

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	31.03.2011	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	Зачет	



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



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



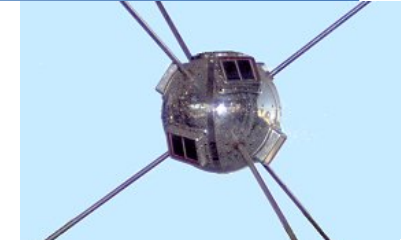
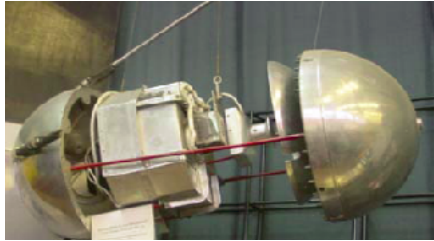
Королёв С.П.
1907-1966



Ракета Р-7 1-я МКБР:
5,4 т./7000 км



Спутник



	СПУТНИК 1, СССР	VANGUARD 1, США
ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ		
Диаметр	58 см	16,5 см
Масса	83,6 кг	1,47 кг
ПЕРЕДАТЧИК		
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
ОРБИТА		
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 θ

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

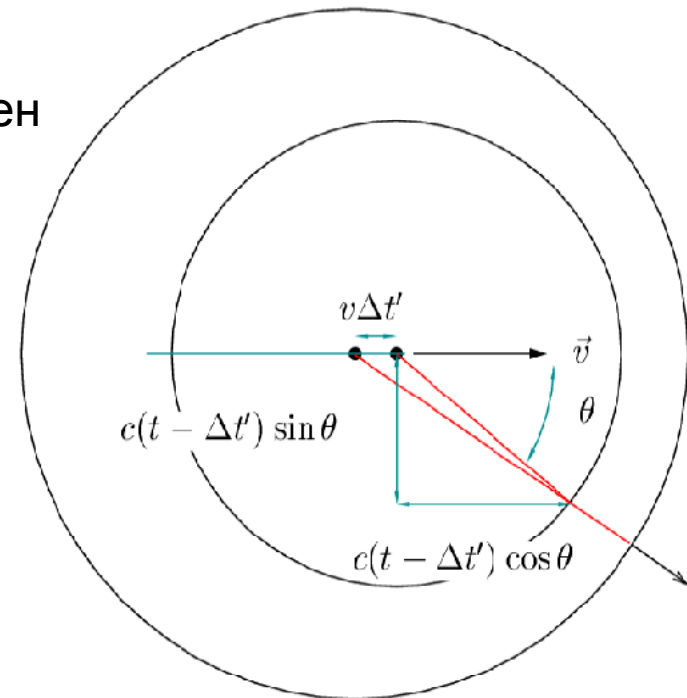
$$\Delta t = t - t'$$

' – измерено в СК в которой источник неподвижен

Доплеровский сдвиг частоты:

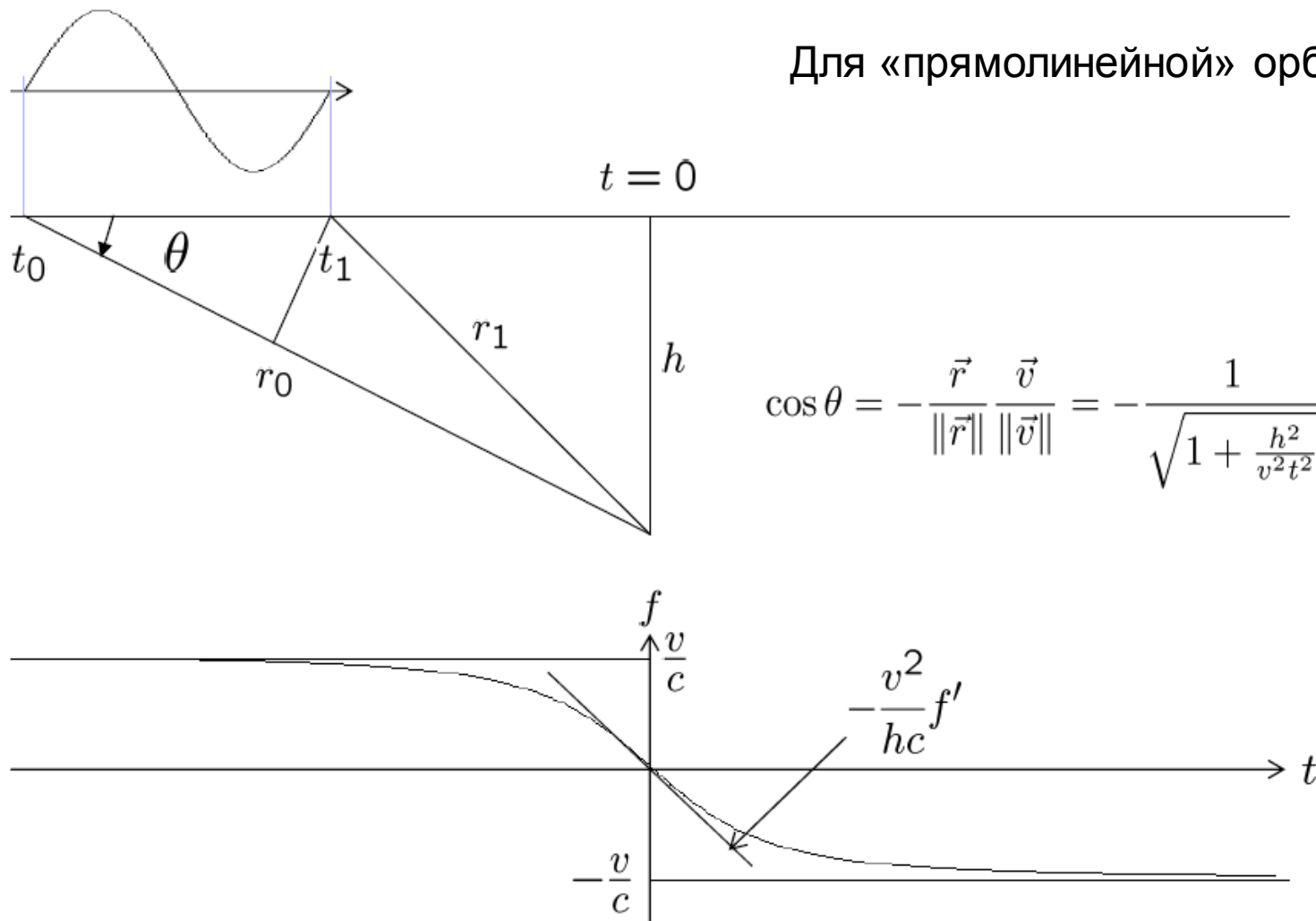
$$f_D = f - f' = \frac{\vec{v} \cdot \vec{n}}{c} f'$$

