

**Космическая система на основе сверхмалых спутников
«Радиомет-СМКА» для радиозатменного мониторинга атмосферы
и ионосферы сигналами ГНСС ГЛОНАСС и GPS**

**Вишняков В.М. (1), Виноградов А.А. (2), Павельев А.Г. (3), Яковлев
О.И. (3), Матюгов С.С. (3)**

(1) ФГУП НПП ВНИИЭМ

(2) ОАО «Российские космические системы»

(3) Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Восьмая Всероссийская Открытая конференция

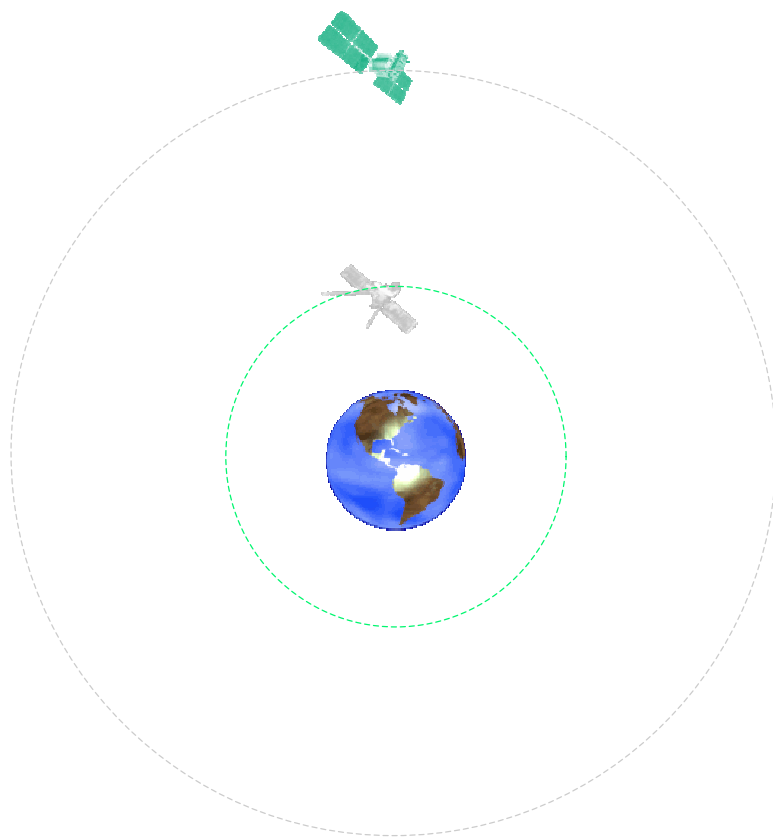
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»

(Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)

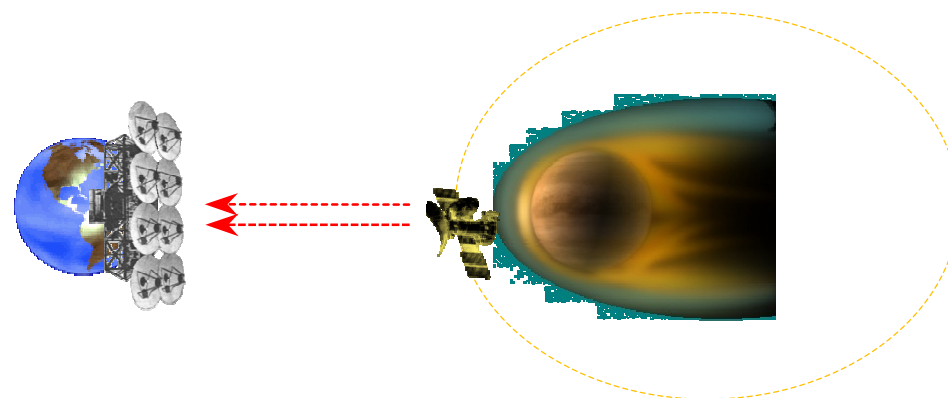
(Москва, ИКИ РАН, 15 - 19 ноября 2010 г.)

ГЕОМЕТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ И АТМОСФЕРЫ, БИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

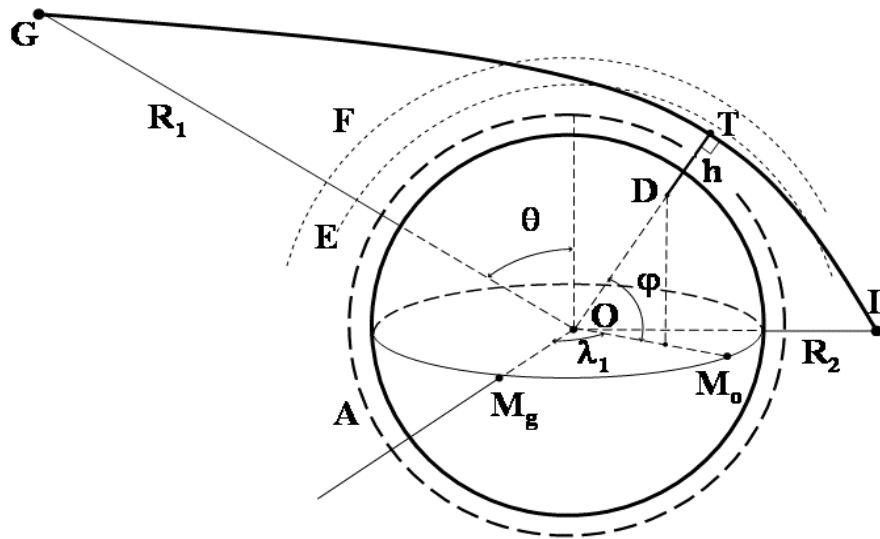
Трассы радиосвязи
спутники GPS → спутник CHAMP



Трассы радиосвязи
спутники ВЕНЕРА-15,-16 → Наземный пункт



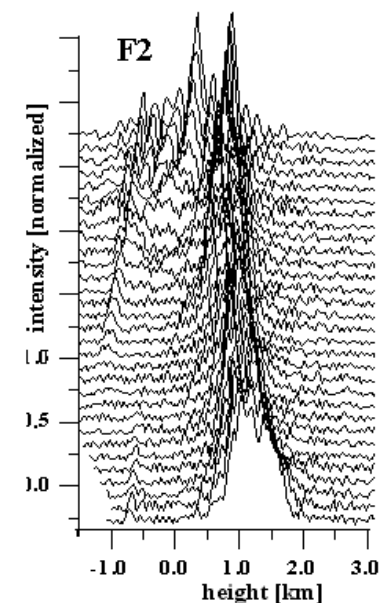
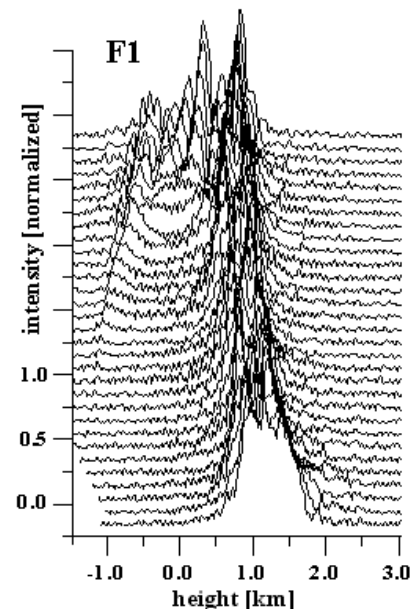
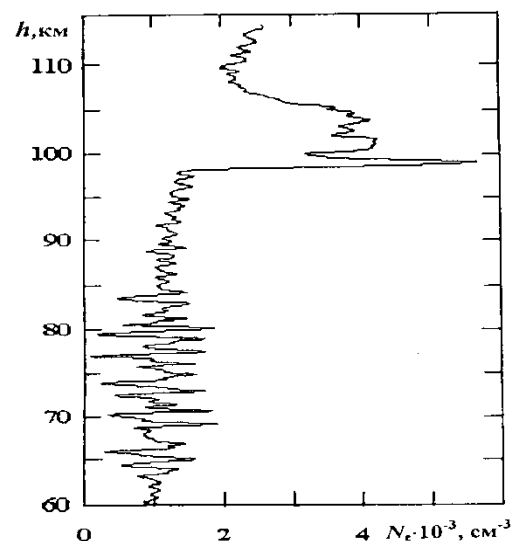
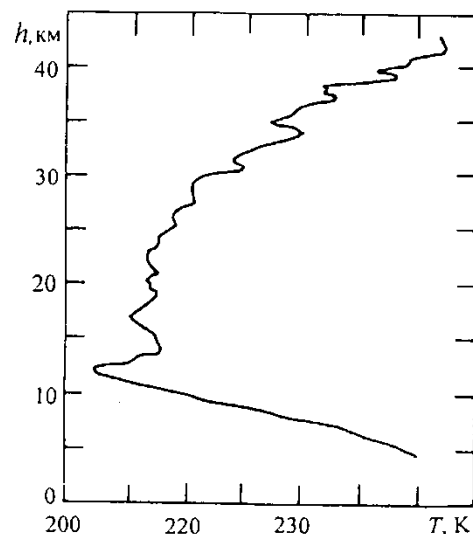
Принципы радиозатменного мониторинга атмосферы



