Лекция 15

Общие принципы построения спутниковых систем связи

Спутниковая связь — один из видов космической радиосвязи, основанный на использовании искусственных спутников земли в качестве ретрансляторов. Спутниковая связь осуществляется между земными станциями, которые могут быть как стационарными, так и подвижными.

Спутниковая связь является ***развитием традиционной радиорелейной связи*** путём вынесения ретранслятора на очень большую высоту. В этом случае зоной его видимости оказывается значительная часть Земного шара, поэтому необходимость в цепочке ретрансляторов отпадает — зачастую оказывается достаточно и одного.

Радиооборудование спутниковой системы связи, расположенное на спутнике, называют **космической радиостанцией**, а радиооборудование, расположенное на Земле, называют **наземной радиостанцией**.

Канал передачи радиосигнала от наземной станции на спутник называют **восходящим**, а канал передачи сигналов в обратном направлении - **нисходящим**.

Помимо ретрансляционной аппаратуры, на спутниках размещают источники электропитания (солнечные батареи), а также оборудование, обеспечивающее стабилизацию положения спутников на орбите и ориентирование его в пространстве (антенны ретранслятора направляют в сторону Земли, солнечные батареи – в сторону Солнца).

Классификации и характеристики орбит спутников

Орбита – это траектория движения спутника в пространстве. Орбиты могут проходить в любом направлении вокруг земного шара, но плоскость орбиты будет проходить через центр Земли.

Классификация орбит

По форме

Круговые
для выведения на орбиту $v_c=v_1$; скорость движения спутника по орбите постоянна

Эллиптические
для выведения на орбиту $v_c>v_1$; скорость движения спутника по орбите переменна

По высоте

GEO

MEO

LEO

v_1 – первая космическая скорость:

$$v_1 = R\sqrt{\frac{g}{R+h}}$$

R – радиус Земли, R=6371 км;
h – высота орбиты;
g – ускорение свободного падения, g = 9,8 м/с^2