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



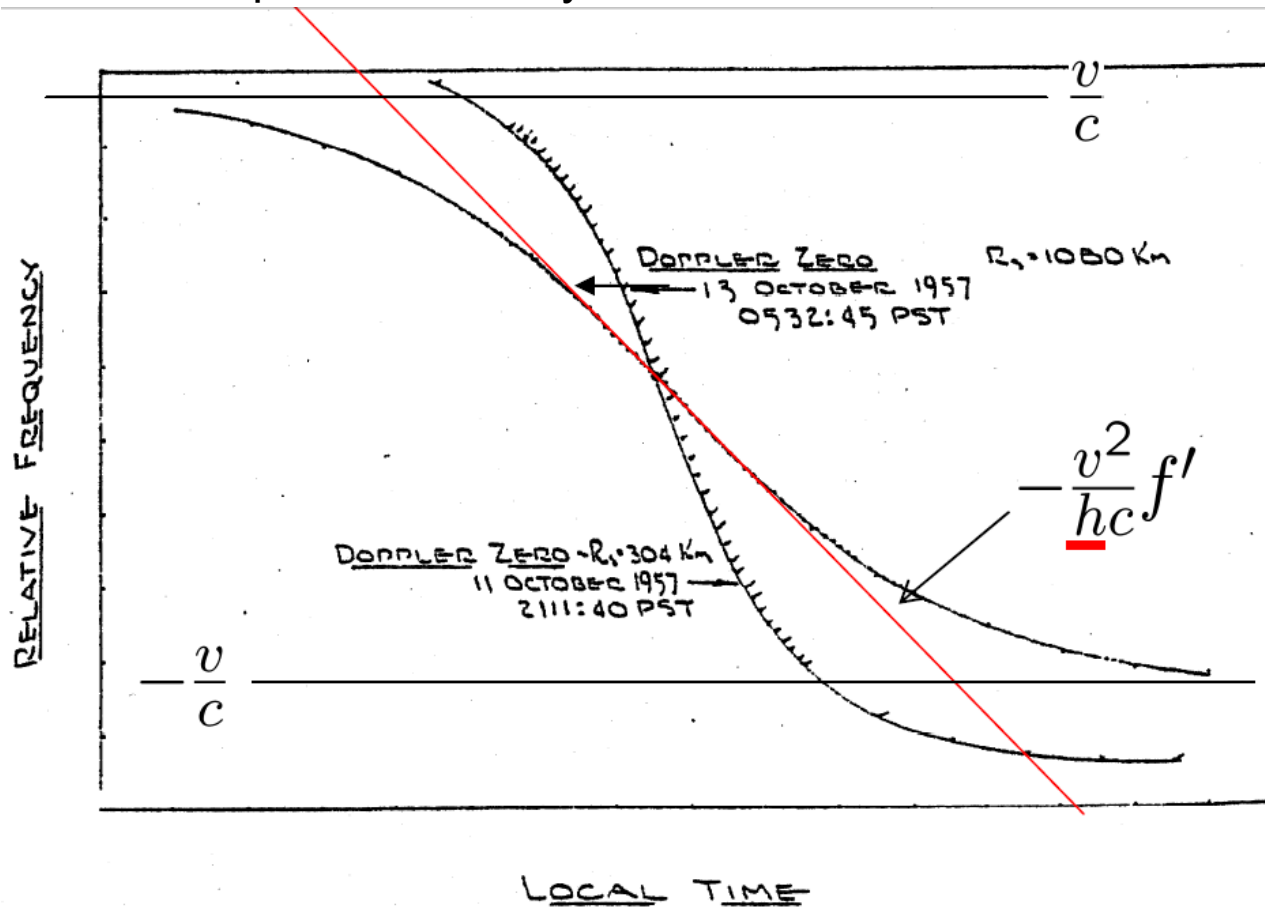
Эффект Доплера

Для «прямолинейной» орбиты



Эффект Доплера

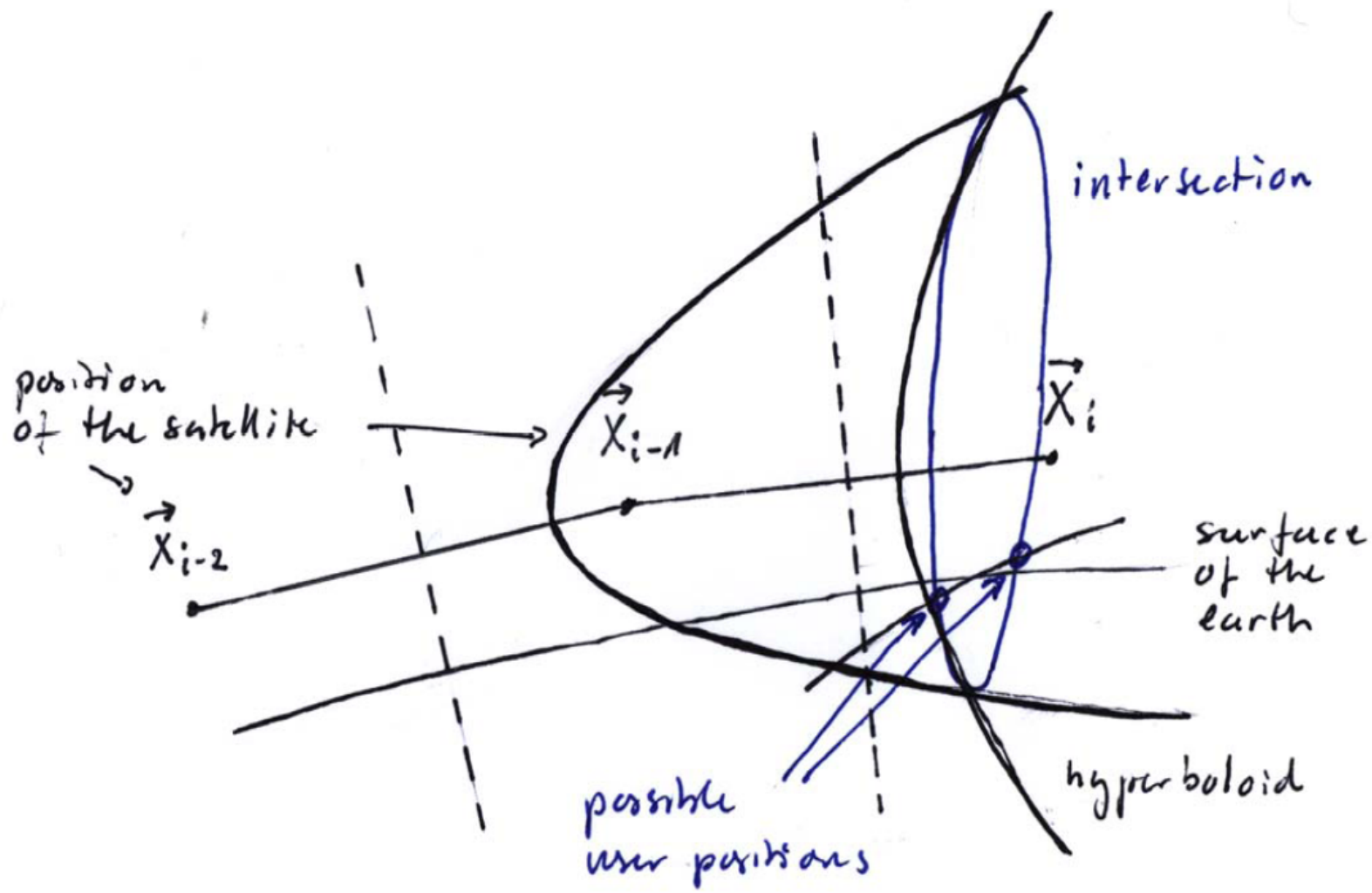
Исторические наблюдения за орбитой Спутника 1 сделанные в MIT, Standford и John Hopkins University