Радиозатменные исследования атмосферы Земли возможны с помощью двух спутников – спутника-излучателя (G) и спутника-приемника сигналов (L), находящихся на орбитах разной высоты и движущихся с разными скоростями относительно поверхности Земли. При заходе спутника L в зону тени Земли относительно навигационного спутника G перигей T лучевой траектории GTL, перемещаясь вдоль линии TD, проходит через ионосферу и атмосферу.

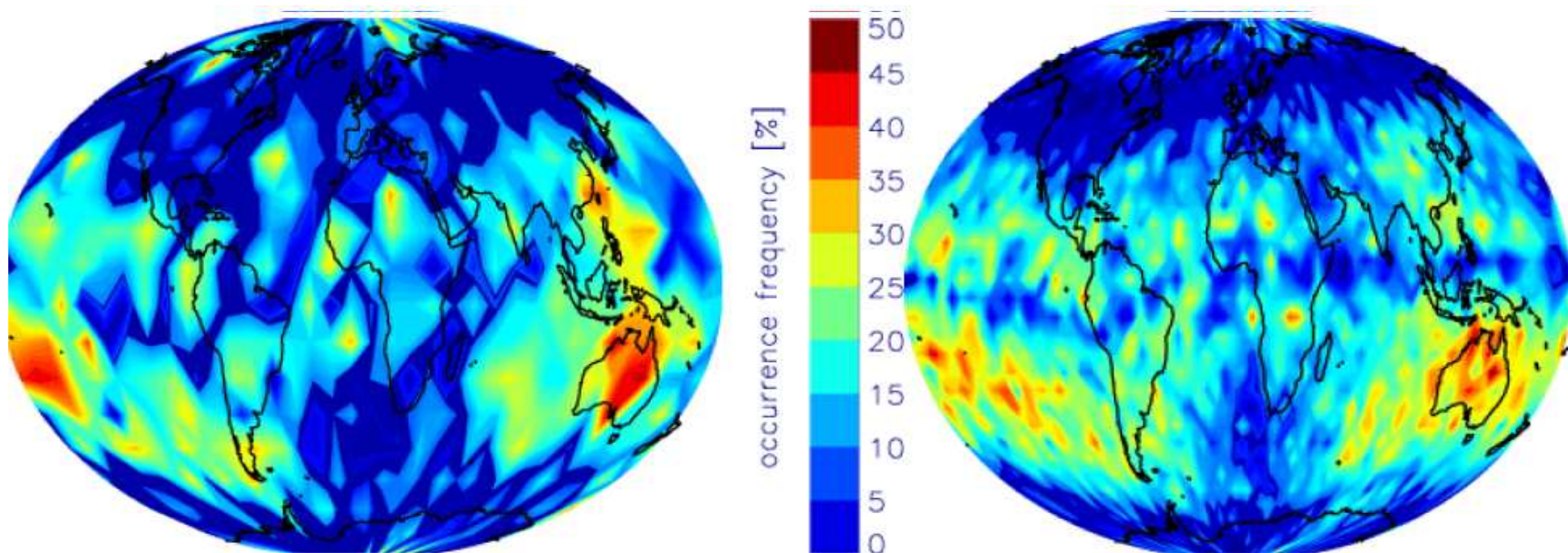
Приемник на спутнике L регистрирует сигналы на двух частотах, изменения фазы и амплитуды которых содержат информацию о характеристиках околоземного пространства вдоль трассы распространения радиоволн GTL. При допущении о локальной сферической симметрии околоземной среды эти изменения вызваны, главным образом, влиянием областей ионосферы и атмосферы вблизи точки перигея T лучевой траектории. Далее по измеренным изменениям фаз и амплитуд и по известным эфемеридам спутников G и L можно рассчитать высотный профиль угла рефракции и затем, с помощью преобразования Абеля, найти высотную зависимость показателя преломления в атмосфере, а также электронной концентрации в ионосфере.

