

# Навигационно-пилотажные приборы ПНК



# Сроки

Время лекций: Четверг 15.40-17.15 (17.25 - 18.10)

Аудитория: 413ю

Лекция					
Пилотажно-навигационные Приборы ПНК	<i>Д.Т.Н. профессор Окоёмов Барит Николаевич</i>	01	10.02.2011	05	10.03.2011
		02	17.02.2011	06	17.03.2011
		03	24.03.2011	07	24.03.2011
		04	03.03.2011		
Глобальные спутниковые навигационные системы (ГСНС)/ Современные ПНК	<i>Братанов Дмитрий Александрович dm.bratanov@gmail.com</i>	Л1	<b>31.03.2011</b>	Л5	28.04.2011
		Л2	07.04.2011	Л6	12.05.2011
		Л3	14.04.2011	Л7	19.05.2011
		Л4	21.04.2011	Л8	26.05.2011
		ДЗ	05.05.2011	<b>Зачет</b>	



# Содержание курса ГСНС и современные ПНК

---

1. История создания глобальных спутниковых навигационных систем (СНС, GNSS – global navigation satellite systems)
2. Физические принципы СНС: псевдорасстояния, синхронизация, уравнения измерений.
3. Типы погрешностей и методы их компенсации: линейные разности, модели погрешностей
4. ПНК современных самолетов: компоненты, устройства, принципы.
5. Дифференциальная навигация - GBAS (global based augmentation systems)



# Содержание курса ГСНС и современные ПНК

---

Цель курса – получить знания о глобальных спутниковых навигационных системах (ГСНС), моделях и вычислительных подходах используемых для высокоточного ГСНС позиционирования;

– получить опыт непосредственной работы с спутниковыми измерениями.

Домашнее задание – обработка сигналов СНС GPS в формате представления RINEX в среде MATLAB.

**Защита домашнего задания обязательна для допуска к зачету**



# Литература

---

1. E.D.Kaplan, C.J. Hegarty, Ed., Understanding GPS, Principles and Applications, Artech House, Boston, London, 2nd, Ed. 2006
2. P. Misra, P. Enge, Global Positioning System, Signal, Measurements, and Performance, Ganga-Jamuna Press, Lincoln, MA, 2001
3. Steven M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing – Estimation Theory, Prentice Hall, 1993 New Jersey
4. B.L.Stevens, F.L.Lewis, Aircraft control and Simulation, John Wiley & Sons, New York, NY
5. [www.insidegnss.com](http://www.insidegnss.com)



# ОСНОВЫ

---

**Ingenium** - изобретательность; выдумка; знания

**Система** (от греч. Systema) — целое, составленное из частей.

**Навигация** (от лат. *navigo* — плыву на судне) – наука о способах выбора пути и методах вождения судов, **летательных и космических аппаратов**.  
(Большая Советская Энциклопедия)

Основные задачи навигации:

- определение местоположения объекта;
- выработка оптимального маршрута;
- расчёт навигационных параметров при наличии возмущающих факторов (ветра и др.).

При этом используется астрономические, инерциальные, радиотехнические методы и средства.



# Спутник. Начало.

1957 год международный геофизический год (МГГ, IGY)

## **Р-7 (Семёрка)**

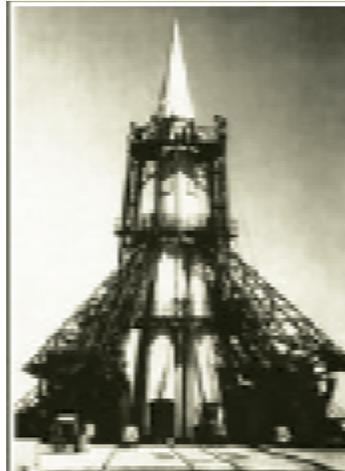
- 15 мая - Первый старт
- 21 августа - Успешный старт
- 4 октября 1957 года – запуск 1-го Спутника

первый искусственный спутник Земли  
первый шаг в спутниковой навигации

- 3 ноября 1957 – запуск 2-го спутника

## **Vanguard (Авангард, США)**

- 23 октября – Первый старт
- 17 марта 1958 – запуск спутника «Grapefruit» 1,47 кг



Королёв С.П.  
1907-1966



Ракета Р-7 1-я МКБР:  
5,4 т./7000 км



# Спутник



	СПУТНИК 1, СССР	VANGUARD 1, США
<b>ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ</b>		
Диаметр	58 см	16,5 см
Масса	83,6 кг	1,47 кг
<b>ПЕРЕДАТЧИК</b>		
Мощность	1 Вт	10 мВт / 5 мВт
Частоты модуляции	20,005 МГц / 40,002 МГц	108 МГц / 108,03 МГц
Электропитание	2 аккумулятора	Hg-Zn Аккумулятор/ 6 солнечных батарей
<b>ОРБИТА</b>		
Перигей/Апогей	228 км / 947 км	654 км/ 3969 км
Период обращения	96,2 мин	134,2 мин
Продолжительность полета	1440 оборотов (до 04.01.1958)	204000 оборотов (данные 1.04.2011). На орбите



# Эффект Доплера

Расстояние между двумя сферическими волнами от движущегося со скоростью  $v$  источника, рассчитанное в направлении  $\theta$

$$c\Delta t(\theta) = ct - \sqrt{(c(t - \Delta t') \sin \theta)^2 + (c(t - \Delta t') \cos \theta + v\Delta t')^2}$$
$$\simeq c\Delta t' - v\Delta t' \cos \theta.$$

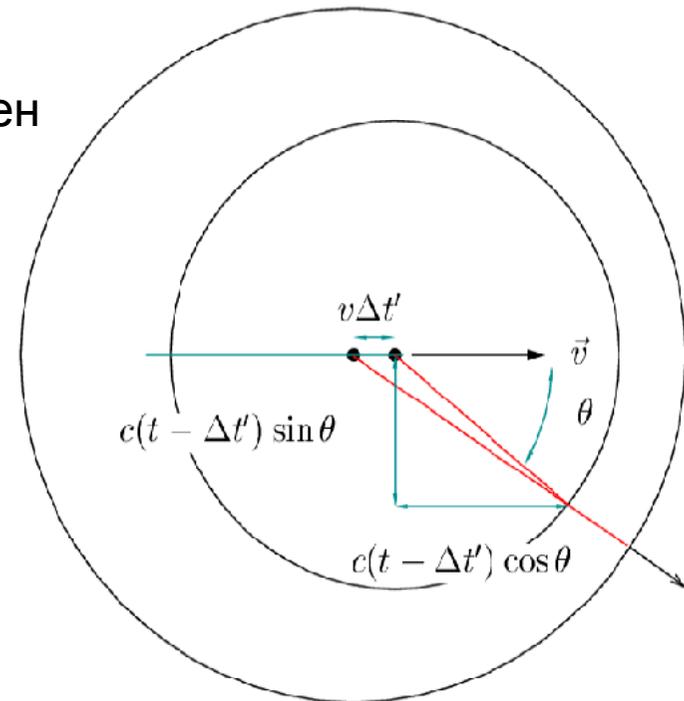
$$\Delta t = t - t'$$

' – измерено в СК в которой источник неподвижен

Доплеровский сдвиг частоты:

