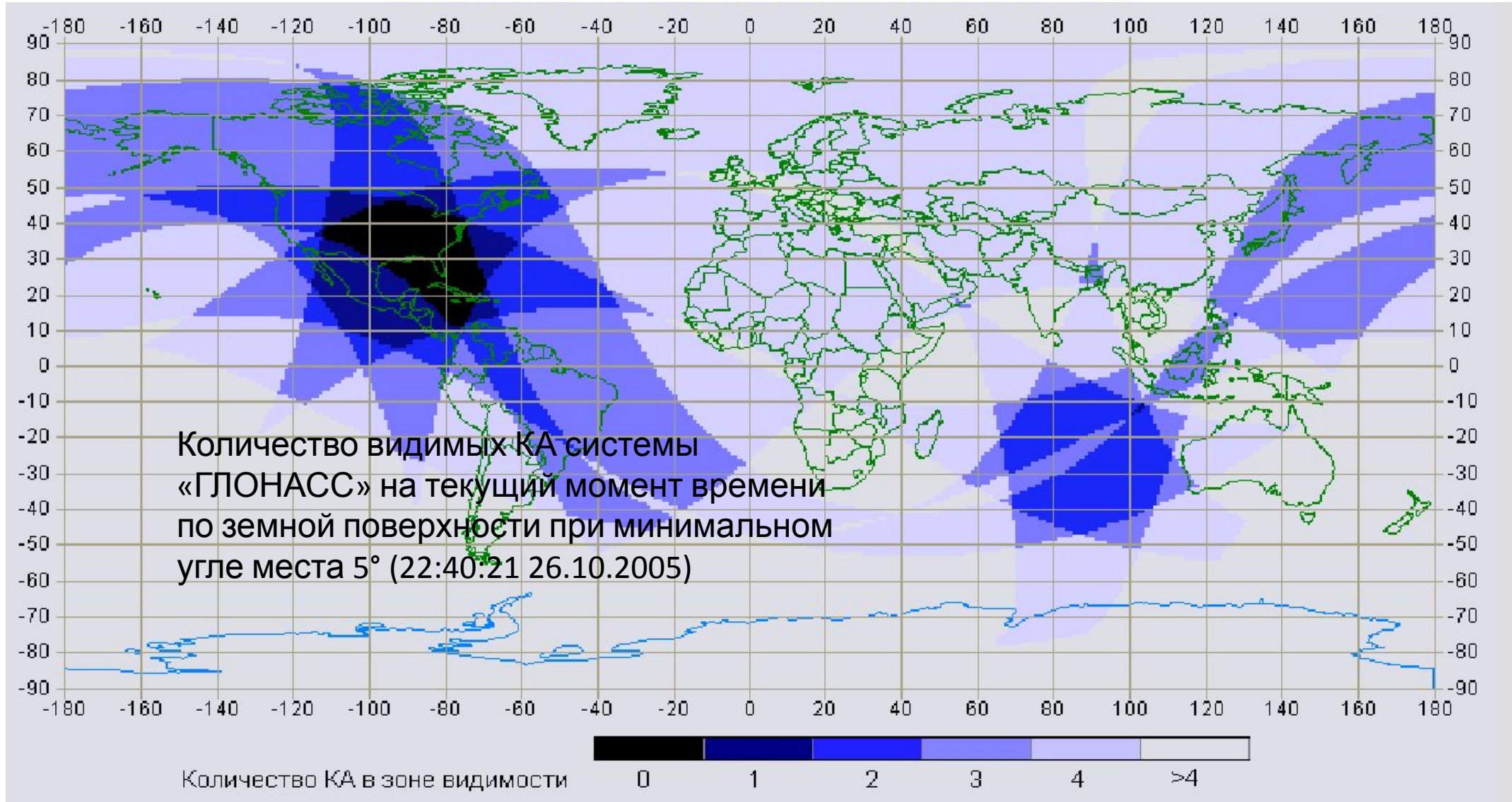
# Переход от традиционных задач управления отдельным КА в полёте к другому классу задач управления – управлению системой КА

- 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**



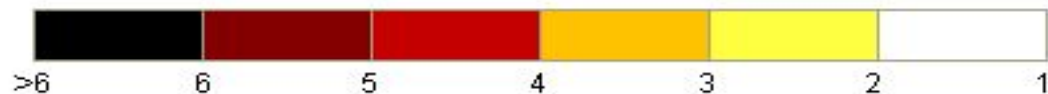
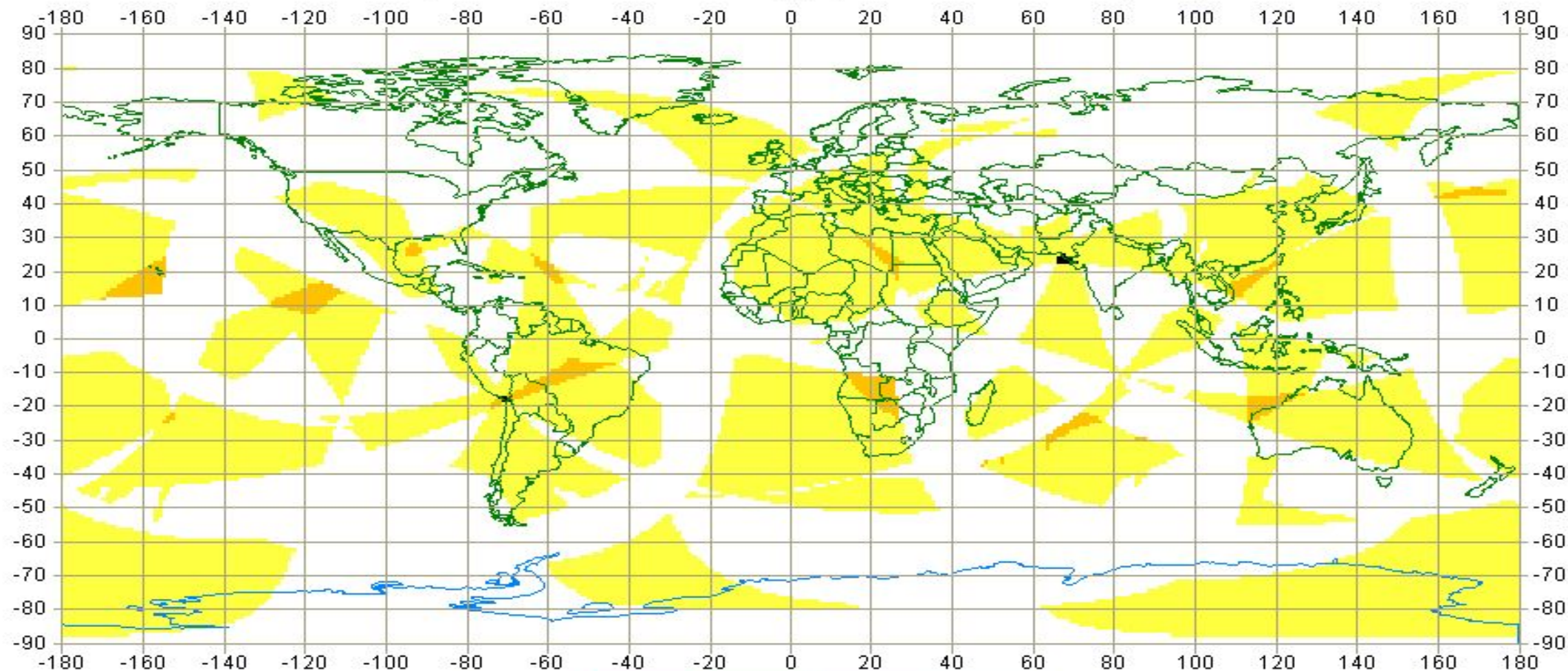
# Пример системного эффекта