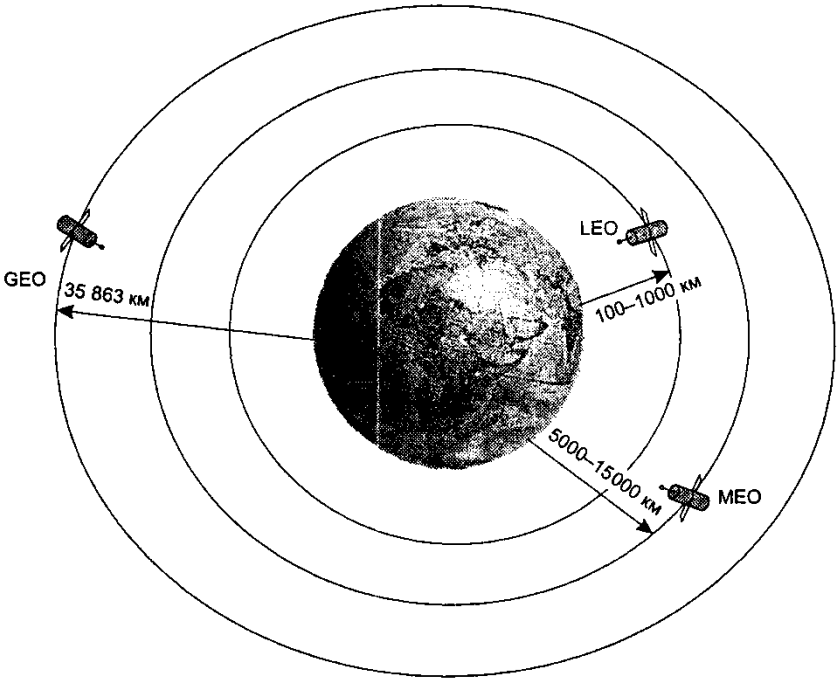
По наклону

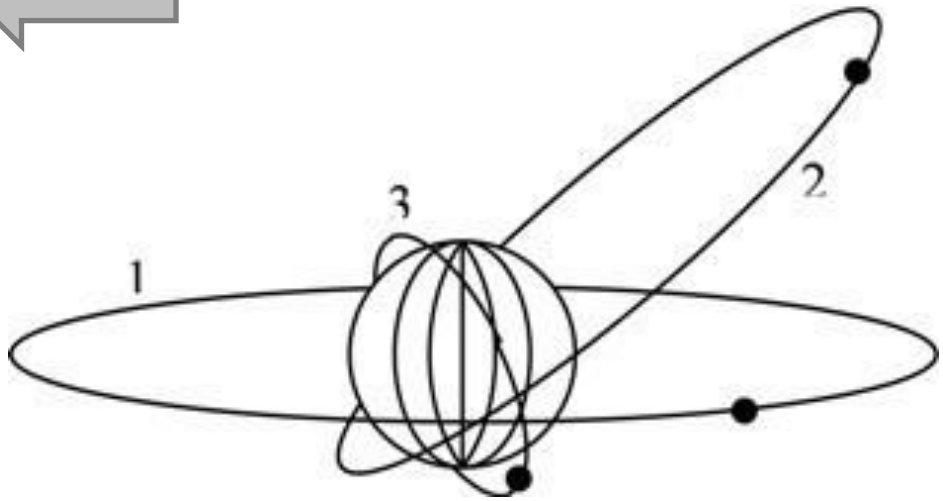
Экваториальные – орбита лежит в плоскости экватора ($\alpha=0^0$)

Наклонные – орбита наклонена относительно плоскости экватора на угол $\alpha\neq0^0$

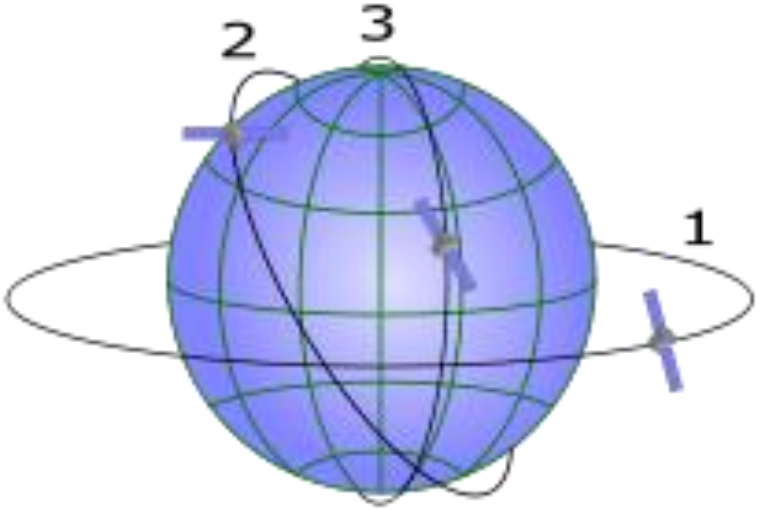
Полярные – орбита наклонена относительно плоскости экватора на угол $\alpha=90^0$

Классификация орбит спутников по высоте





Орбиты спутников Земли:
1 - геостационарная; 2 - высокая эллиптическая; 3 - низковысотная

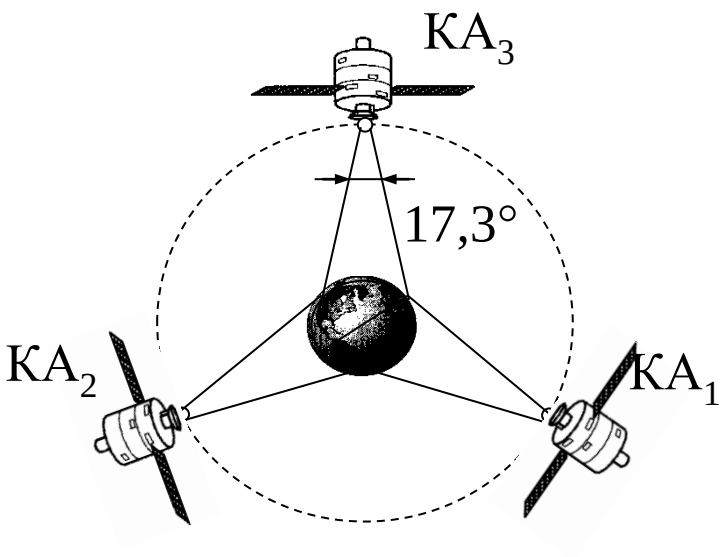


Орбиты: 1 — экваториальная, 2 — наклонная, 3 — полярная

Геостационарные ССС

Геостационарными называют ССС, использующие спутники, движущиеся по геостационарным орбитам (орбитам, расположенным на высоте около 36000 км). Скорость вращения КА при этом обеспечивают равной скорости вращения Земли. Это позволяет достичь эффекта «неподвижности» КА относительно точки наблюдения, расположенной на Земле.

Если ширину ДН антенных систем КА выбрать равной $17{,}3^0$, то ***трех спутников достаточно для полного покрытия территории Земли***.



На рисунке ориентация КА выбрана таковой, что $КА_1$ располагается в зоне Индийского океана, $КА_2$ – в зоне Тихого океана, а $КА_3$ – в зоне Атлантического океана.