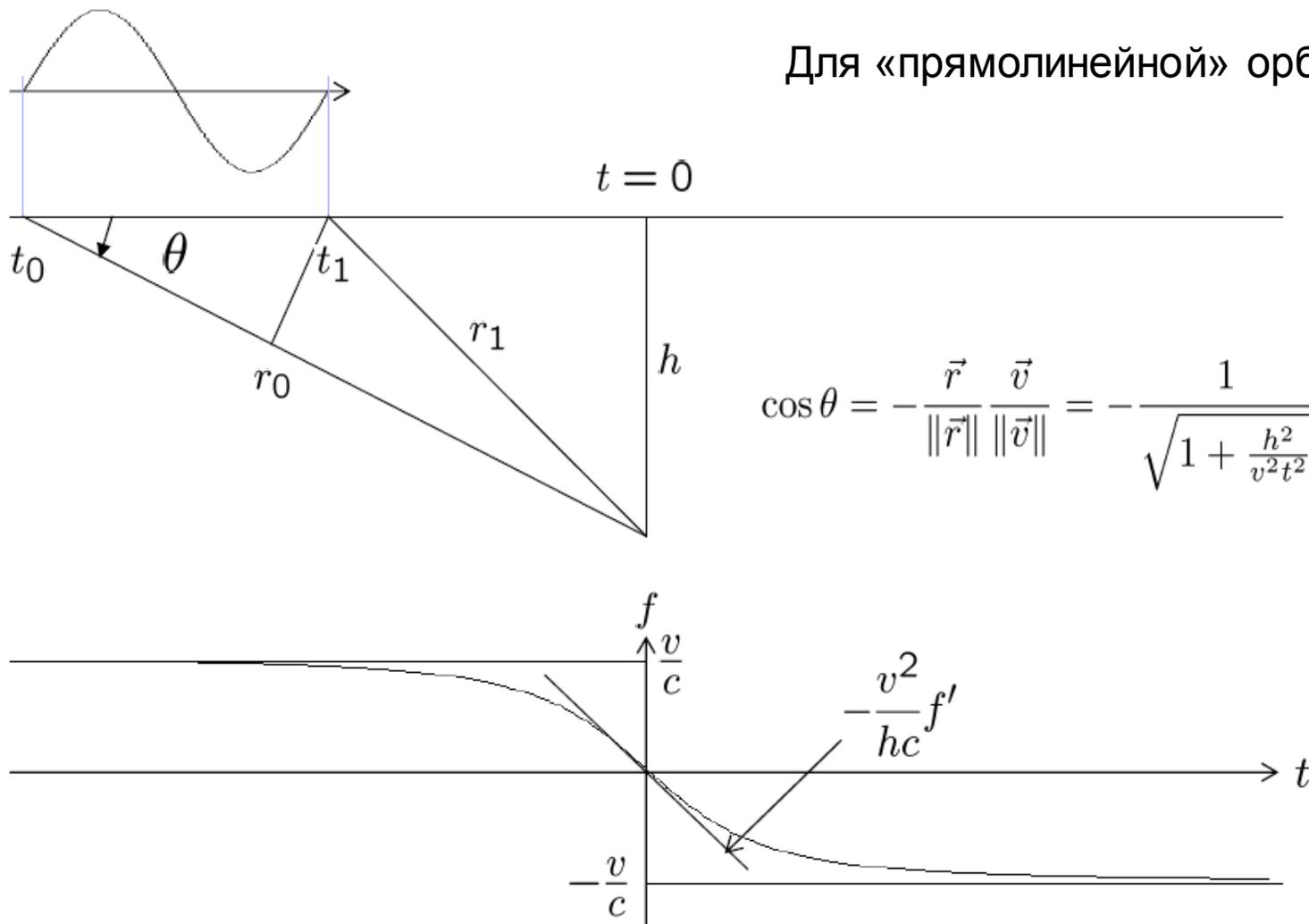
$$f_D = f - f' = \frac{\vec{v} \cdot \vec{n}}{c} f'$$