## Доступность и целостность системы ГЛОНАСС



# Мгновенная доступность ГЛОНАСС

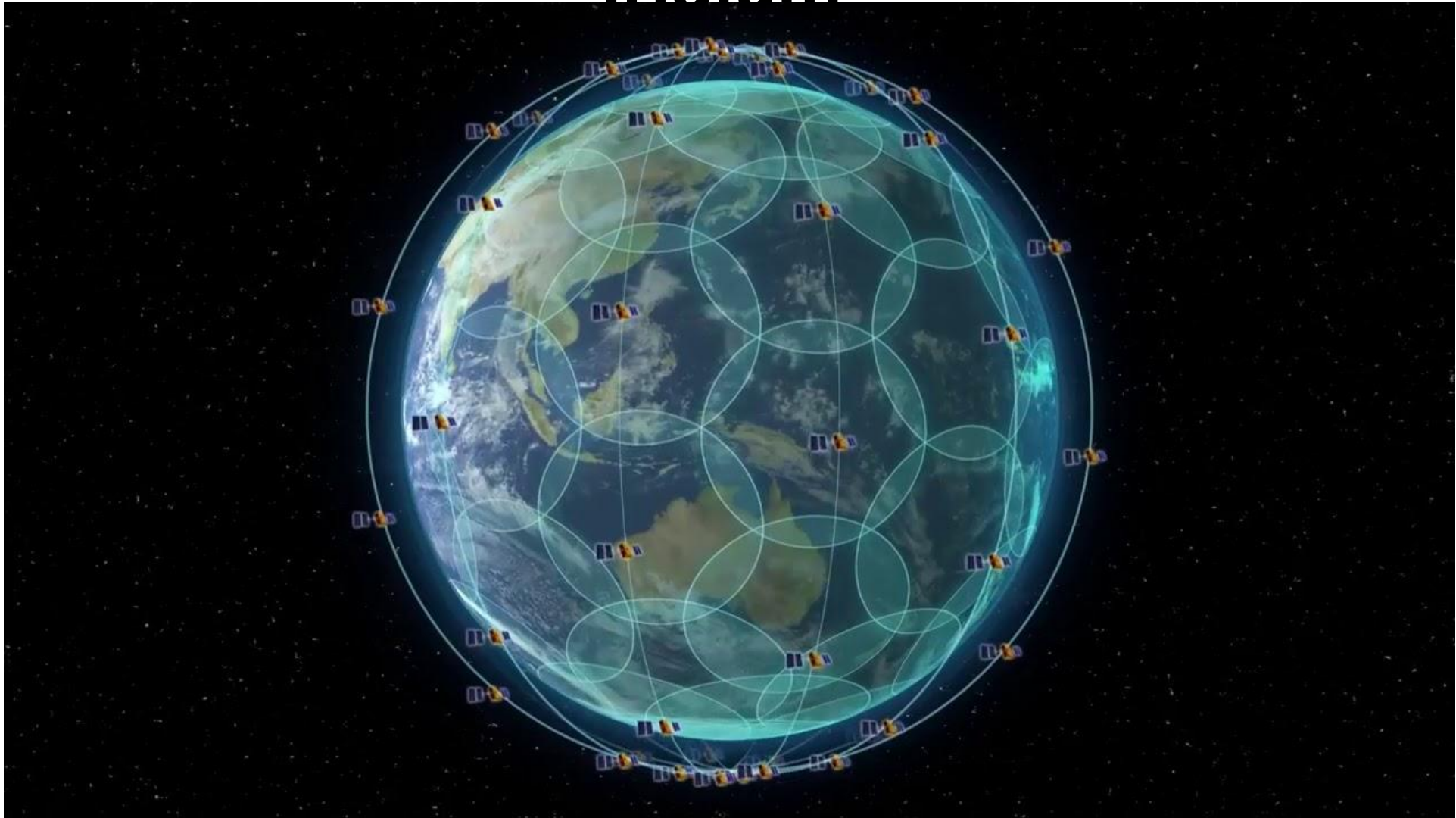
Время: 10:45:54 01.04.2019 ( декретное Московское время )



Значения позиционного геометрического фактора PDOP  
на текущий момент времени (PDOP<=6)