В общем случае геостационарная орбита может быть как экваториальной, так и наклонной.

Преимущества и недостатки геостационарных ССС

Преимущества	Недостатки
1. охват всей территории земной поверхности малым числом спутников (минимум 3, но на практике используют большее число для увеличения вероятности надежной работы); 2. возможность непрерывной связи в глобальной зоне обслуживания; 3. практическое отсутствие доплеровского сдвига частоты, обусловленного взаимным перемещением КА и Земли; 4. сравнительно низкие энергетические затраты на коррекцию движения КА и его удержание на орбите в заданной точке орбиты.	1. большой уровень задержки сигналов (до 600 мс), связанный с конечным временем распространения радиоволн; 2. невозможность обеспечения связи в высокоширотных районах, в связи с чем для их охвата используют эллиптические орбиты с апогеем в северном полушарии (~40 тыс. км) и перигеем в Южном полушарии (~400…600 км), а наклонение плоскости орбиты должно составлять примерно $63{,}4^0$; 3. необходимость достаточно высокой энергетики, что затрудняет персональную связь.

Средневысотные ССС

Средневысотные ССС являются промежуточным звеном между геостационарными и низкоорбитальными системами. КА средневысотных ССС располагаются в основном на круговых орбитах, находящихся на высотах от 5000 до 15000 км. Для полного покрытия территории Земли требуется 7 – 12 КА.

Преимущества	Недостатки
1. более высокие характеристики обслуживания за счет увеличения рабочих углов места и числа КА, находящихся одновременно в поле зрения наземного абонента; 2. сравнительно невысокие значения задержки сигналов возможность непрерывной связи в глобальной зоне обслуживания; 3. улучшенные энергетические показатели ССС в целом и возможность обеспечения персональной связи непосредственно с КА при относительно небольших энергетических затратах.	1. подверженность влиянию пространственных заряженных частиц (**радиационные пояса Ван Аллена**), ухудшающих устойчивость связи; 2. более низкая, чем у геостационарных ССС, продолжительность пребывания в зоне радиовидимости земных станций (1,5– 2 ч).

Радиационный пояс Земли

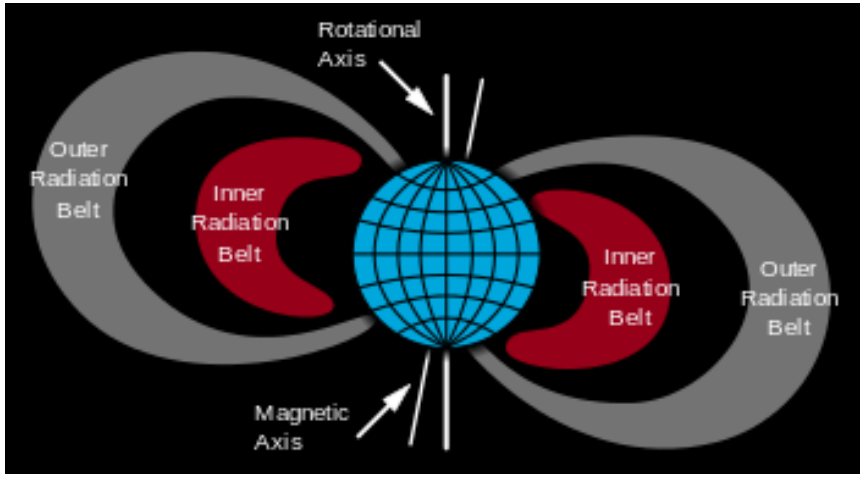
Магнитосфера — область пространства вокруг небесного тела, в которой поведение окружающей тело плазмы определяется магнитным полем этого тела.

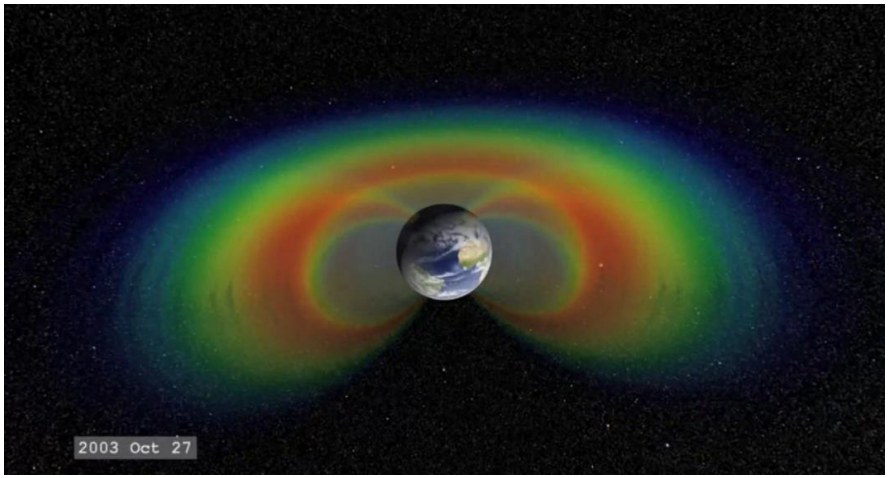
Радиационный пояс — область магнитосфер планет, в которой накапливаются и удерживаются проникшие в магнитосферу высокоэнергичные заряженные частицы (в основном протоны и электроны).