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



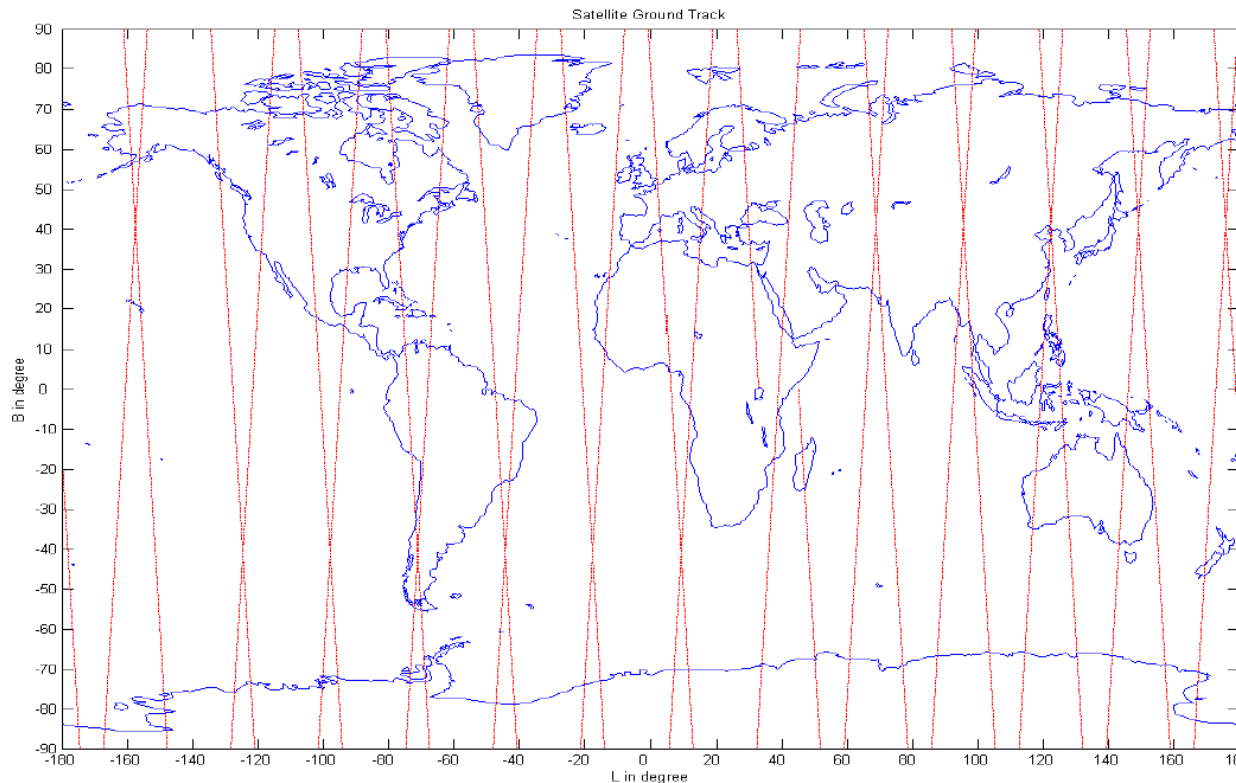
Геометрия гиперболического позиционирования Transit



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°
 $H = 1075$ 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