# Глобальность покрытия системы низкоорбитальной спутниковой связи Iridium





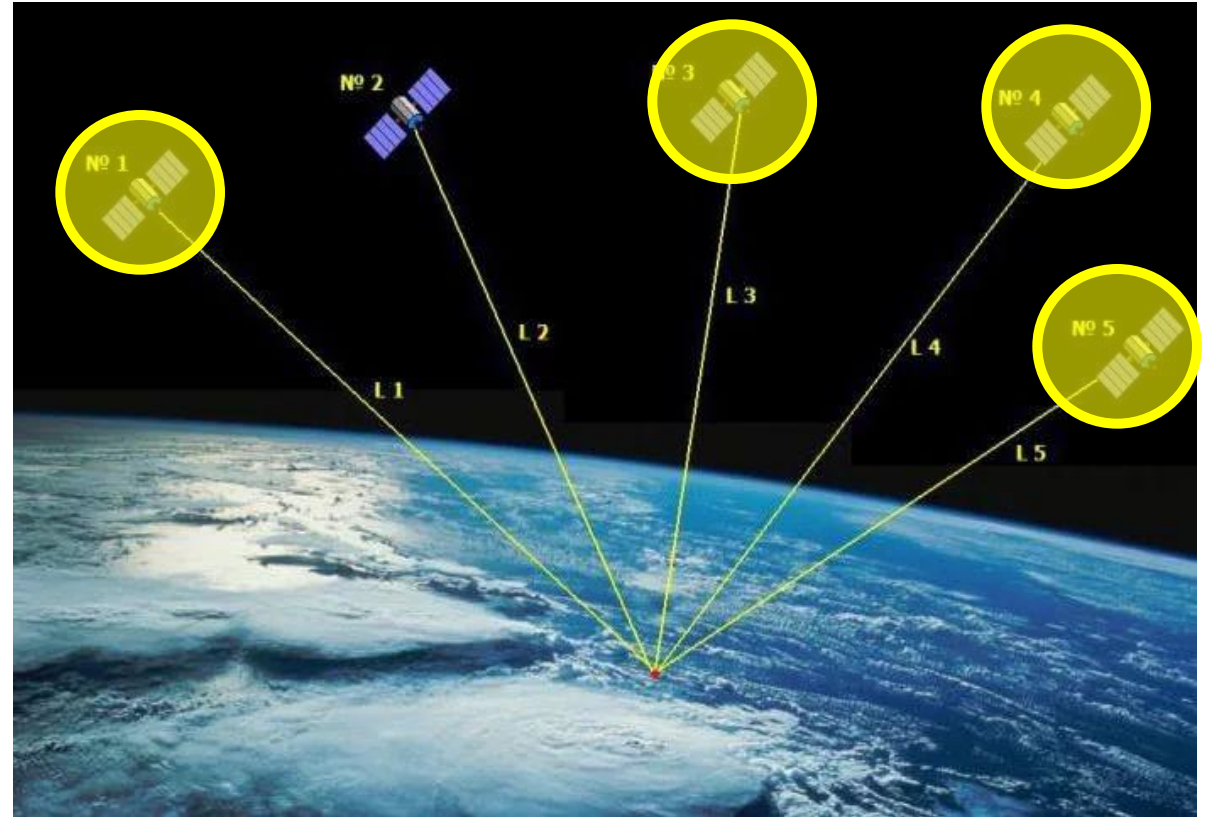
# Достижение системного эффекта

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

Например,

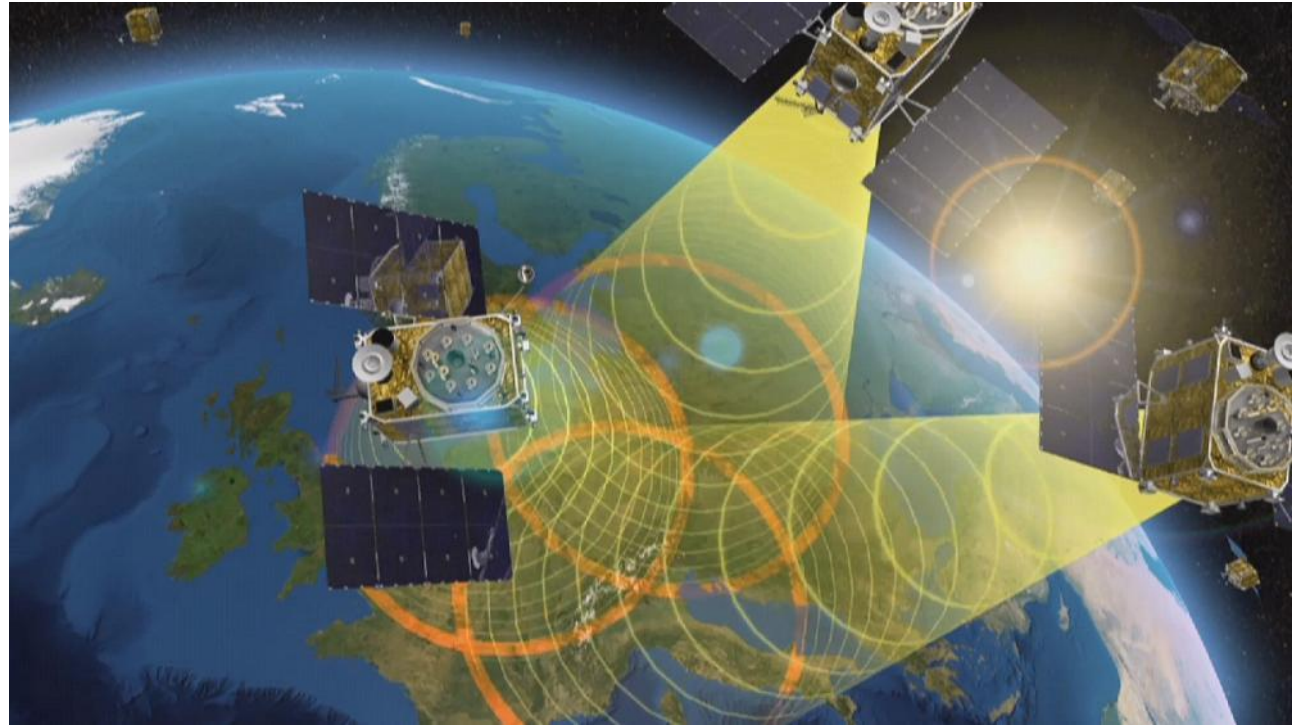
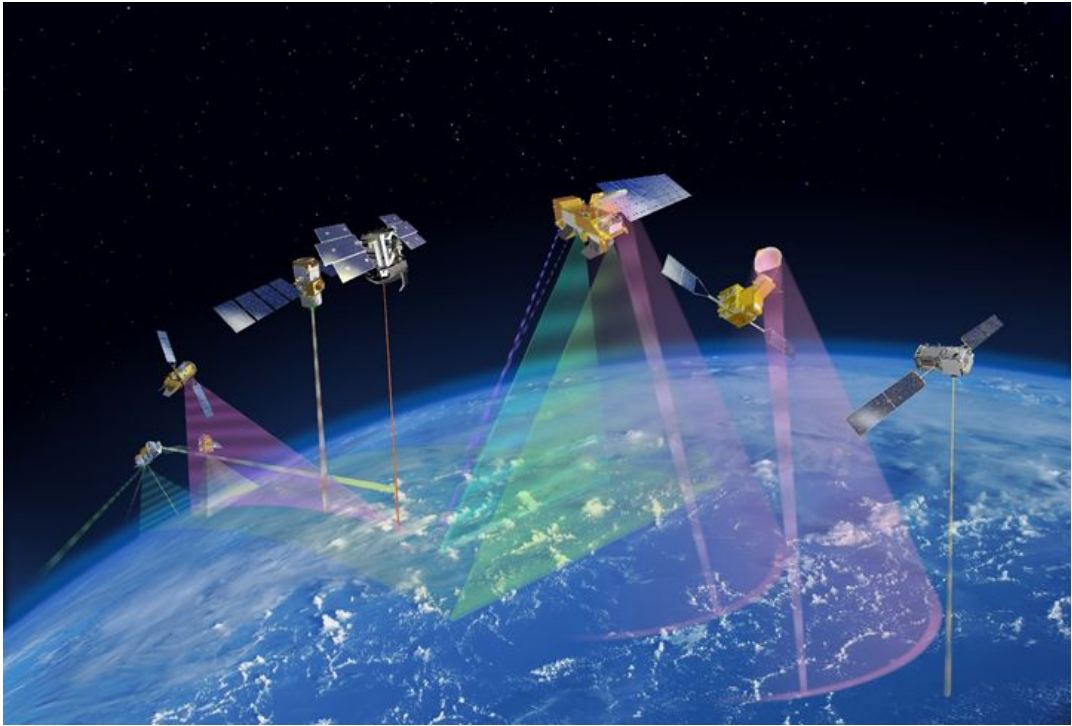
- для КНС необходимым условие решения навигационной задачи является обеспечение требуемого геометрического фактора выбором необходимого созвездия НКА;
- для систем связи - наличие в зоне видимости абонента хотя бы одного КА связи, в ряде случаев  $n$  - кратность перекрытия зон радиовидимости;
- для 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