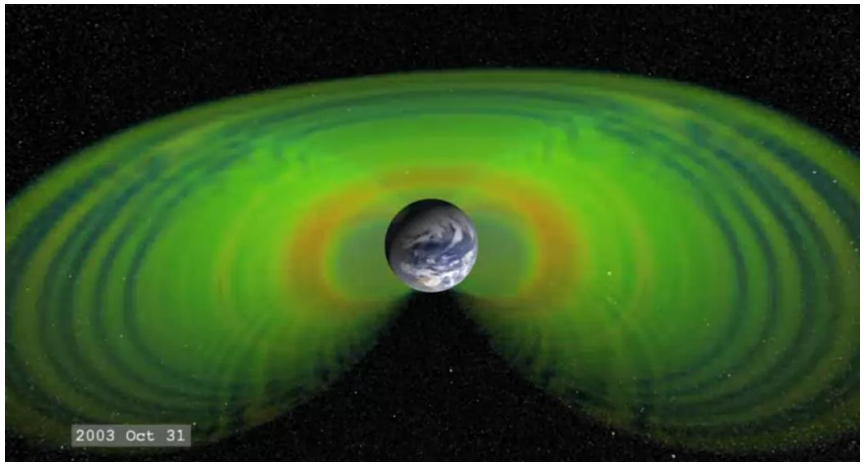
Радиационный пояс Земли (внутренний) был предсказан советскими учёными С. Н. Верновым и А. Е. Чудаковым, а также американским учёным Джеймсом ван Алленом. Существование радиационного пояса было подтверждено аппаратом «Спутник-3», запущенным в 1958 году. Радиационный пояс в первом приближении представляет собой **тороид**, в котором выделяются **две области**:

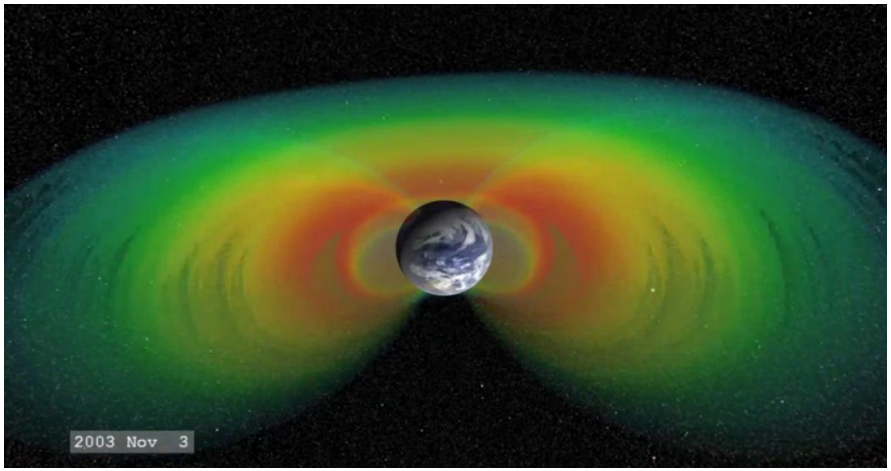
- ***внутренний радиационный пояс*** на высоте ≈ 4000 км (2000…9000 км до 30^0 в обе стороны от экватора), состоящий преимущественно из протонов с энергией в десятки МэВ;
- ***внешний радиационный пояс*** на высоте ≈ 17 000 км (13000…19000 км до 50^0 в обе стороны от экватора), состоящий преимущественно из электронов с энергией в десятки кэВ.