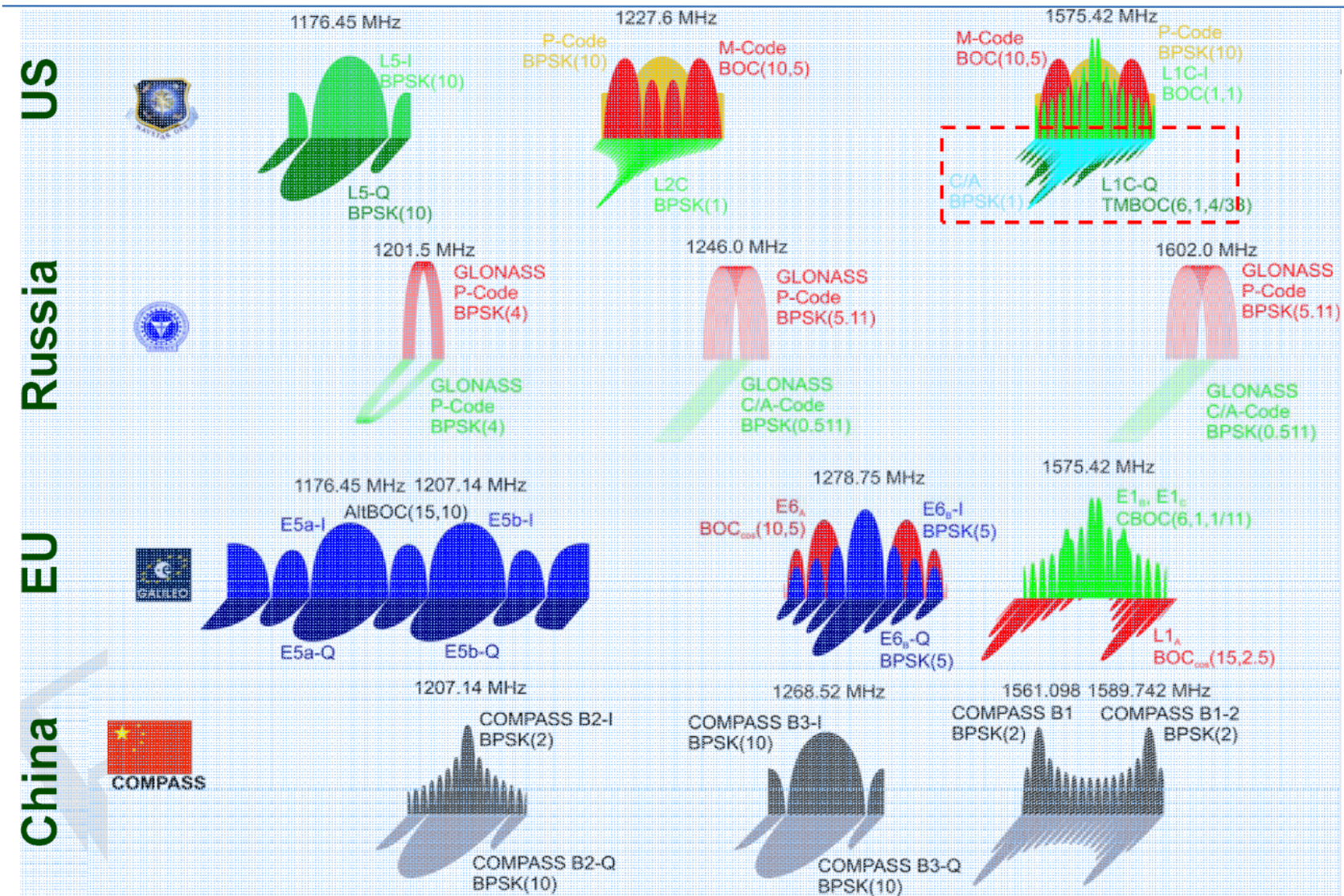
Global positioning System (GPS)

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 Vela 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 гибели самолёта компании Korean Airline , сбитого над территорией СССР, принято решение о предоставлении сигнала гражданским службам.
1986	Гибель космического челнока Space Shuttle «Challenger» 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 (англ. selective availability — 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 (англ. Initial Operational Capability). 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 (англ. Full Operational Capability)
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 Galileo и GPS ¹
Декабрь 2006	Российско-американские переговоры по сотрудничеству в области обеспечения взаимодополняемости космических навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. ²



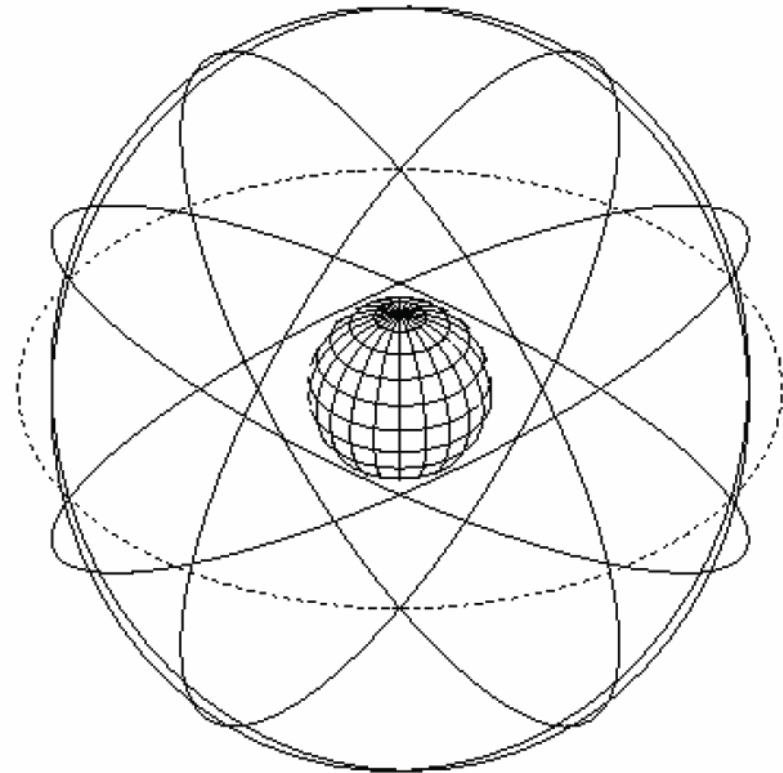
GPS: Комическая часть (space segment)

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° и имеют склонение (угол относительно экватора) 55° .

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.