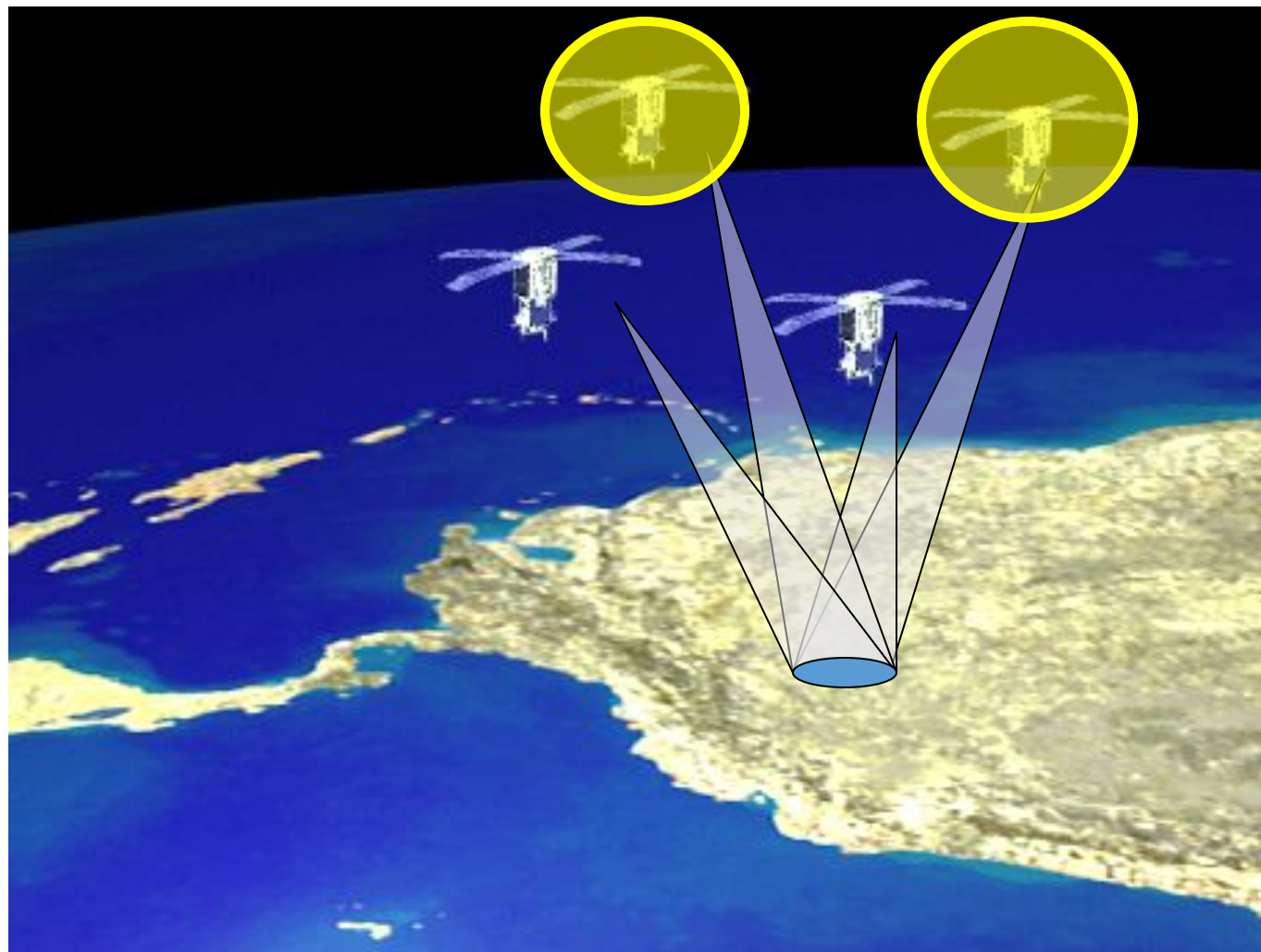


Целевой эффект ССС - наличие в зоне видимости абонента хотя бы одного КА связи, в ряде случаев  $n$  - кратность перекрытия зон радиовидимости





# 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

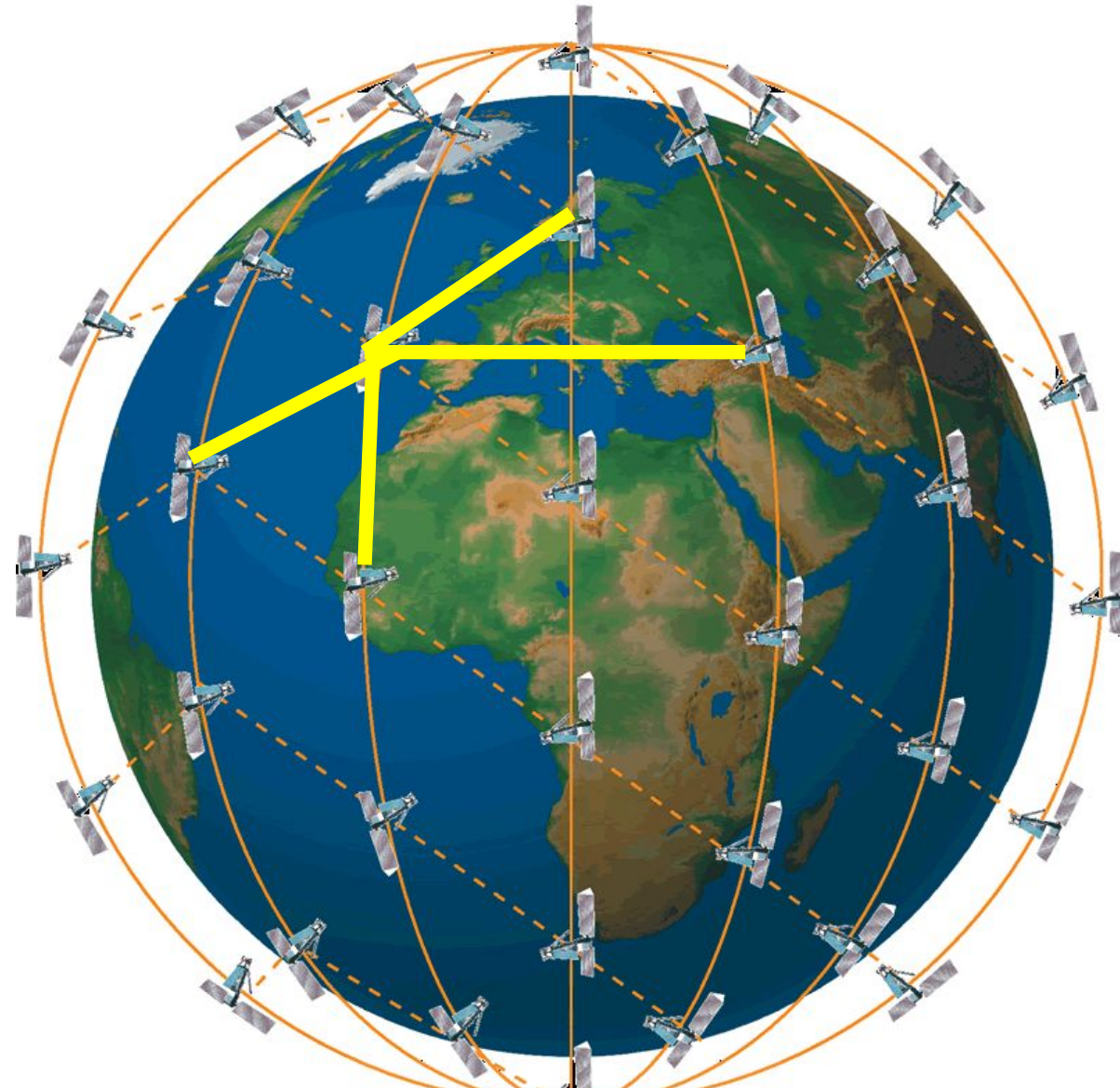
- **управление орбитальной структурой**

- 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.