Данные радиозатменного мониторинга атмосферы



Радиозатменные измерения в итоге дают информацию:
об атмосфере (вертикальные профили плотности воздуха, давления, температуре **график слева**), влажности и др.), ионосфере (вертикальные профили электронной концентрации, **график в середине**) и отражениях от земной поверхности (**диаграммы справа**).

Географическое распределение спорадических слоев в октябре 2006 года по данным спутника CHAMP (слева) и FORMOSAT-3 (справа) (Wickert et al., 2009)



Научные КА радиозатменного зондирования, запущенные в 1995-2009 гг.

GPS/MET (Micro-Lab-1), CHAMP, SAC-S, GRACE, METOP etc.

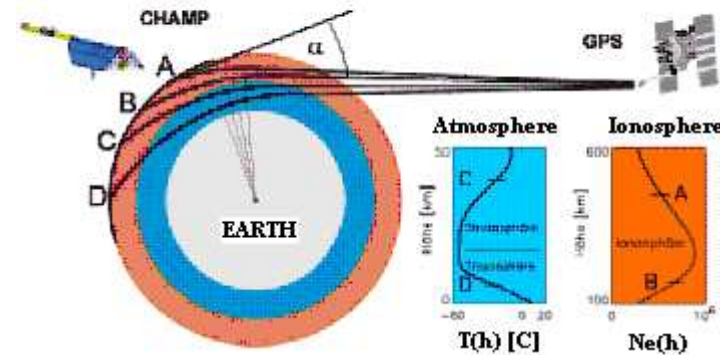
Эти спутники (массой 70-250 кг) были оснащены приемниками GPS-сигналами, прошедшими через слои атмосферы и ионосферы. Принятые сигналы передавались на наземные станции, где обрабатывались для прецизионного вычисления физических параметров атмосферы и ионосферы.