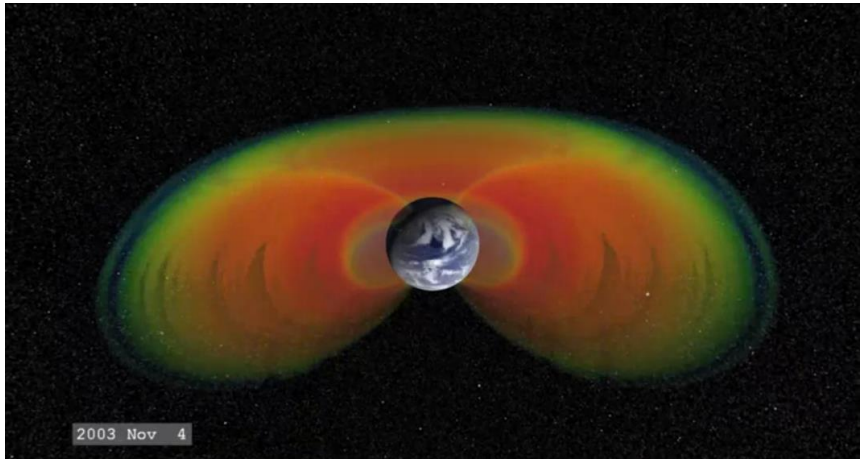
Внутренний пояс очень стабилен, тогда как внешний испытывает резкие колебания.

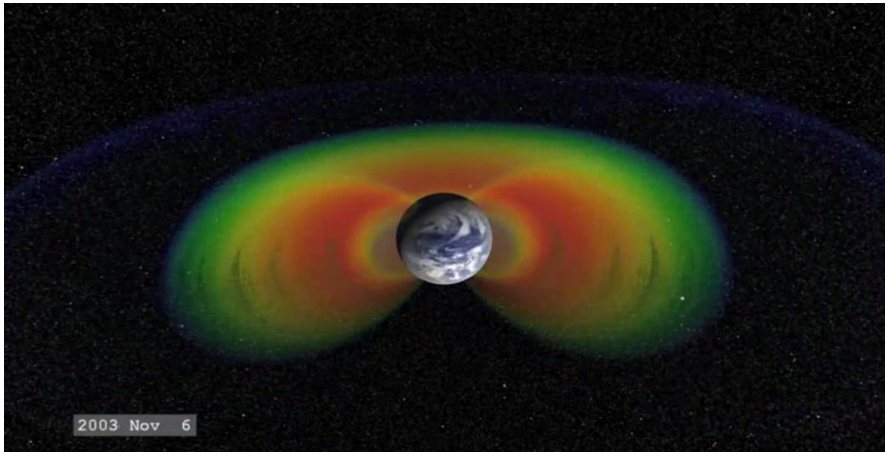

Rotational
Axis
Outer
Radiation
Belt
Inner
Radiation
Belt
Inner
Radiation
Belt
Outer
Radiation
Belt
Magnetic
Axis


2003 Oct 27


2003 Oct 31


2003 Nov 3


2003 Nov 4


2003 Nov 6

Низкоорбитальные ССС

В настоящее время используют низкие наклонные и полярные орбиты высотой 500…1500 км и экваториальные – высотой около 2000 км.

Преимущества	Недостатки
1. значительно лучшие энергетические показатели по сравнению с GEO и MEO; 2. возможность организации персональной связи при минимальных энергетических затратах потребителя;	1. малая продолжительность сеанса связи с одним КА; 2. меньшее время активного существования в сравнении с остальными системами, что вызвано, во-первых, тем, что большую часть времени КА находится на теневой стороне Земли, и, во-вторых, влиянием ***радиационного пояса***; 3. большая подверженность к деградации орбит, связанной с влиянием атмосферы (повышенная плотность), что приводит к колебаниям эксцентриситета; 4. малая мгновенная зона обслуживания одним КА и, соответственно, необходимость в большом количестве спутников в группировке.

Сравнительные показатели GEO, MEO и LEO систем

Тип орбиты	GEO	MEO	LEO
Высота орбиты, км	36000	10355	700 – 1500
Количество КА в группировке при непрерывном глобальном охвате, шт.	3	8 – 12	48 – 72
Площадь зоны покрытия одним КА относительно поверхности Земли(угол места – 5^0), %	34	25-28	3-7
Время пребывания КА в зоне радиовидимости, ч	непрерывное	1,5 - 2	0,15 – 0,25
Задержка при передаче сигналов, мс: региональная связь; глобальная связь	Не менее 500	80-130 250-400	20-70 170-300
Время переключения, мин: с одного спутника на другой; с одного луча в другой	Не требуется 10-15	50-60 5-6	8-10 1,5-2
Максимальный относительный доплеровский сдвиг	$\pm 10^{-8}$	$\pm 6 \cdot 10^{-6}$	$\pm(1,8 \ldots 2,4) \cdot 10^{-5}$
Угол места на краю зоны обслуживания, град	5	25-30	10-15