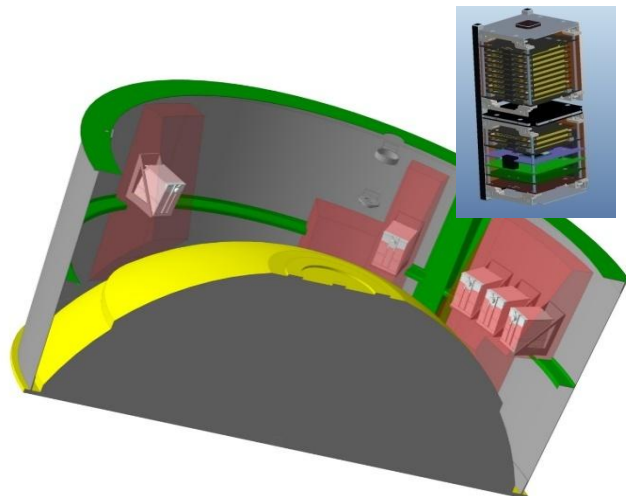
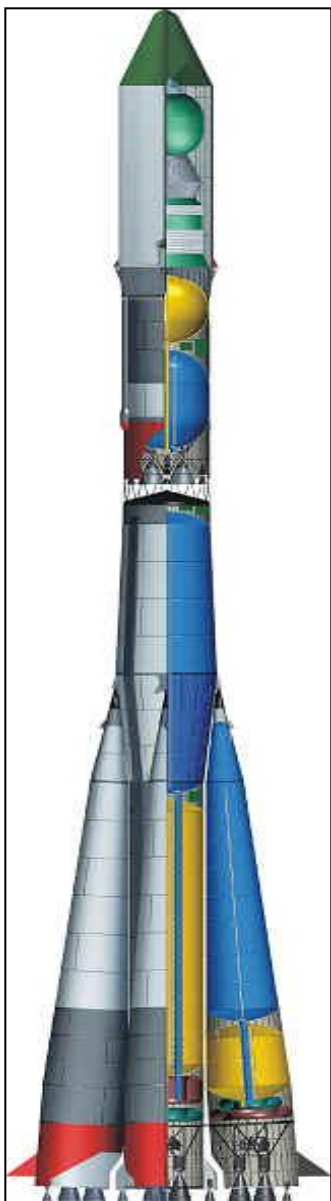




# Содержание частных задач управления

- **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

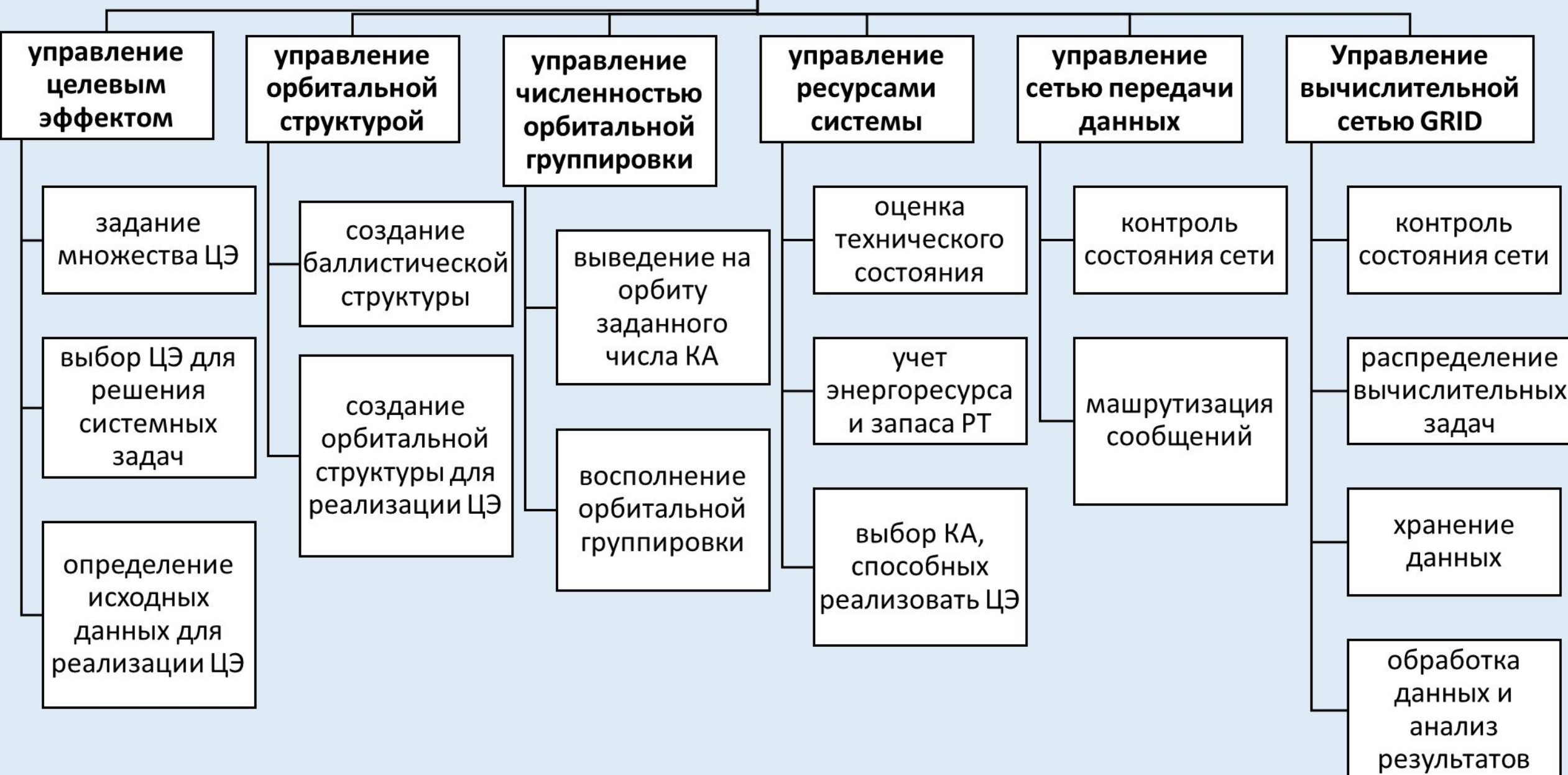
**Грид-вычисления** (англ. grid — решётка, сеть) — это форма распределённых вычислений, в которой «виртуальный суперкомпьютер» представлен в виде кластеров, соединённых с помощью сети, слабосвязанных гетерогенных компьютеров, работающих вместе для выполнения огромного количества заданий (операций, работ).