$\vec{n}$  – единичный вектор, направленный от источника к наблюдателю



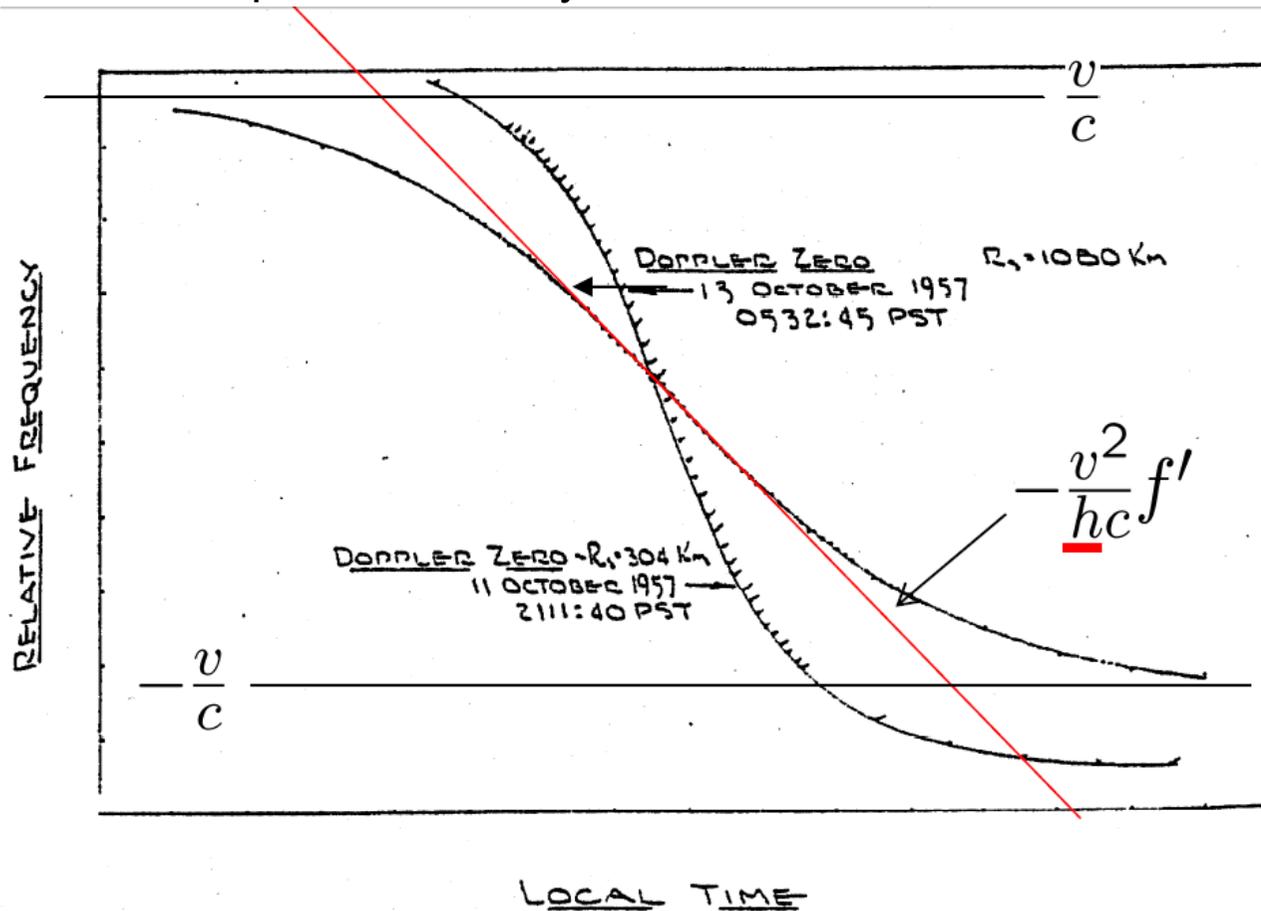
# Эффект Доплера

Для «прямолинейной» орбиты



# Эффект Доплера

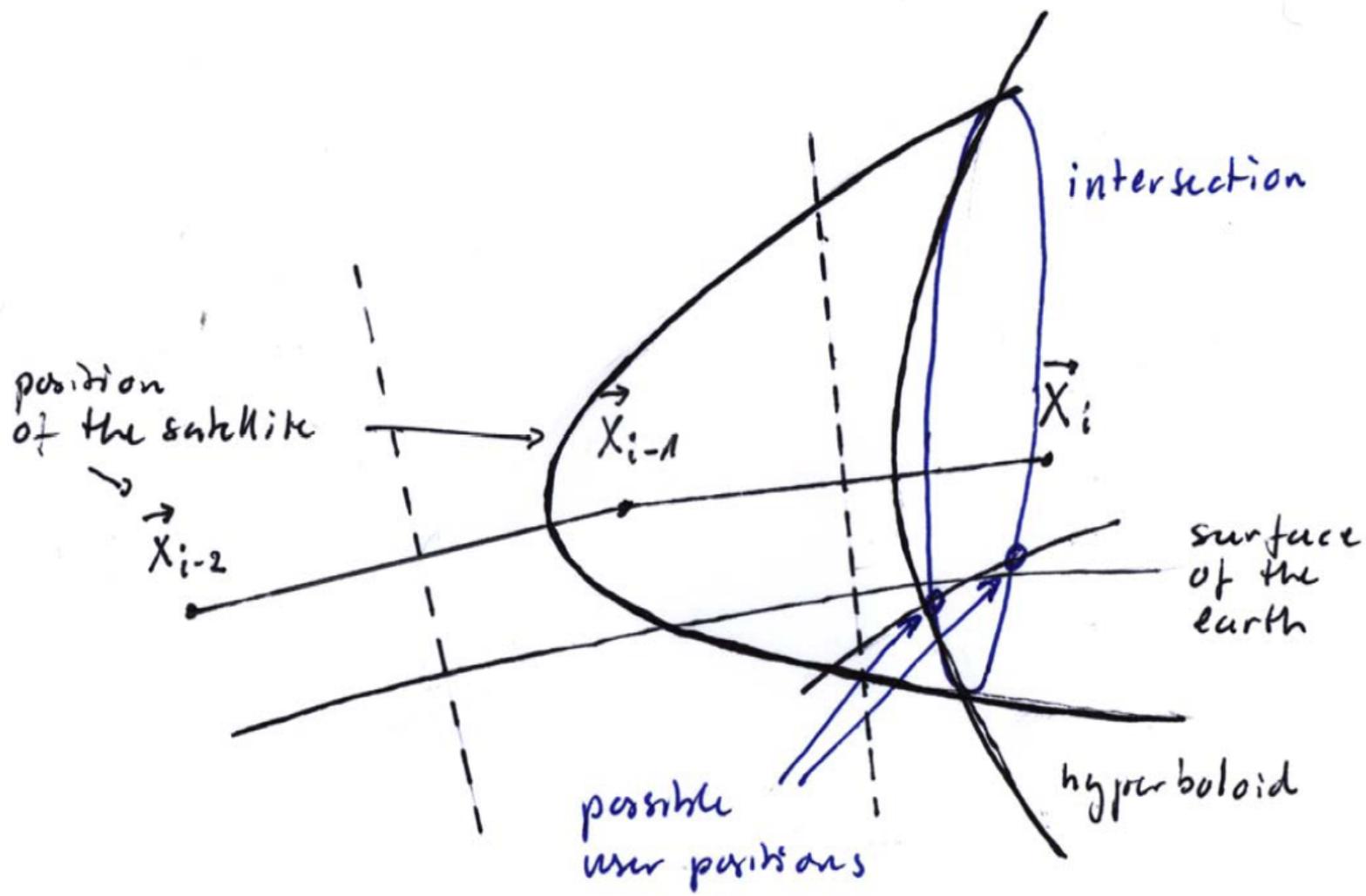
Исторические наблюдения за орбитой Спутника 1 сделанные в MIT, Standford и John Hopkins University



Две записи доплеровского сдвига демонстрируют разность доплеровских кривых для различных расстояний прохождения до спутника



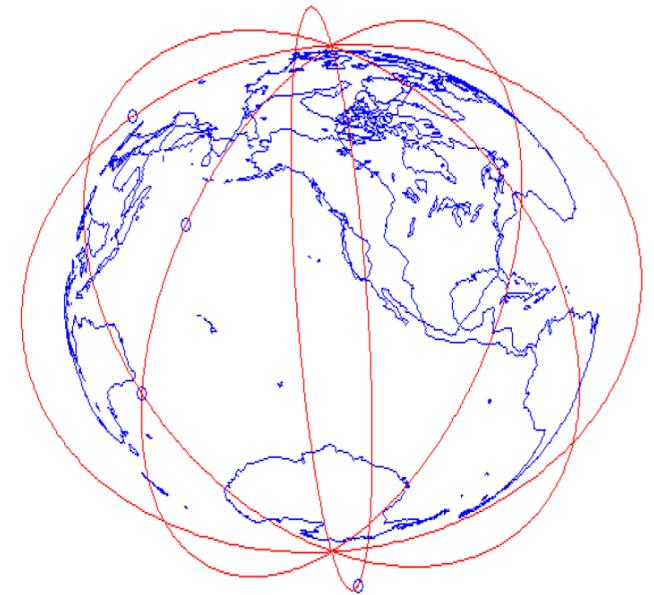
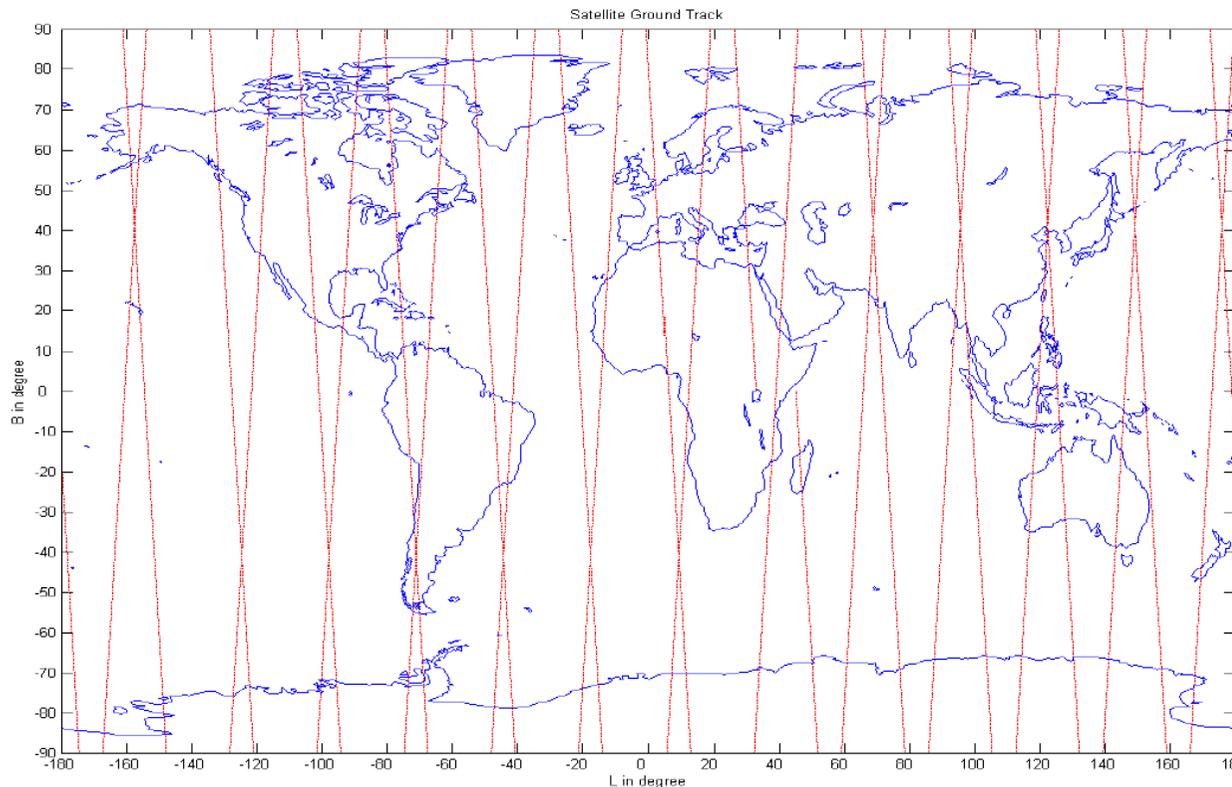
# Геометрия гиперболического позиционирования Transit



1 90°  
07 МИН



# Созвездие спутников Transit



Слабые стороны:  
Долгое время ожидания 35-100 мин  
10-16 мин для достижения точности  
2 D система

4 спутника, наклон  $90^\circ$   
 $H = 1075$  км,  $T = 107$  мин  
25 запусков с 17.09.1959 по  
25.08.1988  
Сервис закрыт 31.12.1996



# Global positioning System (GPS)

GPS – вероятно самая популярная ГСНС – синоним для всех спутниковых навигационных систем

Влияние GPS достигло множества отраслей науки и техники и активно влияет на общество. GPS революционно изменило навигацию на Земле, в воздухе и в море.