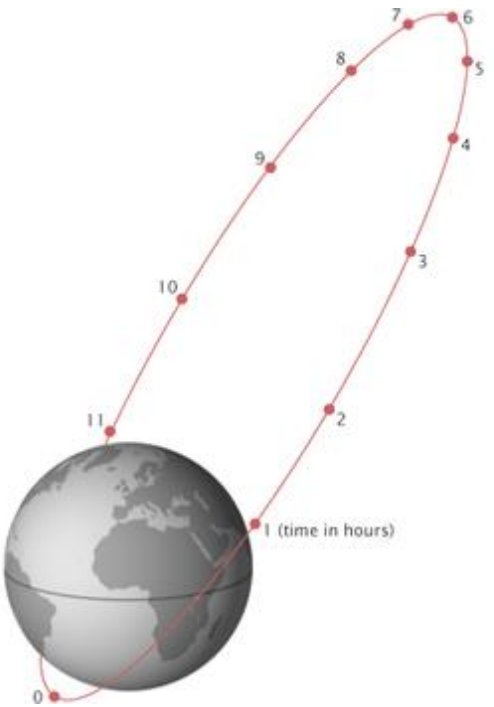
ССС с эллиптическими орбитами

Эллиптические орбиты чаще всего используют для построения спутниковых систем, обеспечивающих связь в высокоширотных районах. Наибольшее распространение получили так называемые **высокие эллиптические орбиты** (ВЭО – Highly Elliptical Orbit (HEO)), особенностью которых является то, что высота в апогее намного выше высоты в перигее.

Особенностью движения КА по такой орбите является то, что ***угловая скорость его перемещения существенно отличается в разных частях орбиты***. Вблизи апогея КА может двигаться настолько медленно, что его можно считать стационарным относительно точки приема на земной поверхности, в то время как в точке перигея КА движется с существенно (в десятки раз) большей скоростью.

Орбиты ВЭО могут иметь любое наклонение, но часто имеют наклонение близкое к $\arcsin\sqrt{4/5} \approx 63{,}4^0$ для обнуления возмущения вызванного неправильной формой Земли, похожей на сплюснутый эллипсоид. При использовании такого наклонения орбита стабилизируется.

У эллиптических орбит аргумент перигея, находящийся между 180° и 360°, означает, что апогей находится над Северным полушарием. Напротив, аргумент перигея между 0° и 180° означает, что апогей находится над Южным полушарием.



Примеры высокоэллиптических орбит							
Системы использующие ВЭО	Назва-ние орбиты	Предназначение	Аргумент широты перигея	Накло-нение	Период обращения КА	Высота в перигее	Высота в апогее.
«Молния-1Т», «-3», «-3К», «Меридиан»	Молния	Спутниковая связь	280°	62.8°	11 час 57 мин 45 сек	около 500 км	около 40 000 км
«Sirius XM Radio»	Тундра	Спутниковое радио	269°	62.15°	23 часа 56 мин 04 сек	24 475 км	47 093 км
Интеграл		Космическая обсерватория	300°	51.6°	4 309.6 мин	9 743.2 км	152 963.8 км
Кластер		Научный КА		101.5°	3 427.6 мин	8 585.9 км	129 281.5 км
Орбитальная Геофизическая обсерватория		Космическая обсерватория		101.5°	3 839 мин	около 300 км	около 150 000 км
Advanced Composition Explorer		Научный КА		28.7°	1 398 часов (58.25 дней)	179 км	1 256 768 км
Quazi-Zenith Satellite System	Тундра	Спутниковая система дифференциальной коррекции сигнала GPS	270°	40°	23 часа 56 мин 04 сек	около 32 000 км	около 40 000 км

Преимущества и недостатки ВЭО

Преимущества	Недостатки
1. возможность обслуживания очень большой территории; 2. обслуживание в высоких широтах. Угол места в этих зонах у систем на ВЭО гораздо больше, чем у геостационарных спутников; 3. широкое использование различных частотных диапазонов на ВЭО без регистрации (в отличие от геостационарной орбиты, где уже практически не осталось ни свободного места, ни свободных частот); 4. более дешевый вывод на орбиту по сравнению с GEO системами (примерно в 1,8 раза).	1. необходимость в 3 спутниках на орбите (вместо 1 геостационарного) для создания квазигеостационарной системы. В случае обеспечения круглосуточного непрерывного вещания, количество КА возрастает до 7; 2. приемная антенна должна обладать функцией слежения (привод для разворота), поэтому стоимость антенны и ее обслуживания будут выше; 3. в высоких широтах плотность населения гораздо ниже, чем в средних районах, поэтому окупаемость такой системы низкая; 4. апогей спутников на ВЭО выше, чем у ГСО, поэтому мощность передатчиков должна быть выше, до 400—500 Вт, что удорожает спутники; 5. орбита спутников на ВЭО может пересекать радиационные пояса, что сильно сокращает срок службы КА. Для решения этой проблемы нужна орбита с апогеем около 50 тыс. км и перигеем около 20 тыс. км; 6. доплеровский сдвиг частоты оказывается выше, чем в GEO системах; 7. большие задержки сигнала, что усложняет работу приложений, работающих в реальном масштабе времени.