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





# 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

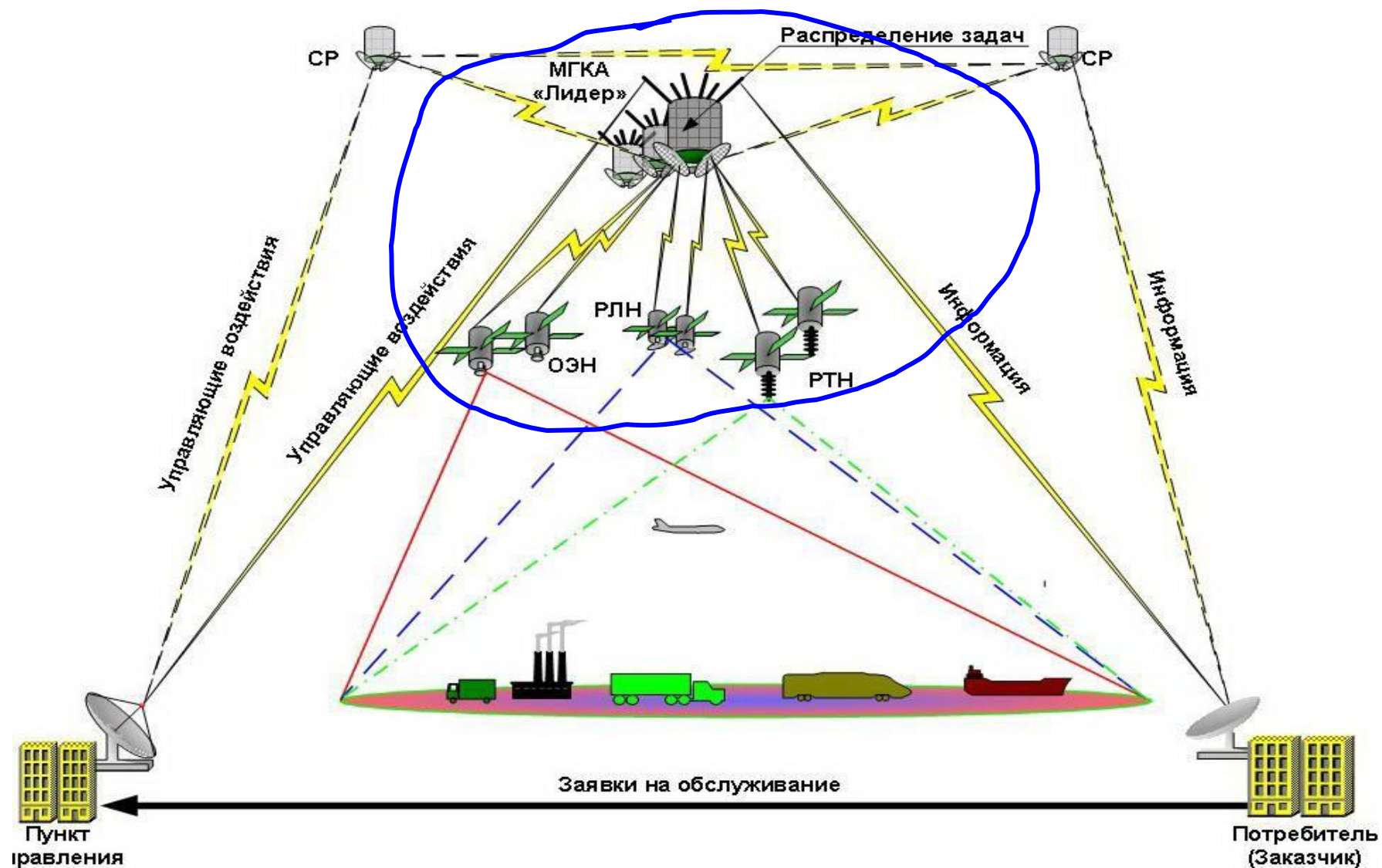
# **Модель функционирования системы МКА – совокупность режимов функционирования**

## **Режимы функционирования системы МКА:**

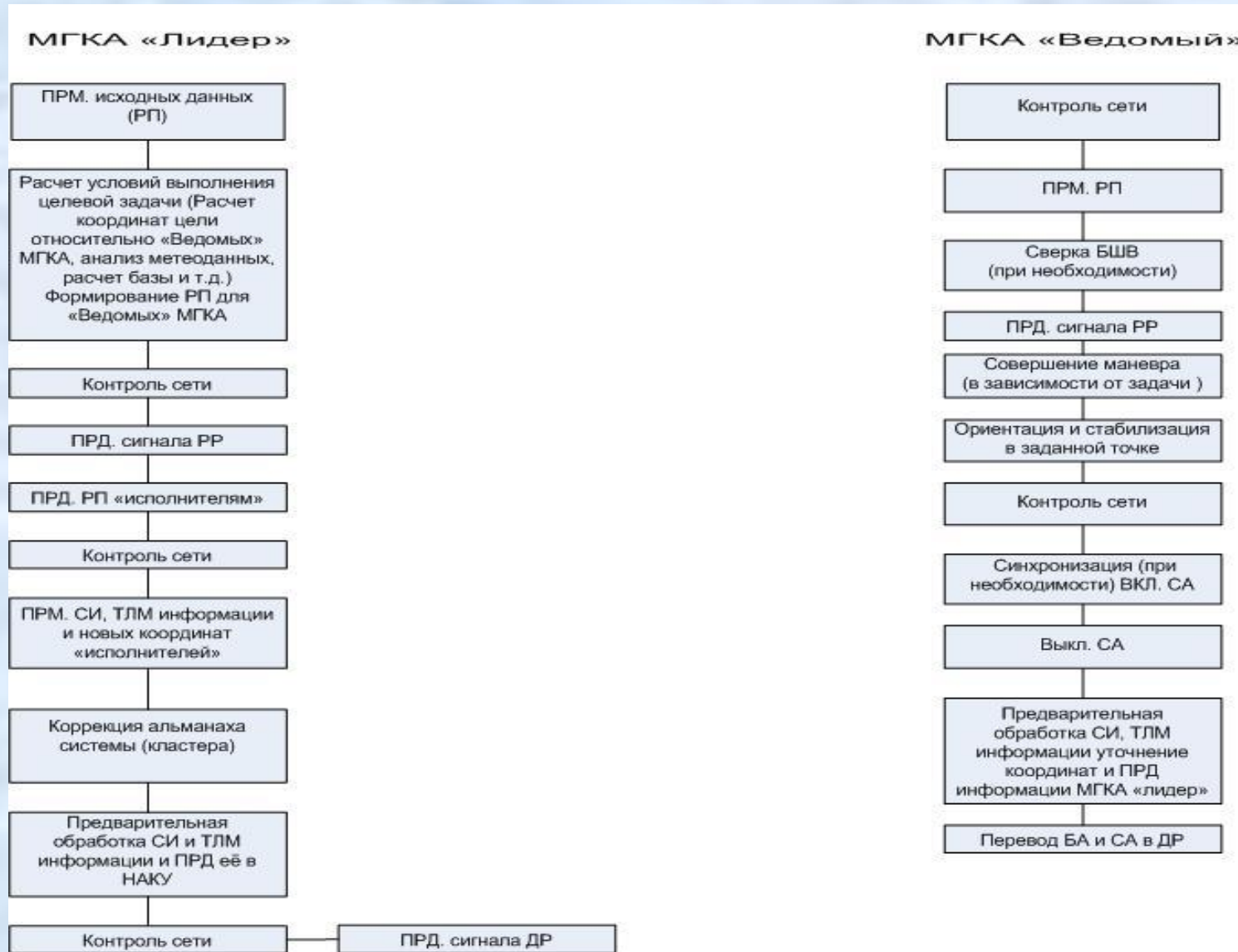
- **режим первоначальной ориентации и формирования исходной структуры системы МКА;**
- **дежурный режим;**
- **режим формирования рабочей структуры системы МКА;**
- **автономный режим – индивидуальный для каждого МКА**