Миллионы встроенных handheld приемников сейчас во всем мире



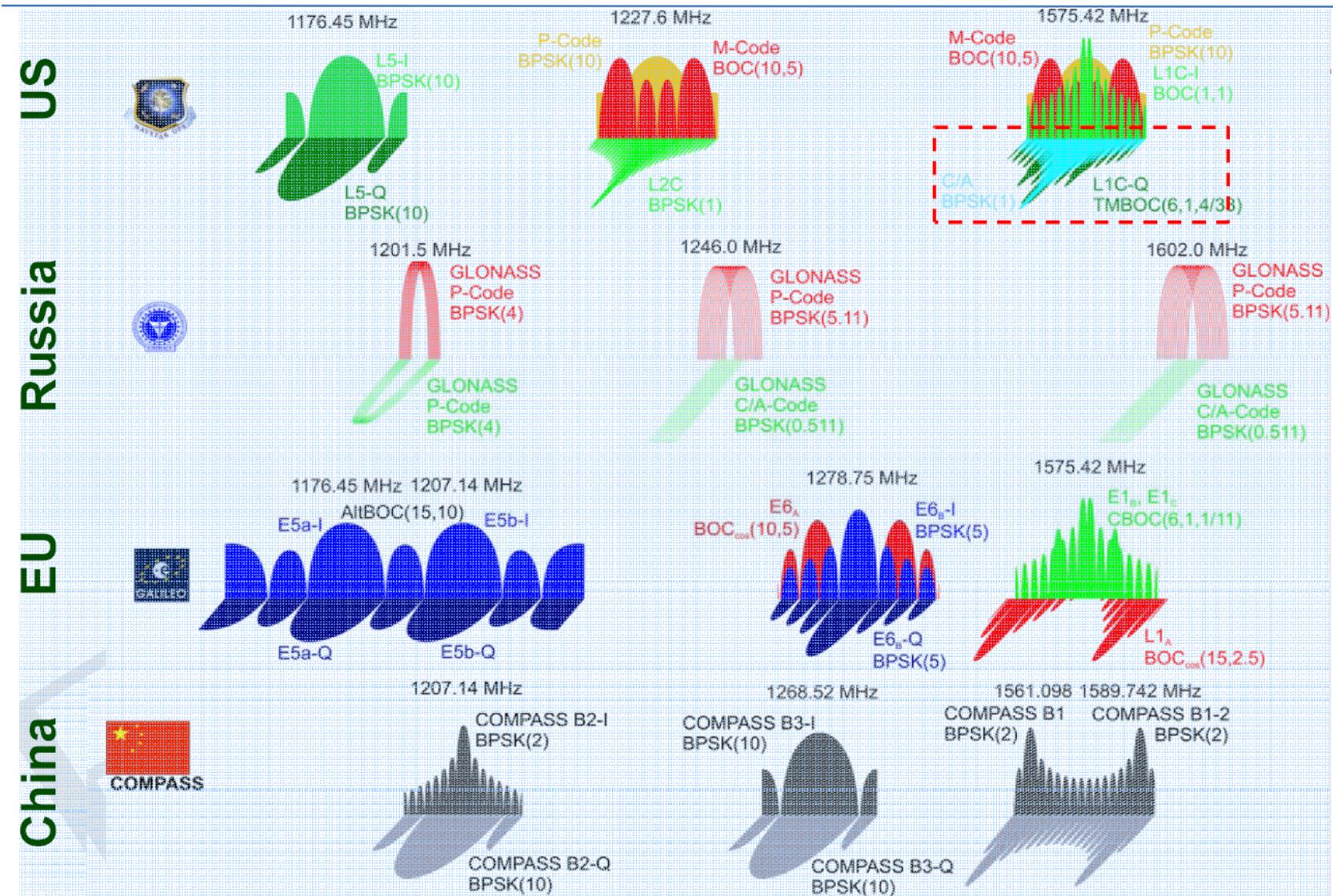
# Global positioning System (GPS)

GPS позволяет выполнить *абсолютное позиционирование* в окрестности поверхности Земли *в реальном времени* с точностью нескольких метров. Неограниченное количество пользователей GPS может быть одновременно

Инженерия и геодезия базируются сегодня на большом использовании измерений связанных с GPS. Точность позиционирования может быть улучшена существенно путем использования *дифференциальной коррекции* или путем *анализа фазовых измерений*.



# Существующие ГСНС



# Принципы ГСНС

---

## Требования пользователей к ГСНС

- Определение 3-х мерных координат, скоростей и времени вблизи поверхности Земли
- Высокая точность в реальном времени
- Везде (глобально) и при любой погоде

## Основной принцип

- Принцип измерения времени распространения сигнала

## Достаточность ГСНС

- ГСНС снабжает пользователей всей необходимой информацией для стандартной точности позиционирования

## Одно-направленность ГСНС

- Нет идентификации пользователей
- Не возможна перегрузка большим числом пользователей
- Требуется синхронизация часов

АТОМНЫЕ ЧАСЫ – основная полезная нагрузка спутников ГСНС



# GPS: хронология

1973	Решение о разработке спутниковой навигационной системы
1974—1979	Испытание системы
1977	Приём сигнала от наземной станции, симулирующей спутник системы
1978—1985	Запуск одиннадцати спутников первой группы (Block I)
1979	Сокращение финансирования программы. Решение о запуске 18 спутников вместо запланированных 24.
1980	В связи с решением свернуть программу спутников <a href="#">Vela</a> системы отслеживания ядерных взрывов, эти функции было решено возложить на спутники GPS. Старт первых спутников, оснащённых сенсорами регистрации ядерных взрывов.
1980—1982	Дальнейшее сокращение финансирования программы
1983	После <a href="#">гибели самолёта компании Korean Airline</a> , сбитого над территорией СССР, принято решение о предоставлении сигнала гражданским службам.
1986	Гибель космического челнока <a href="#">Space Shuttle «Challenger»</a> приостановила развитие программы, так как последний планировался для вывода на орбиту второй группы спутников. В результате основным транспортным средством была выбрана ракета-носитель «Дельта»
1988	Решение о развёртывании орбитальной группировки в 24 спутника. 18 спутников не в состоянии обеспечить бесперебойного функционирования системы.
1989	Активация спутников второй группы
1990—1991	Временное отключение SA ( <a href="#">англ. selective availability</a> — искусственно создаваемой для неавторизированных пользователей округления определения местоположения до 100 метров) в связи с войной в Персидском заливе и нехваткой военных моделей приёмников. Включение SA 01 Июня 1991 года.
08.12.1993	Сообщение о первичной готовности системы ( <a href="#">англ. Initial Operational Capability</a> ). В этом же году принято окончательное решение о предоставлении сигнала для бесплатного пользования гражданским службам и частным лицам
1994	Спутниковая группировка укомплектована
17.07.1995	Полная готовность системы ( <a href="#">англ. Full Operational Capability</a> )
01.05.2000	Отключение SA для гражданских пользователей, таким образом точность определения выросла со 100 до 20 метров
26.06.2004	Подписание совместного заявления по обеспечению взаимодополняемости и совместимости <a href="#">Galileo</a> и GPS <sup>1</sup>
Декабрь 2006	Российско-американские переговоры по сотрудничеству в области обеспечения взаимодополняемости космических навигационных систем <a href="#">ГЛОНАСС</a> и GPS. <sup>2</sup>