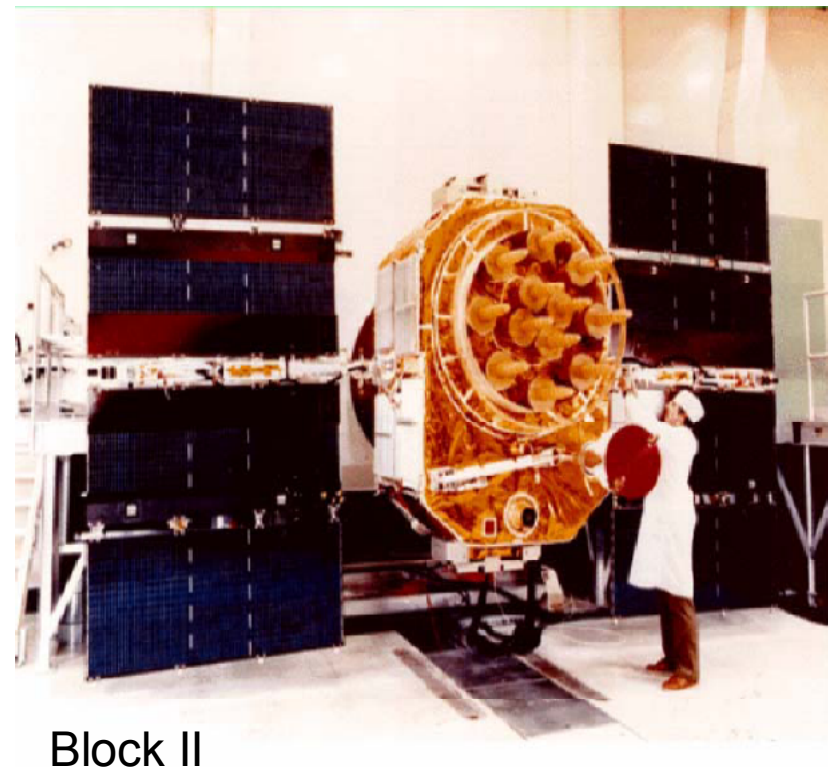
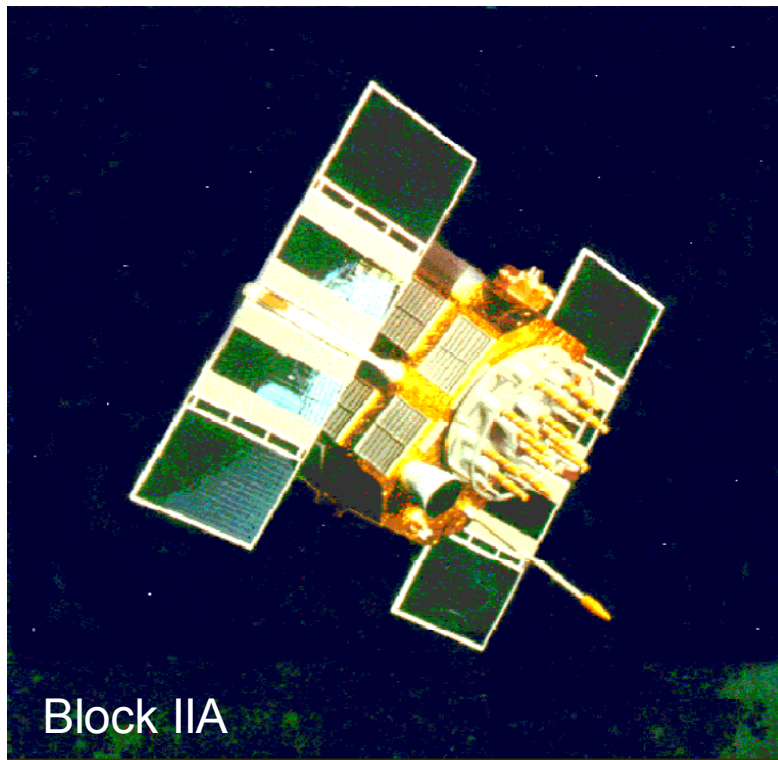
Идея созвездия: пользователь должен иметь возможность получить сигналы как минимум 4-х спутников в любое время и в любом месте.



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)



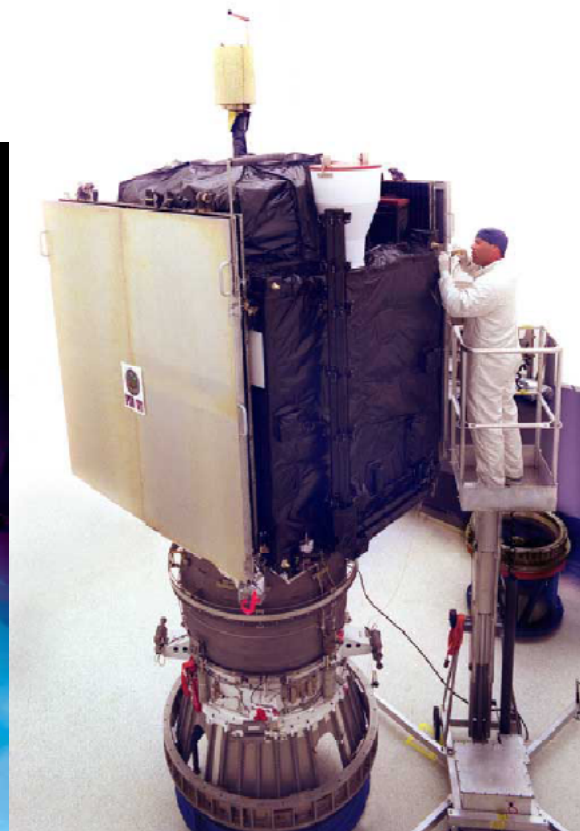
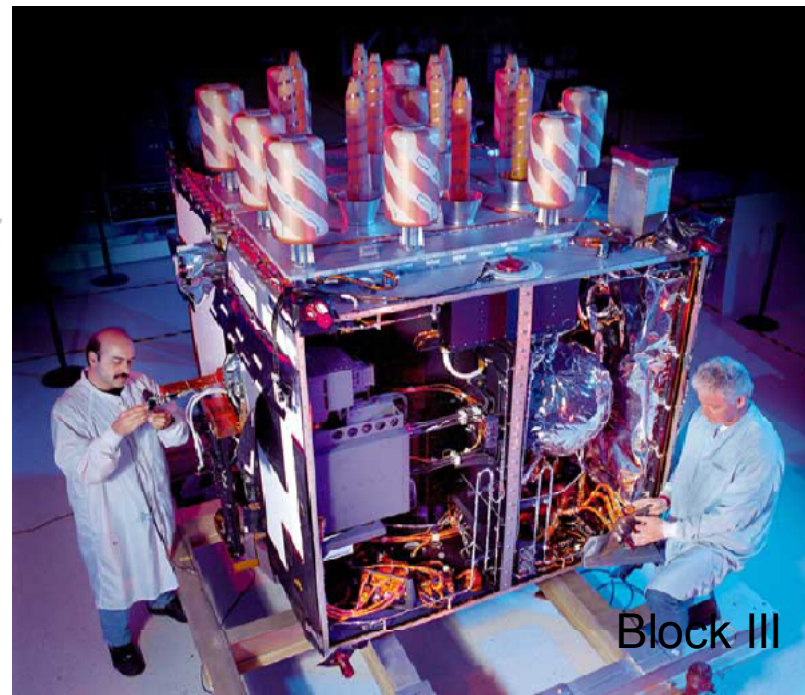
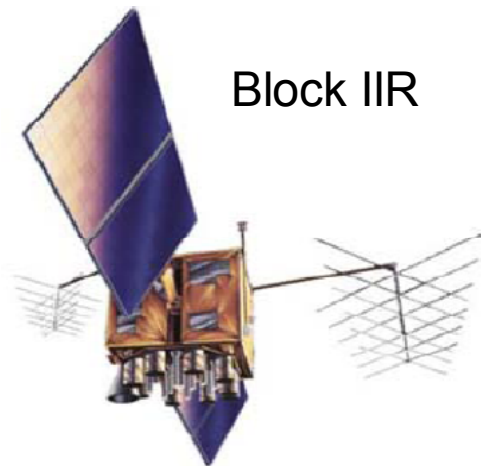
GPS: Комическая часть (space segment)