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

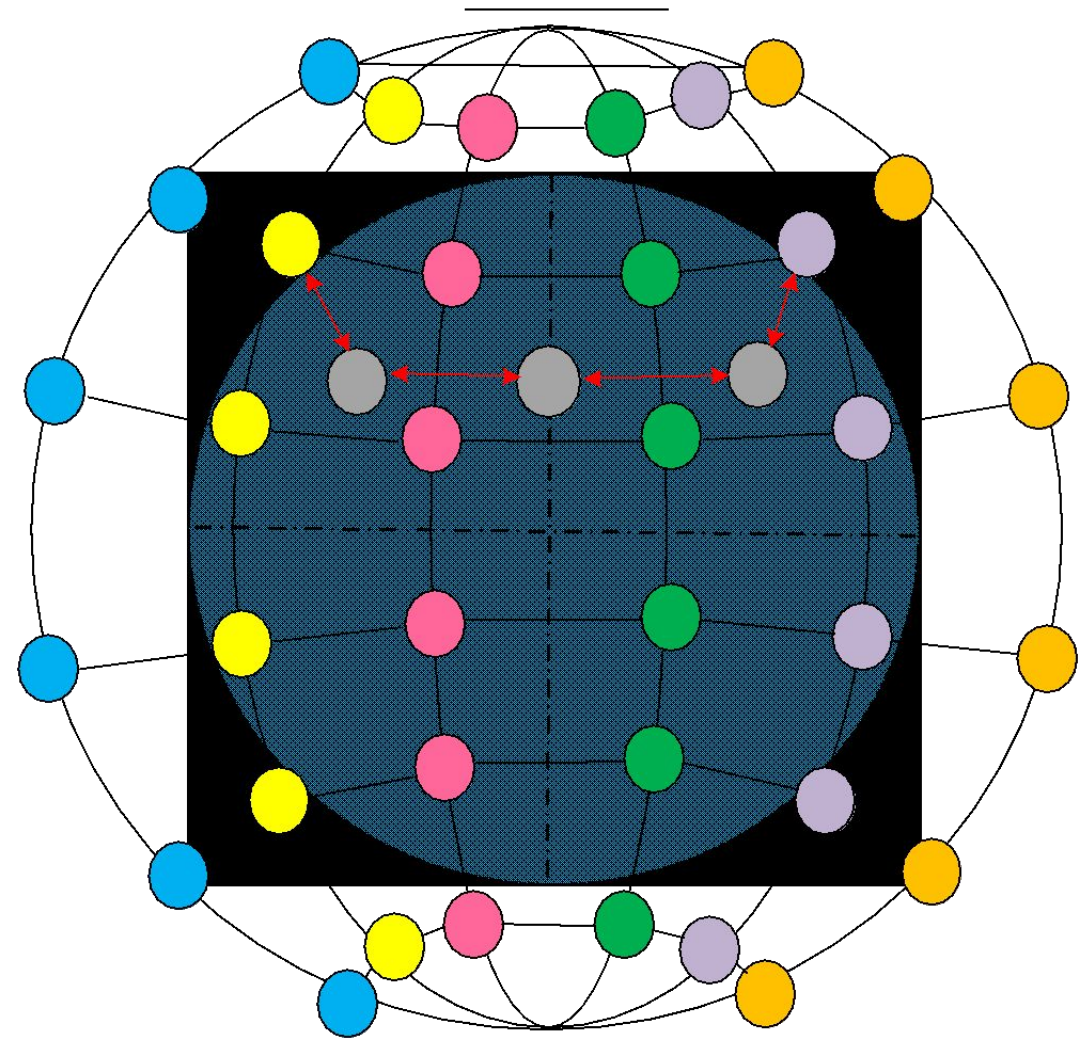
# Предварительные выводы

- 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

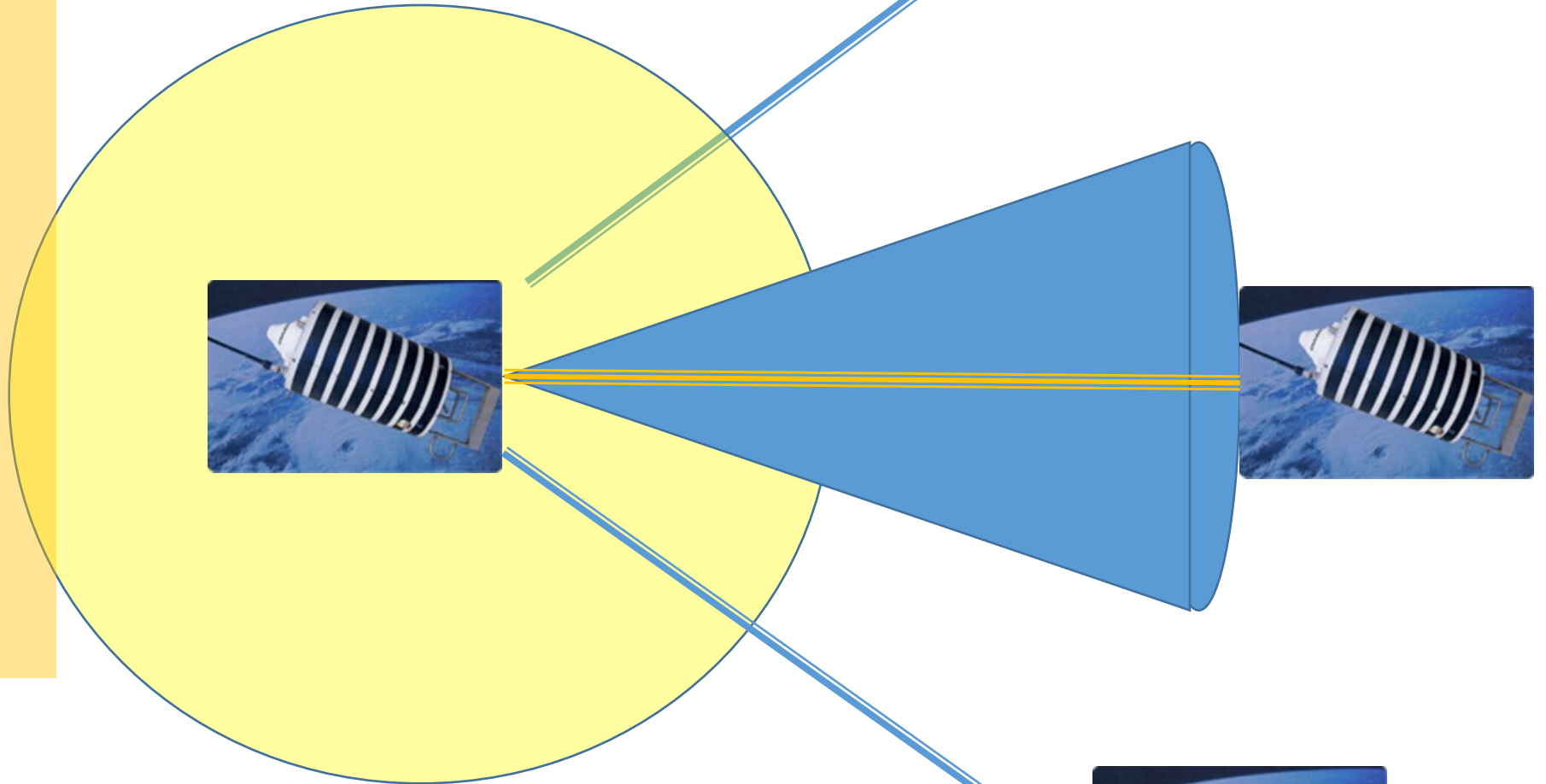
Вопросы исследования :