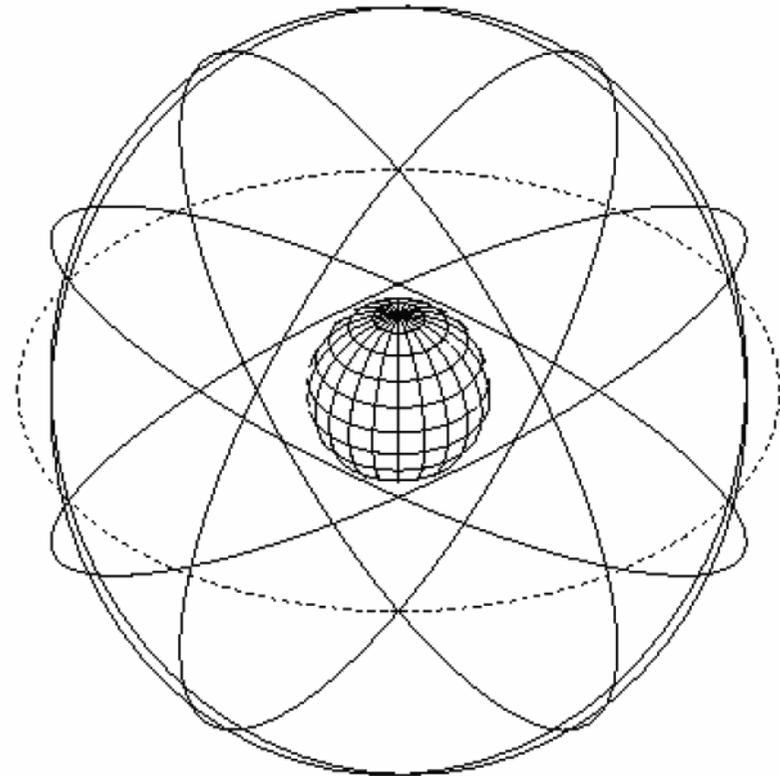
# GPS: Комическая часть (space segment)

Номинально космический сегмент состоит из *24 спутников*, распределенных на практически круговых орбитах на *высотах около 20000 км* в 6 орбитальных плоскостях.

Плоскости распределены по экватору через  $60^\circ$  и имеют склонение (угол относительно экватора)  $55^\circ$ .

*Период обращения спутника GPS* – половина звездного дня (11 ч 58 минут). Как следствие один и тот же спутник повторно пролетает через звездные сутки над наземным фиксированным наблюдателем.

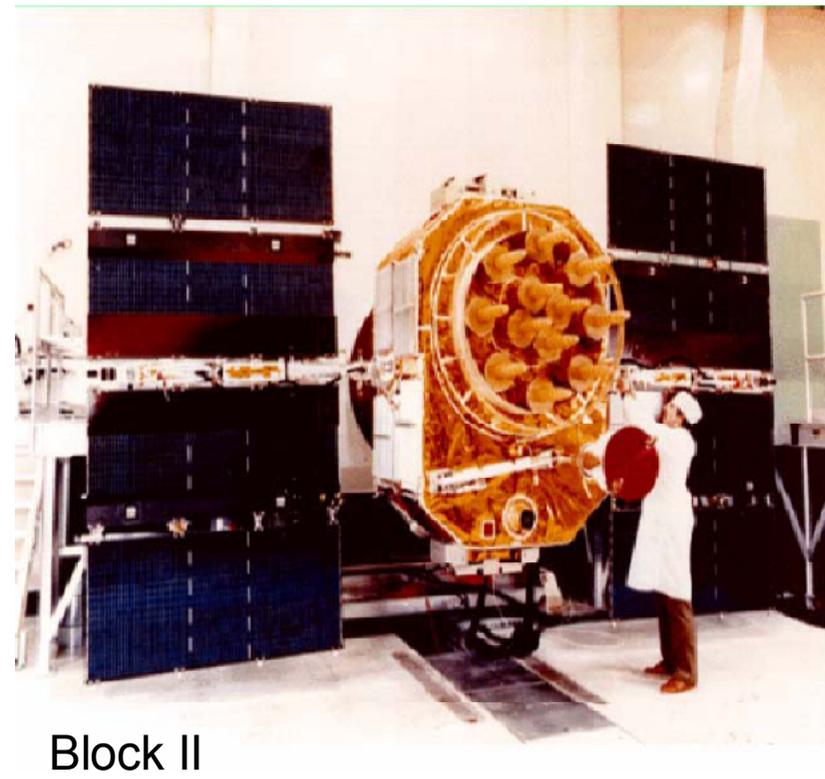
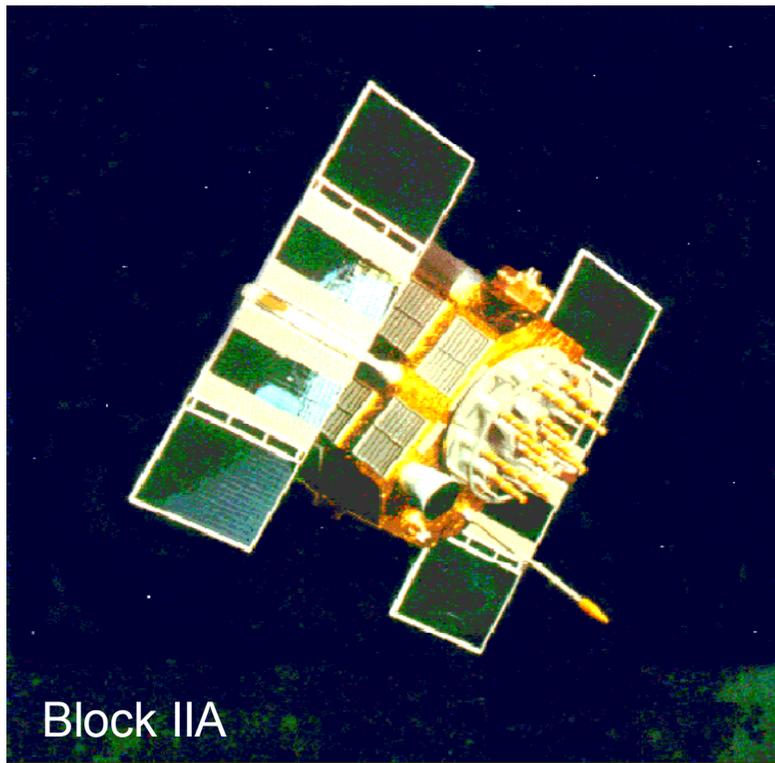
*Идея созвездия*: пользователь должен иметь возможность получить сигналы как минимум 4-х спутников в любое время и в любом месте.



# GPS: Комическая часть (space segment)

Первый спутник Block 1 выведен на орбиту в 1978. В настоящее время 12 спутников Block IIA активны.

19 спутников более нового типа Block IIR (8 из них (7 активны) новейшие Block IIR-M, которые излучают гражданский сигнал (L2C) также и на второй частоте)



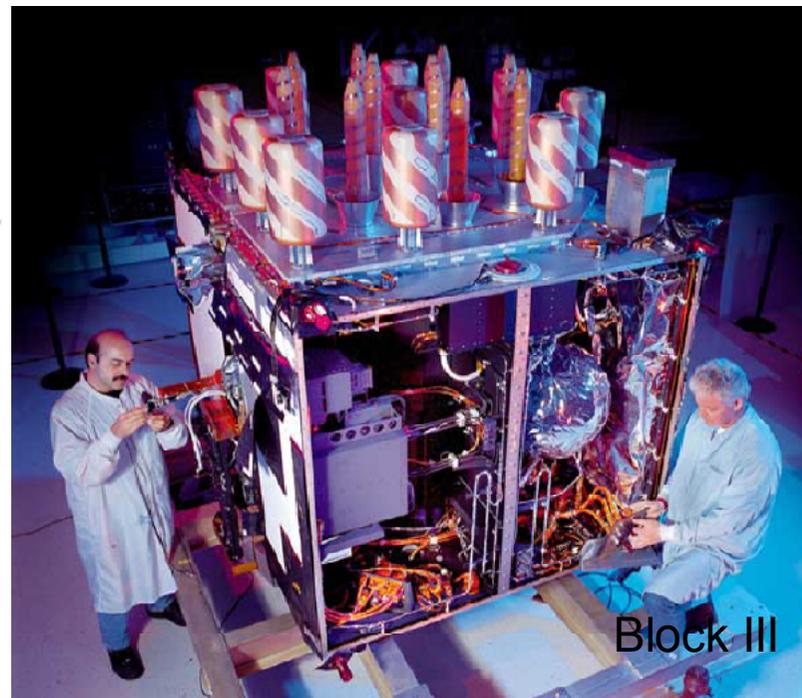
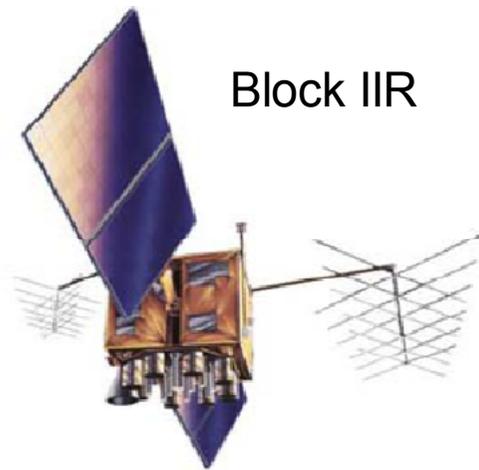
# GPS: Комическая часть (space segment)

На текущий момент 31 спутник на орбите и активен.