На текущий момент 31 спутник на орбите и активен.

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

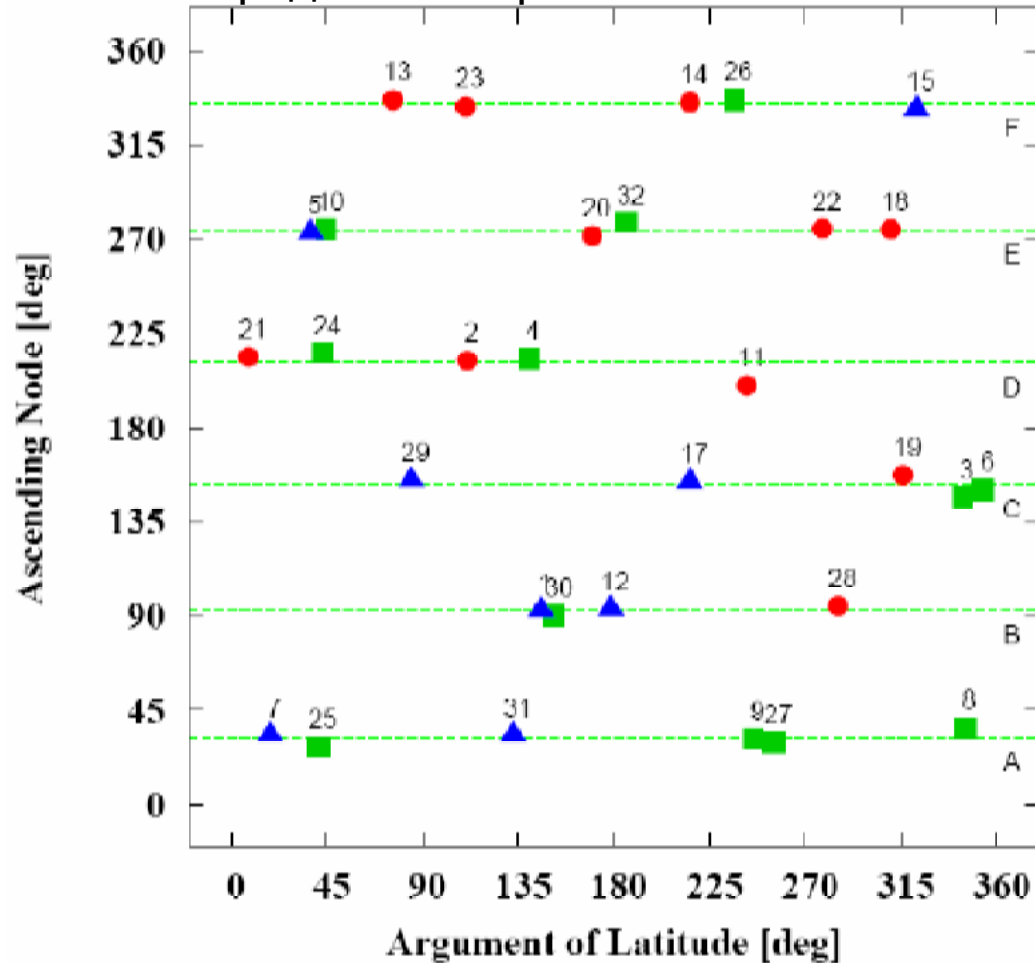
Первый спутник демонстрирующий излучение сигналов L5 запущен 24 марта 2009.

Запуск Block III спутников намечен на 2014.



GPS: Комическая часть (space segment)