Организационная структура спутниковых систем связи

Спутниковая система связи

- **Комический сегмент**
  - Группировка КА
  - Космические линии связи
- **Сегмент средств выведения КА на орбиту**
  - Стартовые комплексы
  - Ракето-носители
  - Космические платформы
  - Центр управления полетом
- **Наземный сегмент**
  - Основной и резервный центры управления
  - Каналы управления связью
  - Станции сопряжения
- **Пользовательский сегмент**
  - Стационарные объекты
  - Подвижные объекты
  - Персональные пользователи
  - Стационарные и мобильные терминалы

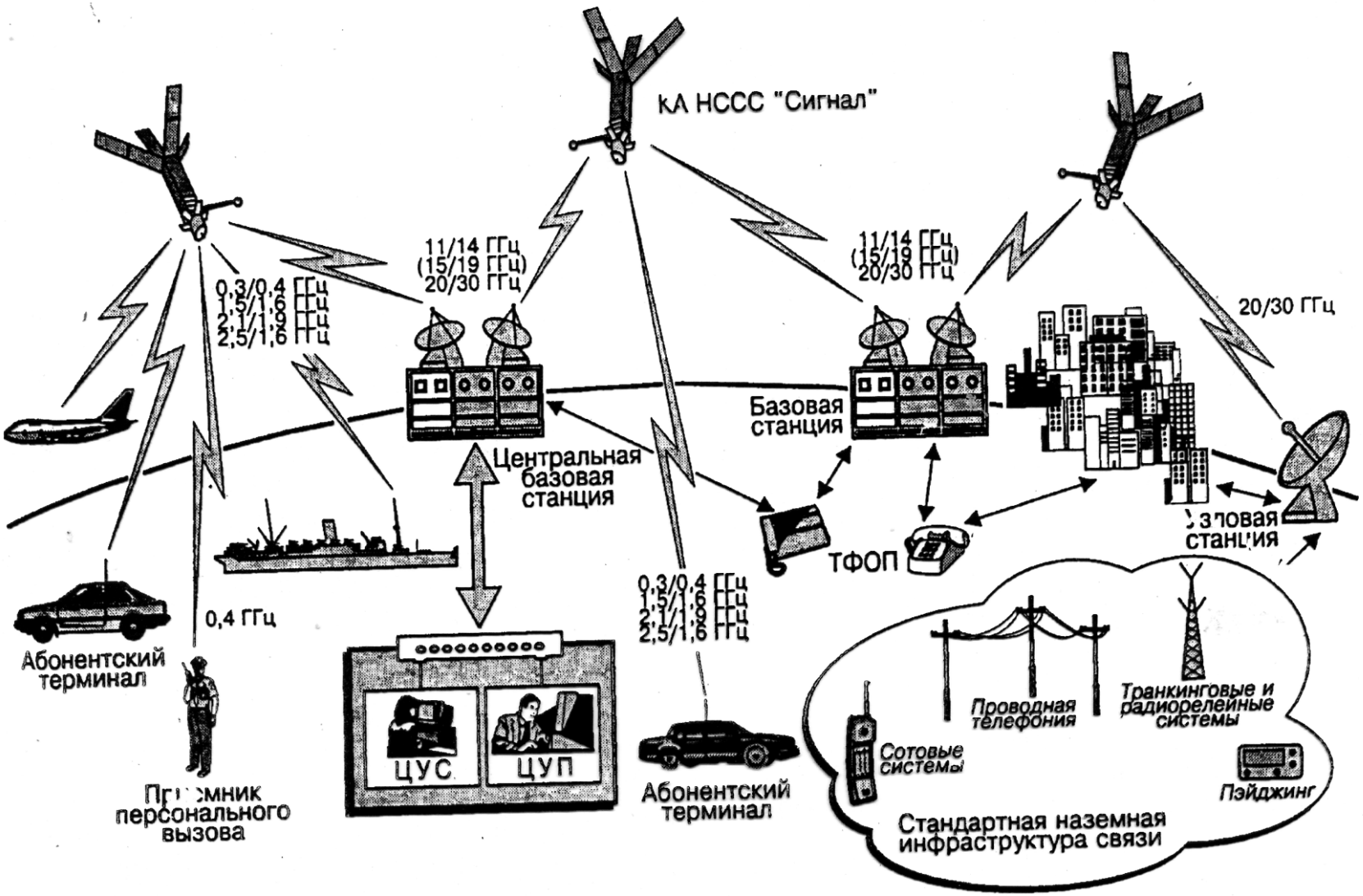
Параметры КА GEO и HEO систем мобильной и персональной связи