Первый спутник Block IIF запущен в мае 2010 и готовится запуск еще 11-ти.

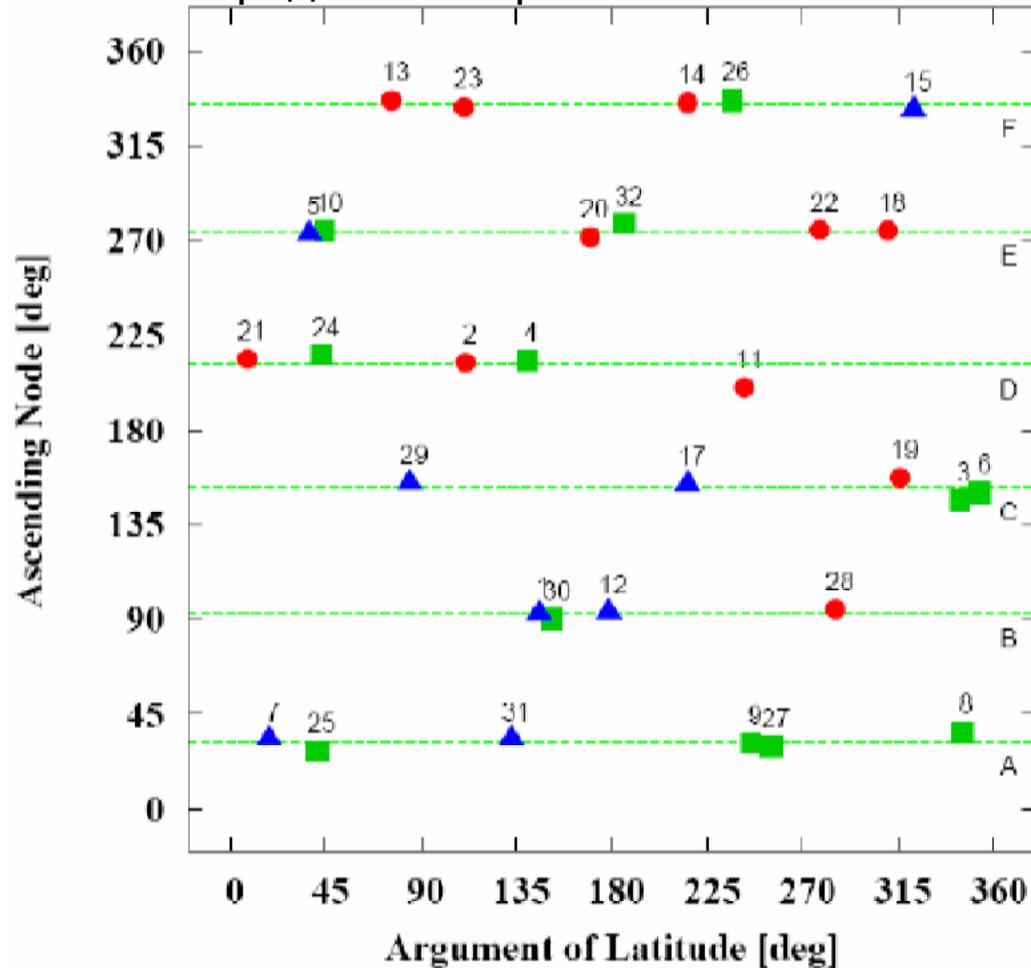
Первый спутник демонстрирующий излучение сигналов L5 запущен 24 марта 2009.

Запуск Block III спутников намечен на 2014.



# GPS: Комическая часть (space segment)

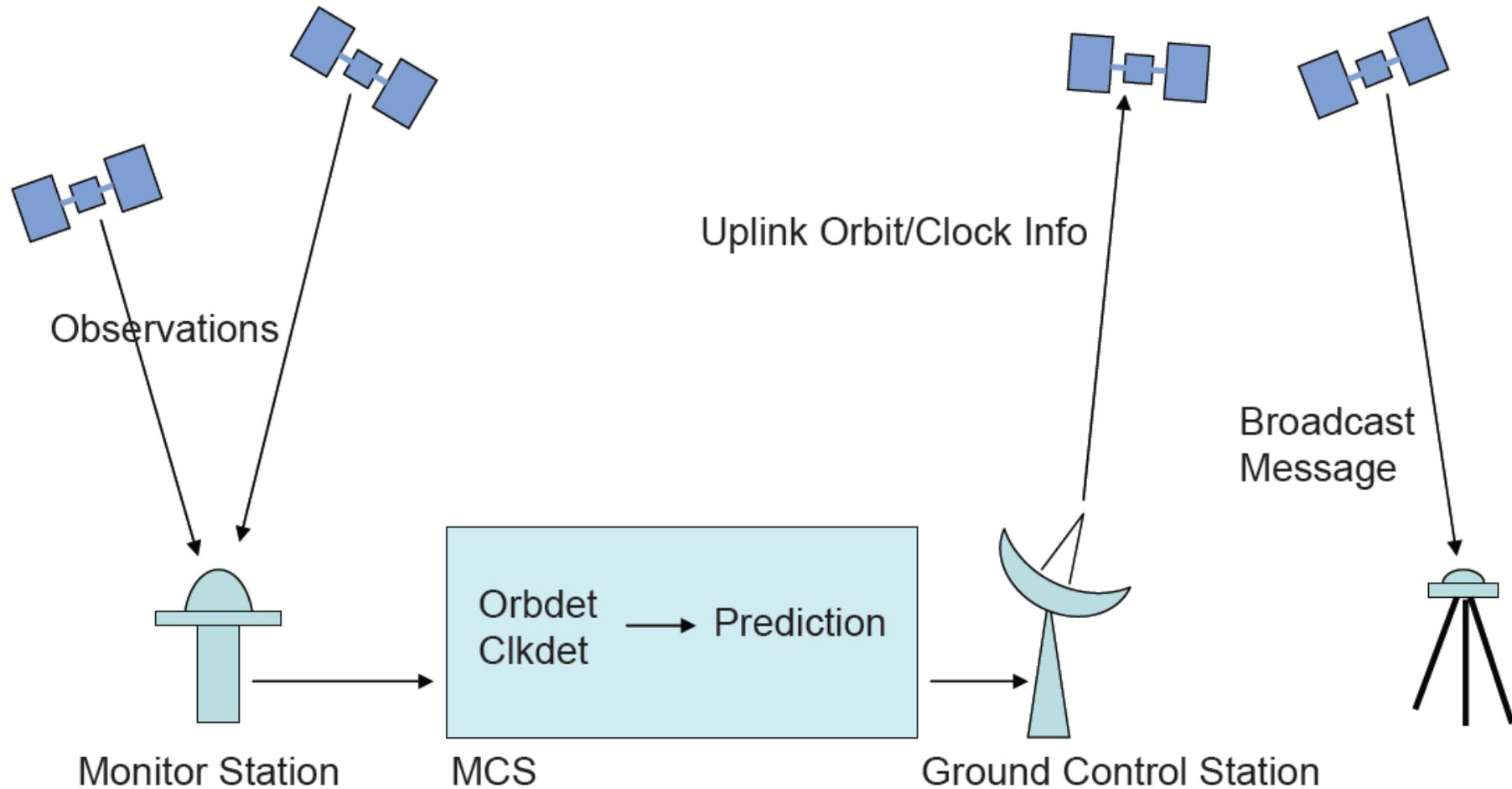
Распределение орбитальных плоскостей A-F 19 октября 2010 г.