Спутники выполняли научные задачи (без проведения мониторинга на регулярной основе)

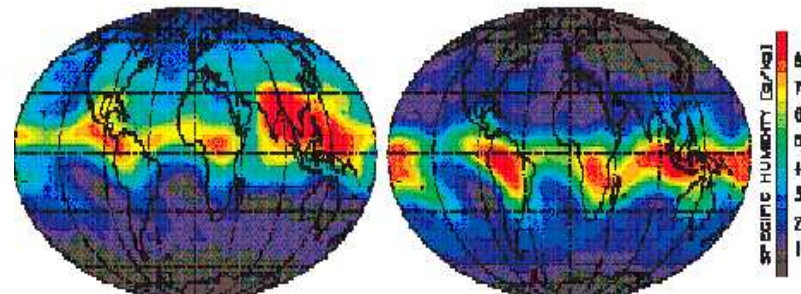
OceanSAT-2 (с 2009 г.) имеет в составе БА РЗЗА «ROSA» на сигналы GPS и ГЛОНАСС

CanX-2 (с 2008 г.) – наноспутник массой 3,5 кг с БА РЗЗА на сигналы GPS

CHAMP mission and first results. Wickert, 2002, PhD Dissertation (modified)

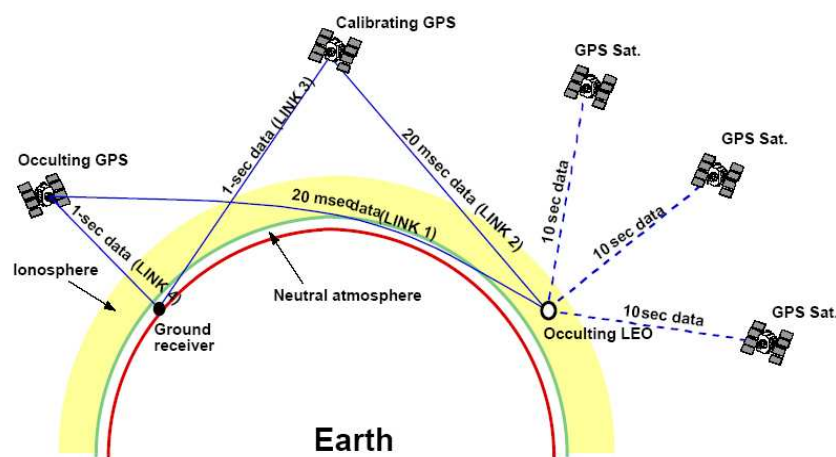
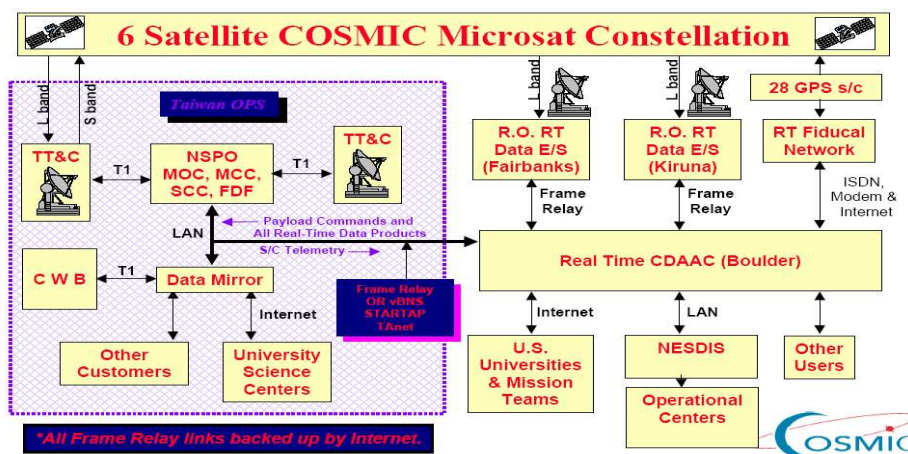


Humidity distribution in the atmosphere (CHAMP data), July 2003 (left), January 2003 (right). From Wickert 2006, FORMOSAT3 Workshop (modified).