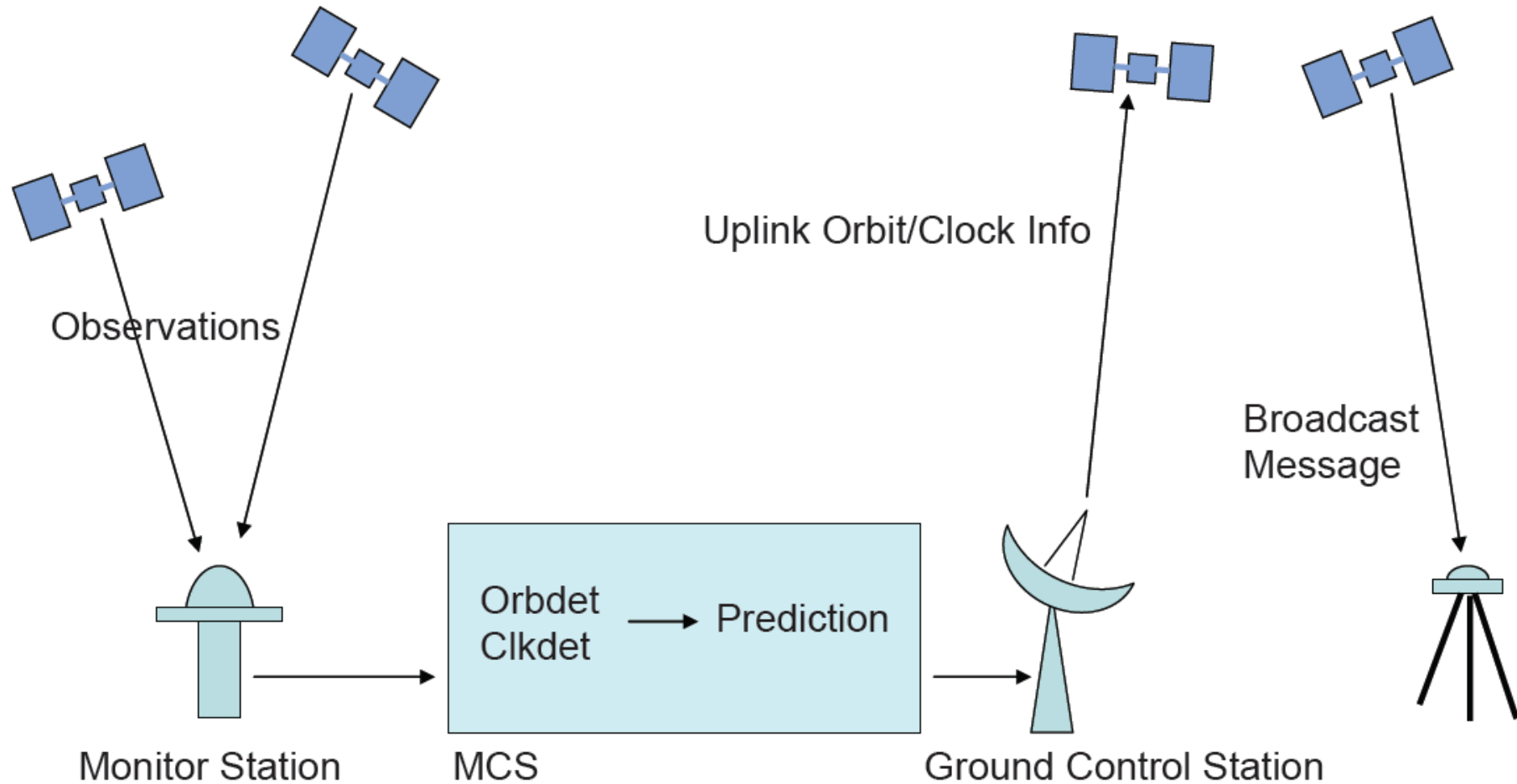
Распределение орбитальных плоскостей A-F 19 октября 2010 г.



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» . [10]
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 разв ртыва ния	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 стабильн ость
Глонасс	1982	Выведен из эксплуатаци и	L1OF, L1SF		L2SF				5×10^{-13}
Глонасс- М	2003	В эксплуатаци и	L1OF, L1SF		L2OF, L2SF				1×10^{-13}
Глонасс- К1	2010	ЛКИ*	L1OF, L1SF		L2OF, L2SF		L3OC		5×10^{-14}
Глонасс- К2	2013	В разработке	L1OF, L1SF	L1OC, L1SC	L2OF, L2SF	L2SC	L3OC		1×10^{-14}
Глонасс- КМ	2015	На стадии изучения	L1OF, L1SF	L1OC, L1SC, L1OCM	L2OF, L2SF	L2SC, L2OC	L3OC, L3SC	L5OC	

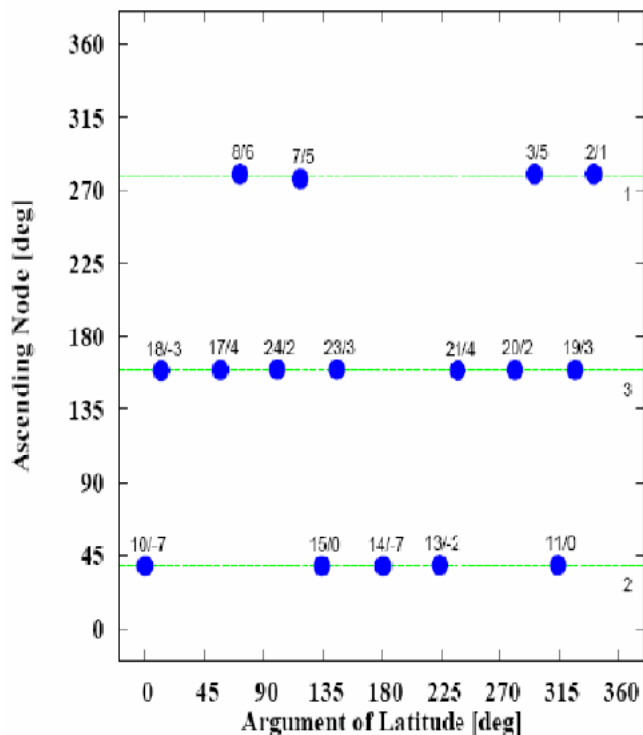
"O": открытый стандартный сигнал, "S": шифрованный сигнал высокой точности; "F": [Частотное разделение](#) (FDMA), "C": [Кодовое разделение](#) (CDMA); n=-7,-6,-5,...,6; *Лётно-конструкторские ИСПЫТАНИЯ



GLONASS

Орбиты спутников ГЛОНАСС расположены в 3-х плоскостях, смещенных по экватору на 120° , и имеющих склонение 65° 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!

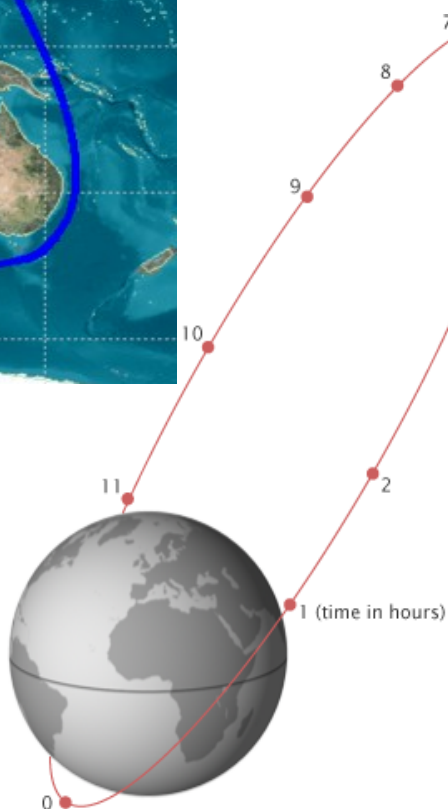


Спутниковое созвездие GALILEO должно насчитывать 27 спутников.
Орбиты спутников GALILEO расположены в 3-х плоскостях, смещенных по экватору на 120° , и имеющих склонение 56° .
Высота орбиты 23200 км.
Период обращения 14 ч 04 мин.