Тип спутника	GPS-II	GPS-IIA	GPS-IIR	GPS-IIRM	GPS-IIF
Масса, кг	885	1500	2000	2000	2170
Срок жизни	7.5	7.5	10	10	15
Бортовое время	Cs	Cs	Rb	Rb	Rb+Cs
Межспутниковая связь	-	+	+	+	+
Автономная работа, дней	14	180	180	180	>60
Антирадиационная защита	-	-	+	+	+
Антенна	-	-	Улучш.	Улучш.	Улучш.
Возможность настройки на орбите и мощность передатчика	+	+	++	+++	++++
Навигационный сигнал	L1:C/A+P L2:P	L1:C/A+P L2:P	L1:C/A+P L2:P	L1:C/A+P+M L2:C/A+P+M	L1:C/A+P+M L2:C/A+P+M L5:C



# GPS: Принцип навигации



# GPS: Наземная часть (ground segment)



■ Master Control Station  
(+ground/monitoring station)

● Ground station  
(+monitoring station)

● Monitoring station

● NIMA Monitoring station



# GLONASS (Росавиакосмос)

GLONASS (Global Navigation Satellite System) – ГЛОНАСС (ГЛОбальная Навигационная Спутниковая Система) номинально состоит из 24 спутников.

В настоящее время на орбите 27 спутников (используются 23, на этапе ввода 1, на ТО 3).

Запуск первого ГЛОНАСС-К спутника с кодовой модуляцией (CDMA) намечен в 2011 г.



# GLONASS: хронология

Последние и планируемые запуски	
12 10 1982	Первый спутник ГЛОНАСС был выведен Советским Союзом на орбиту
25 12 2005	С космодрома «Байконур» на орбиту ракетой-носителем «Протон-К» были запущены ещё один космический аппарат «Глонасс» и два космических аппарата «Глонасс-М» с увеличенным ресурсом эксплуатации для пополнения группировки ГЛОНАСС.
26 12 2006	Состоялся вывод на орбиту РН «Протон-К» трёх КА «Глонасс-М».
26 10 2007	РН «Протон-К» стартовал с Байконура и вывел на околоземную орбиту три модифицированных КА «Глонасс-М».
25 12 2007	С космодрома «Байконур» стартовал РН «Протон-М» и вывел на орбиту три КА «Глонасс-М». Запуск увеличил число работающих спутников до 16 (одновременно 4 спутника, запущенные в 2001—2003 годах, были выведены из группировки).
25 09 2008	Запуск РН «Протон-М» с тремя КА «Глонасс-М» в каждом. Запуск увеличил число работающих спутников до 18 (1 спутник был выведен из состава группировки).
25 12 2008	Запуск РН «Протон-М» с тремя КА «Глонасс-М».
14 12 2009	Запуск РН «Протон-М» с тремя КА «Глонасс-М».
02 03 2010	Запуск РН «Протон-М» с тремя КА «Глонасс-М». Запуск увеличил число работающих спутников до 21 КА (плюс 2 КА в орбитальном резерве).
02 09 2010	Запуск РН «Протон-М» с тремя КА «Глонасс-М». Число работающих спутников 21 КА (плюс 2 КА в орбитальном резерве и на 06.09.2010 3 КА на этапе ввода в эксплуатацию).
5 12 2010	Запуск РН «Протон-М» с тремя КА «Глонасс-М». В результате выведения разгонного блока с тремя КА на нерасчетную орбиту потеряны три аппарата «Глонасс-М» . <a href="#">[10]</a>
2011 год	Запуск трех КА серии «Глонасс-М» РН «Протон-М» и одного экспериментального КА «Глонасс-К» при помощи РН «Союз-2-1А».



# GLONASS: Комическая часть (space segment)

Модернизация системы "Глонасс"									
Серия КА	Год развёртывания	Состояние	1602 + n×0.5625 МГц (L1, FDMA)	1575.42 МГц (L1, CDMA)	1246 + n×0.4375 МГц (L2, FDMA)	1242 МГц (L2, CDMA)	1202.025 МГц (L3, CDMA)	1176.45 МГц (L5, CDMA)	Тактовая стабильность
<a href="#">Глонасс</a>	1982	Выведен из эксплуатации	L1OF, L1SF		L2SF				5×10 <sup>-13</sup>
<a href="#">Глонасс-М</a>	2003	В эксплуатации	L1OF, L1SF		L2OF, L2SF				1×10 <sup>-13</sup>
<a href="#">Глонасс-К1</a>	2010	ЛКИ*	L1OF, L1SF		L2OF, L2SF		L3OC		5×10 <sup>-14</sup>
<a href="#">Глонасс-К2</a>	2013	В разработке	L1OF, L1SF	L1OC, L1SC	L2OF, L2SF	L2SC	L3OC		1×10 <sup>-14</sup>
<a href="#">Глонасс-КМ</a>	2015	На стадии изучения	L1OF, L1SF	L1OC, L1SC, L1OCM	L2OF, L2SF	L2SC, L2OC	L3OC, L3SC	L5OC	

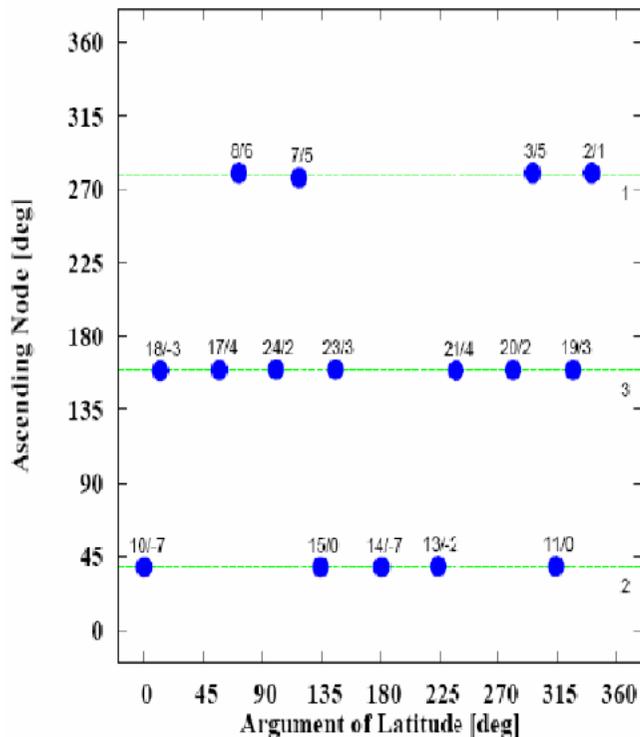
"O": открытый стандартный сигнал, "S": шифрованный сигнал высокой точности; "F": [Частотное разделение](#) (FDMA), "C": [Кодовое разделение](#) (CDMA); n=-7,-6,-5,...,6; \*Лётно-конструкторские ИСПЫТАНИЯ



# GLONASS

Орбиты спутников ГЛОНАСС расположены в 3-х плоскостях, смещенных по экватору на  $120^\circ$ , и имеющих склонение  $65^\circ$  для лучшего покрытия в высоких широтах. Высота орбиты 19100 км. Период обращения 11 ч 16 мин.

GLONASS 2009-10-19



GLONASS-M ●

Период обращения спутников ГЛОНАСС не находится в резонансе с вращением Земли.

Нет связи с резонансными отклонениям (resonant perturbations)

Нет необходимости в маневрах коррекции

GPS спутники имеют длинно периодические резонансные колебания ( $T = 10$  дней) Это приводит к ежегодным корректирующим маневрам.



# GLONASS и GPS точность позиционирования

---

Согласно данным [СДКМ](#) на 29 марта 2010 года  
Ошибки навигационных определений ГЛОНАСС (при  $p=0,95$ ) по долготе и широте составляли 4,46—8,38 м при использовании в среднем 7—8 КА (в зависимости от точки приёма).

Ошибки GPS составляли 2,00—8,76 м при использовании в среднем 6—11 КА (в зависимости от точки приёма).