- 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



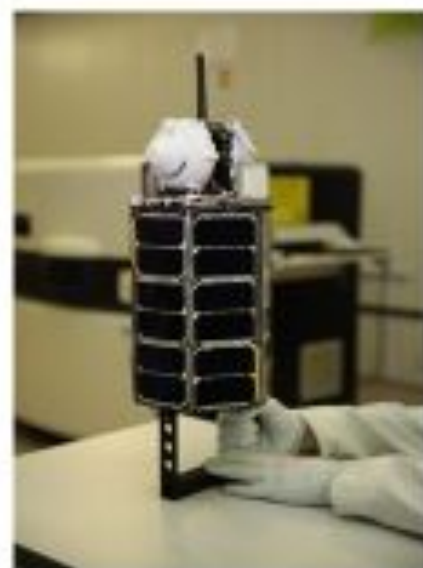
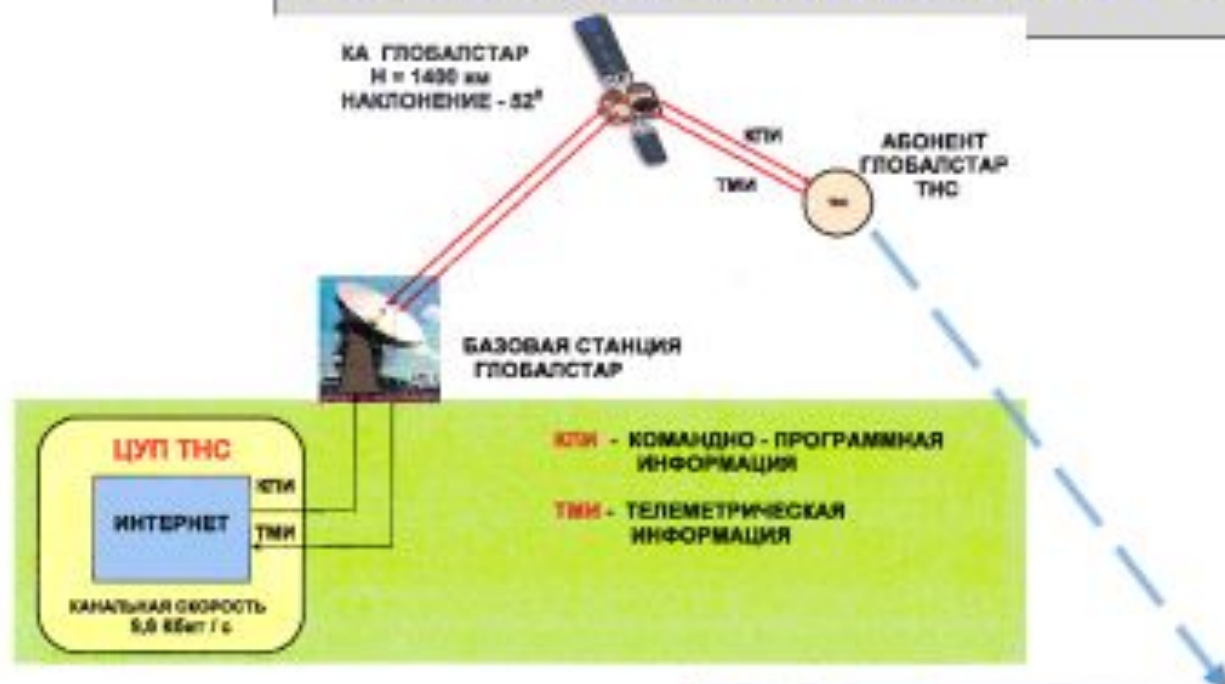


Дальность радиолинии определяется её энергетикой –каким энергетическим ресурсом обладает каждый МКА данного типа в сети?  
Какой должна быть ДН антенной системы для реализации методов сетевого управления?  
Какова периодичность обмена служебной информацией?



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

## СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ КА ТНС-0 АО «РКС»



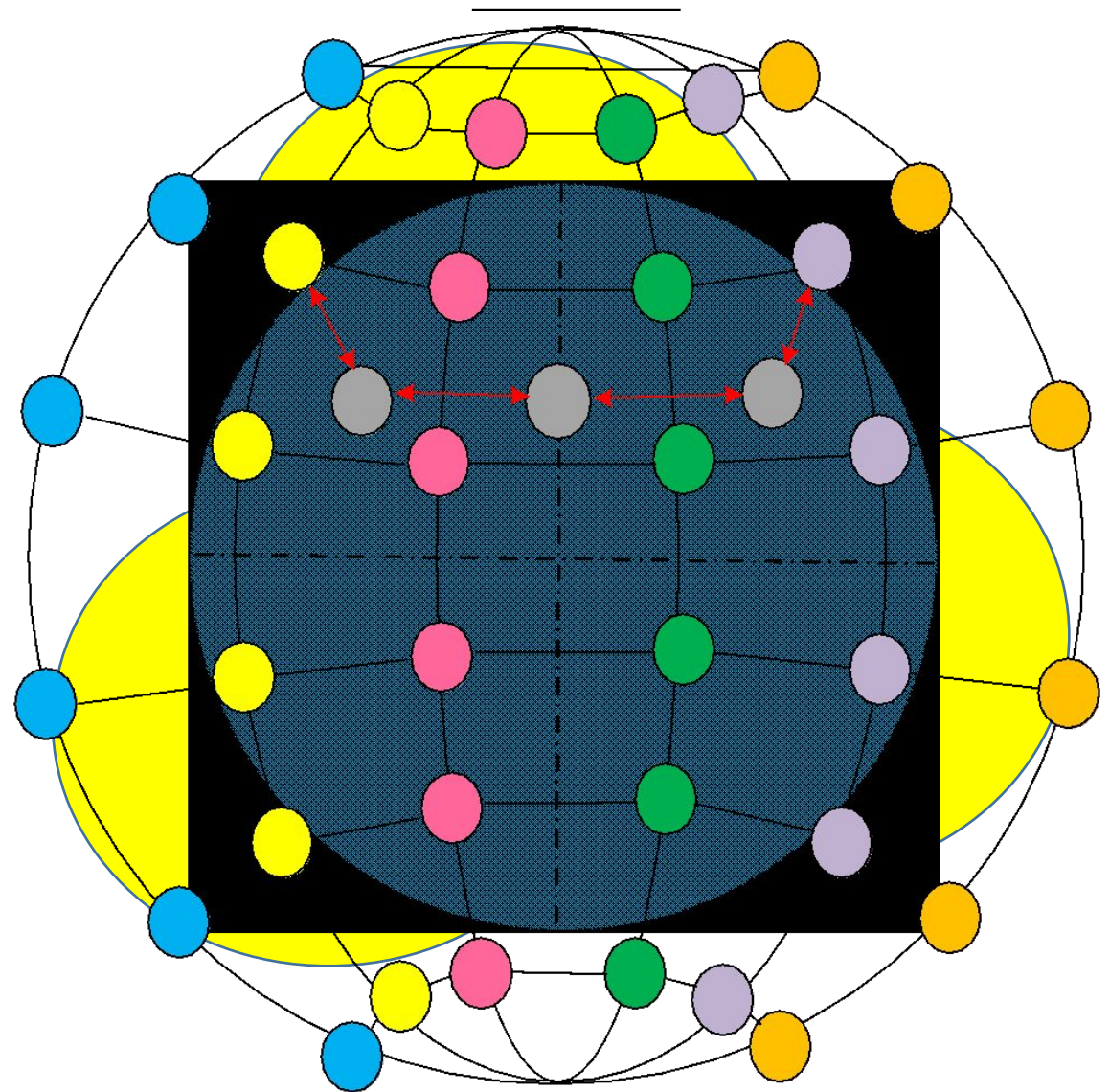
ТНС - 02



УКВ Радиостанция 1С-910Н 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



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](mailto:fotin853@mail.ru)***