Название системы	Тип базовой платформы	Масса КА (на орбите), кг	Мощность системы питания, Вт	Срок службы (лет)	Средства выведения КА на орбиту
AceS	A2100	4400 (стартовая)	4000	12	Протон
AMSC	HS601	1500	3600	12	Atlas 2A
Artemis	DRS	2600 (стартовая)	2800	12	H2A
Eutelsat II	Eurostar 2000	900	3000	9	Ariane 44L
Inmarsat 2, Inmarsat 3	Eurostar 2000	860 1200	1200 1670	10 13	Delta 2, Ariane, Atlas 2A
MSAT	HS601	1650	3300	12	Atlas 2A
Optus	HS601	1650	3000	13	Long March
Solidaridad	HS-601	1672	3150	12 – 14	Ariane 44LP
Банкир	Купон	2200	1200	10	Протон
Горизонт		2100 (стартовая)	1300	10	Протон
Марафон	Аркос Маяк	2400 2700	н/д	8 – 10 5 – 7	Протон
Полярная звезда	Ямал-200	2100	2500	10	Протон

Параметры КА MEO и LEO систем связи

Название системы	Тип базовой платформы	Масса КА (на орбите), кг	Мощность системы питания, Вт	Срок службы (лет)	Средства выведения КА на орбиту
Низкоорбитальные и среднеорбитальные КА систем радиотелефонной и широкополосной связи					
Celestri	Matra Marconi	2500	4600	8	
Globalstar	_	450	1100	7,5	Delta 2, Зеніт 2
ICO	HS-601	2750	8700	12	Delta 2, Ariane
Iridium	Lockheed	690	1400	5	Delta 2, Протон, Long March 2C
Odyssey	–	2500	4600	15	Atlas 2A
Skybridge	–	800	3000	8	Ariane 4, Ariane 5
Teledesic	–	795	11600	10	Delta 3
Сигнал	–	310	10000	6	Циклон
Низкоорбитальные системы передачи коротких пакетов данных					
Гонец	–	250	500	7	Рокот
Orbcomm	Microstar	43	160	4	Pegasus XL
Faisat	–	89,5	60	5 – 7	Космос 3

Организационная структура низкоорбитальной системы «Сигнал»



Диапазоны частот спутниковых служб

Линия Земля – КА		Линия КА – Земля	
Полоса частот, ГГц	Служба связи	Полоса частот, ГГц	Служба связи
1,610 – 1,6265	Подвижной связи	1,525 – 1,559	Подвижной связи
1,6315 – 1,6605	Подвижной связи	1,6265 – 1,6315	Подвижной связи
1,97 – 2,01	Подвижной связи	2,16 – 2,2	Подвижной связи
2,67 – 2,69	Подвижной связи	2,4835 – 2,52	Подвижной связи
5,725 – 7,075	Фиксированной связи	2,52 – 2,67	Вещание
7,9 – 8,4	Фиксированной и подвижной связи	3,4 – 4,2	Фиксированной связи
10,7 – 11,7	Фидерни линии	4,5 – 4,8	Фиксированной связи
12,5 –13,25	Фиксированной связи	7,25 – 7,75	Фиксированной связи
14,75 – 14,5	Фиксированной связи	10,7 – 11,7	Фиксированной связи
14,5 – 14,8	Фидерни линии	11,7 – 12,5	Вещание
17,3 – 18,1	Фидерни линии	12,5 – 12, 75	Фиксированная служба
27,5 – 31	Фидерни линии	17,7 – 21,2	Фиксированной и подвижной связи
42,5 – 43,5	Фиксированной связи	22,5 – 23,0	Вещание
47,5 – 49,2	Фидерни линии	37,5 – 40,5	Фиксированной и подвижной связи
49,2 – 50,2	Фиксированной связи	43,5 – 47	Подвижной связи
50,4 – 51,4	Фиксированной связи		