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



QZSS - Quasi-Zenith Satellite System



Страна: Япония

Juntencho (準天頂)

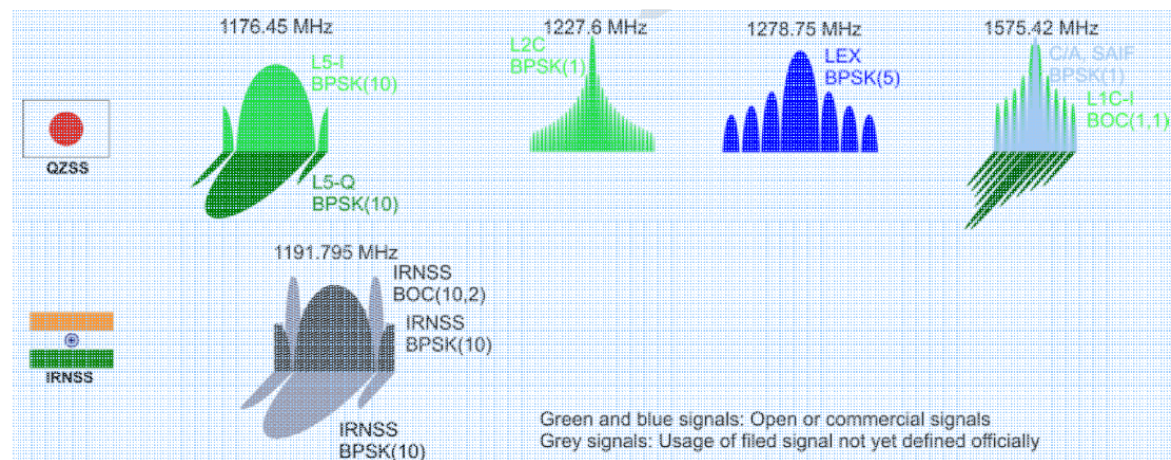
Разработчик: Advanced Space Business Corporation
(Mitsubishi Electric Corp.,
Hitachi Ltd. и GNSS Technologies Inc.)

1-й спутник 'Michibiki' выведен 11 September 2010

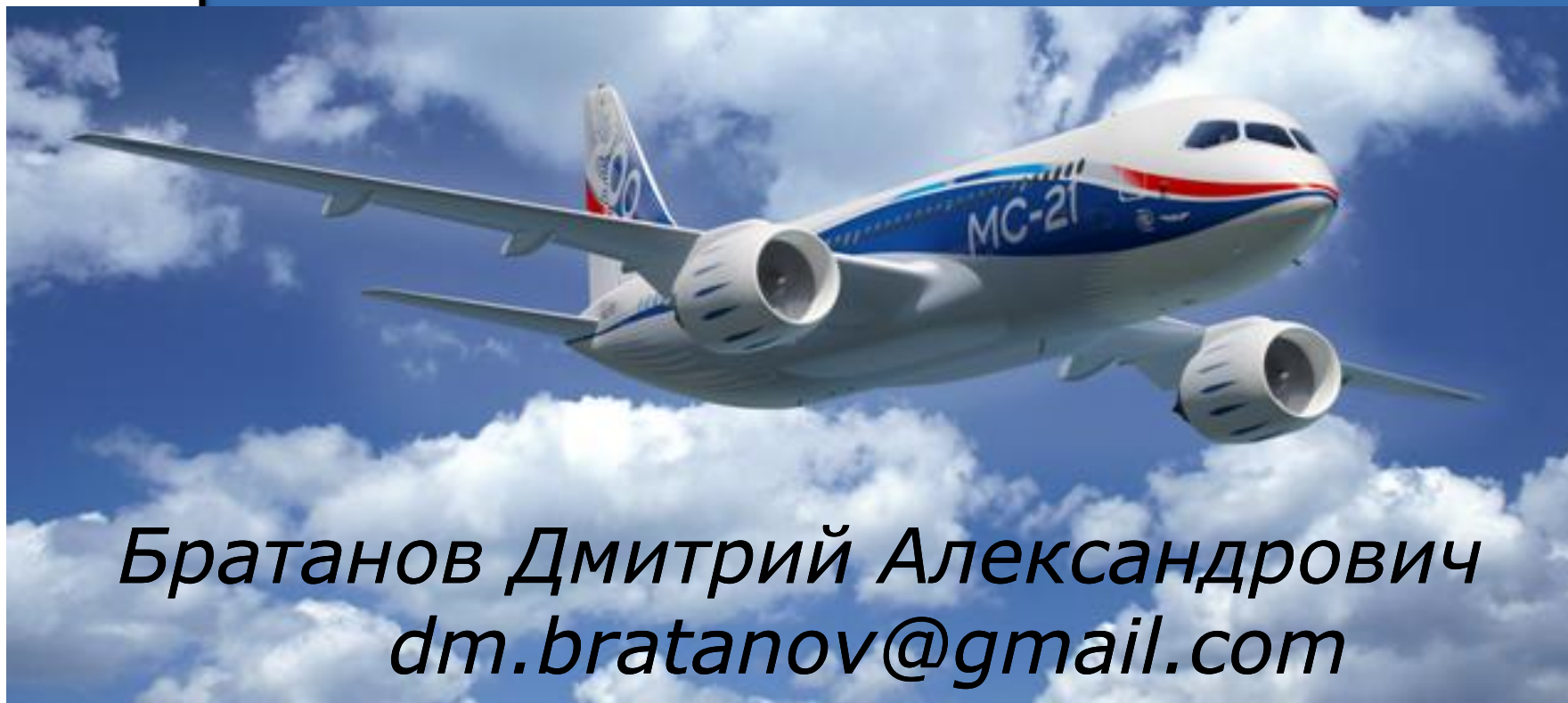
Полная работоспособность к 2013 г.

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