Космическая система “Formosat-3” (COSMIC) для регулярного радиозатменного мониторинга атмосферы и ионосферы Земли

“Formosat-3” structure. C.Rocken, 2000, TAO (modified)

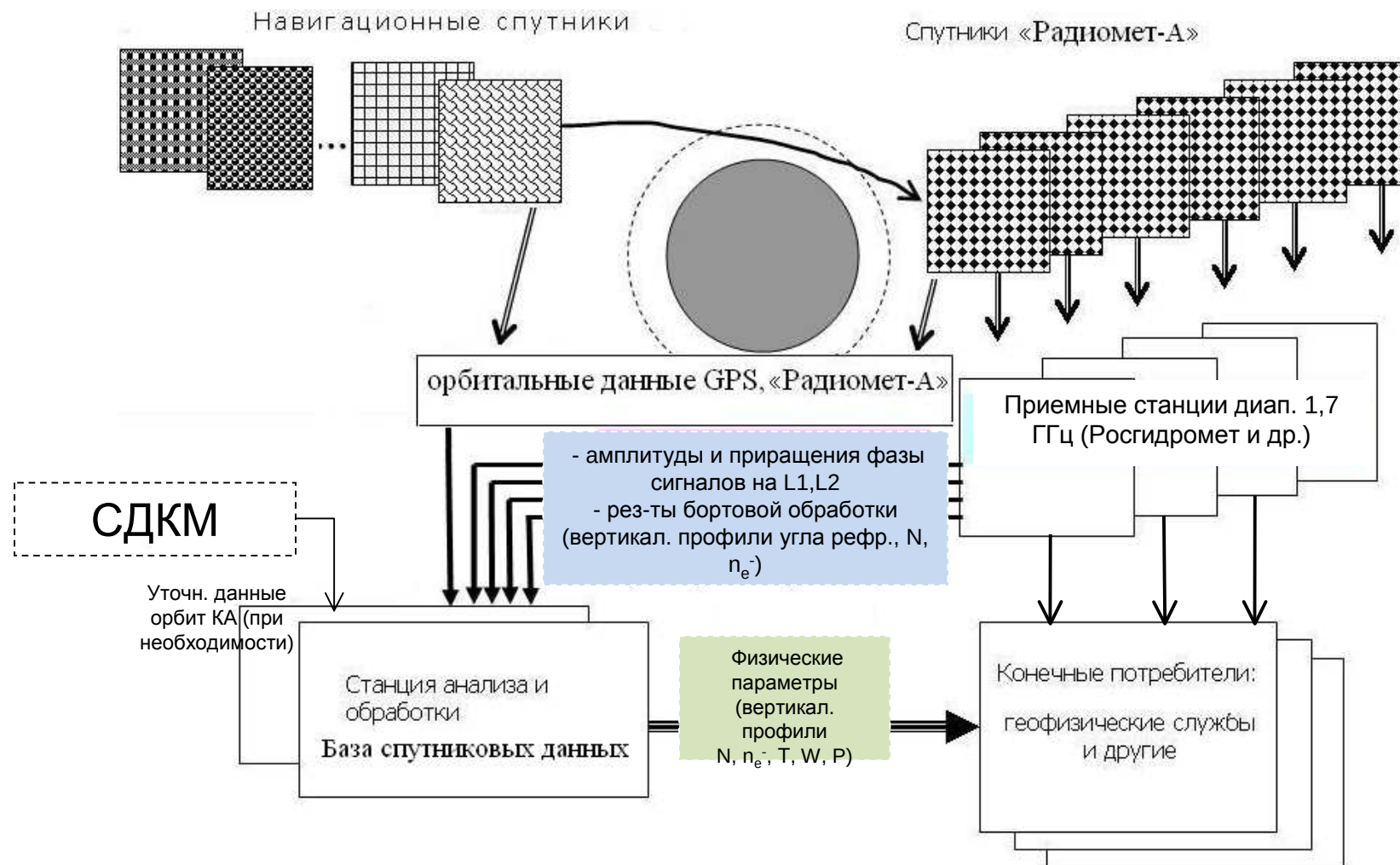


“Formosat-3” (NSPO, China-Taiwan):
6 микроспутников ($m=69$ кг). Орбиты: $H=800$ км,
 $i=72^\circ$ **Запущены в апреле 2006 г.**
 Мониторинг физических параметров:
 - в нижней атмосфере на высотах – $1...35$ км с
 вертикальным разрешением $100 - 600$ м;
 - в ионосфере на высотах – $90...400$ км с
 вертикальным разрешением – 800 м
 Погрешность измер. температуры – $0,2-1$ К (до 30
 км), $2-8$ К (выше 35 км)
**До 2500 зондирований в день в глобальном
 масштабе**

Ограничения эффективности системы «Formosat-3»

- 1) Выбранные параметры орбит КА «Formosat-3» (наклонение 72°) не позволяют проводить радиозондирование по сигналам КА GPS (наклонение орбит 63°) в высокоширотных и полярных областях атмосферы; это, например, не позволяет производить такой мониторинг над северными территориями России.
- 2) Спутники системы FORMOSAT-3 не производят прием сигналов от спутников ГНСС «Глонасс», а работают только по сигналам спутников GPS. что ограничивает повторяемость наблюдений системой FORMOSAT-3. Поэтому для достижения повторяемости измерений 2-3 раза в сутки, необходимой для случаев высокооперативных прогнозов потребовалось бы в соответствующее число раз увеличить состав орбитальной группировки спутников FORMOSAT-3, что связано со значительным удорожанием и усложнением такой системы.
- 3) Прежде, чем поступить к потребителям, данные со спутников «Formosat-3» проходят сложную и многоступенчатую процедуру приема, предварительной и тематической обработки, проходя по разветвленным каналам связи и передачи информации. В результате искомые данные о физических параметрах атмосферы и ионосферы поступают к потребителям со значительной задержкой во времени (3 часа и более), что ограничивает оперативность системы.

Система радиозатменного зондирования «Радиомет-СМКА»