Ошибки при совместном использовании обеих навигационных систем составляют 2,37—4,65 м при использовании в среднем 14—19 КА (в зависимости от точки приёма).

СДКМ - Российская система дифференциальной коррекции и мониторинга



# GALILEO Европейский союз (EASD Astrium)

28 Дек 2005 запуск первого GIOVE-A  
27 Апр 2008 запуск второго GIOVE-B  
Не хватает 1,4 млрд Евро!

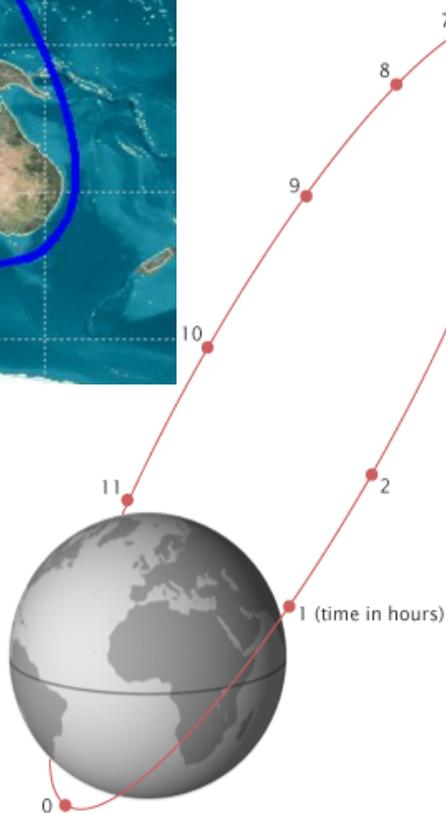


Спутниковое созвездие GALILEO должно насчитывать 27 спутников.  
Орбиты спутников GALILEO расположены в 3-х плоскостях, смещенных по экватору на  $120^\circ$ , и имеющих склонение  $56^\circ$ .  
Высота орбиты 23200 км.  
Период обращения 14 ч 04 мин.

Спутники несут ультраточные водородные часы и передают сигналы на трех несущих частотах



# QZSS - Quasi-Zenith Satellite System



Страна: Япония

*Jantencho* (準天頂)

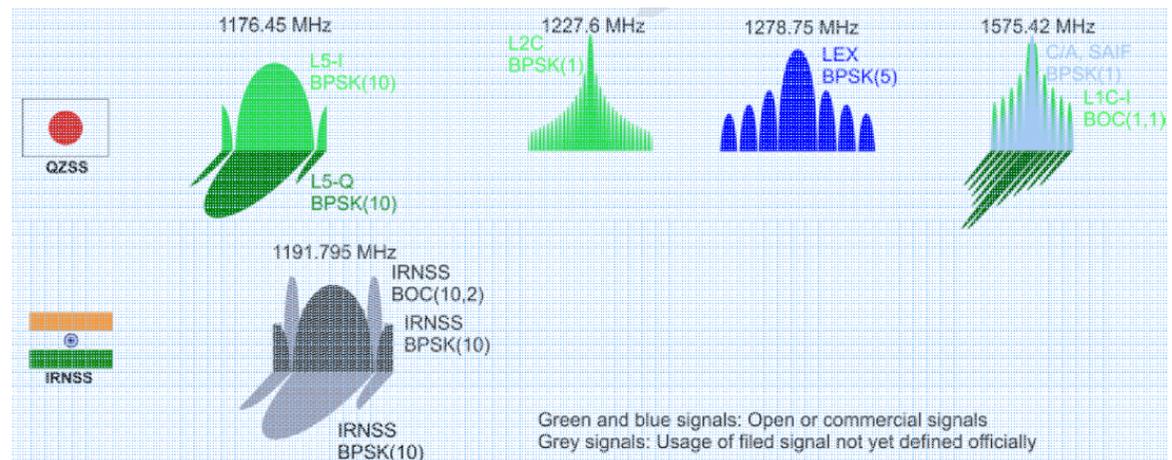
Разработчик: Advanced Space Business Corporation  
(Mitsubishi Electric Corp.,  
Hitachi Ltd. и GNSS Technologies Inc.)

1-й спутник 'Michibiki' выведен 11 September 2010

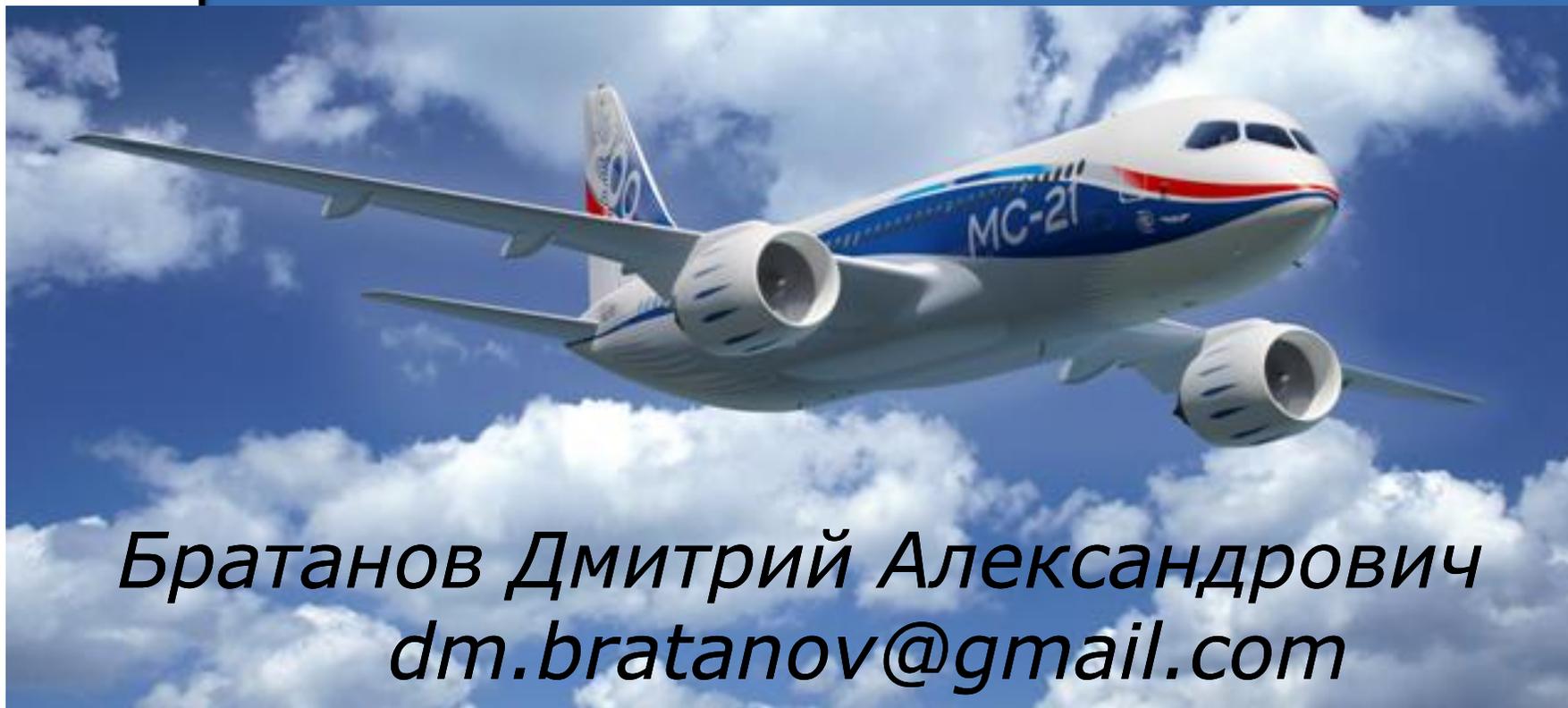
Полная работоспособность к 2013 г.

Состав: 3 спутника на НЕО-орбите(Highly-Elliptical Orbit)

Дополняет GPS (использует сигналы L1C/A, L1C, L2C и L5)



# Визуально-пилотажные приборы ПНК



*Братанов Дмитрий Александрович*  
*[dm.bratanov@gmail.com](mailto:dm.bratanov@gmail.com)*