Система радиозатменного зондирования «Радиомет-СМКА»

Основные преимущества

- применение на борту КА радиоголографической аппаратуры, регистрирующей сигналы как от системы GPS, так и от системы «Глонасс» (а в перспективе – и от других систем спутниковой навигации, таких, как GALILEO и пр.), что примерно вдвое (без увеличения числа спутников в системе) повысит частоту получения метеоинформации;
- высокая повторяемость наблюдений для всех широтных областей околоземного пространства, включая приэкваториальные и приполярные области вследствие оптимизации параметров орбит группировки системы «Радиомет-СМКА». Оптимизация параметров орбит КА, проводимая по созданной в рамках проекта математической модели системы мониторинга, позволит обеспечить заданные характеристики при минимально возможном общем числе КА (одним из вариантов орбитального построения будет использование для большинства КА - полярных орбит, а для 1-2 КА – орбиты с низким наклоном для более оперативного обзора приэкваториальных областей атмосферы);
- применение новых методов обработки и анализа навигационных сигналов, регистрируемых спутниками системы «Радиомет-СМКА», которые позволят проводить максимально возможный объем обработки сигналов непосредственно на борту СМКА «Радиомет» и сбрасывать напрямую на наземные станции потребителей уже готовую информацию о физических параметрах нижней атмосферы (на высотах 0...50 км) и ионосферы (на высотах 90...400 км). В частности, возможна передача данных в общепринятых режимах APT и HRPT на многочисленные станции приема информации, применяемые ныне во всем мире для приема с метеорологических спутников.

Алгоритмы бортовой тематической обработки. Схема получения информации по результатам радиозатменных измерений



$$\Delta f = \Delta f_s - \Delta f_0 = \lambda^{-1} [V_2 (\cos \beta - 1) + V_1 \sin \beta]$$

Если орбита НКА много выше орбиты спутника РЗЗА, то где

$$\Delta f \approx \lambda^{-1} V_1 \xi$$

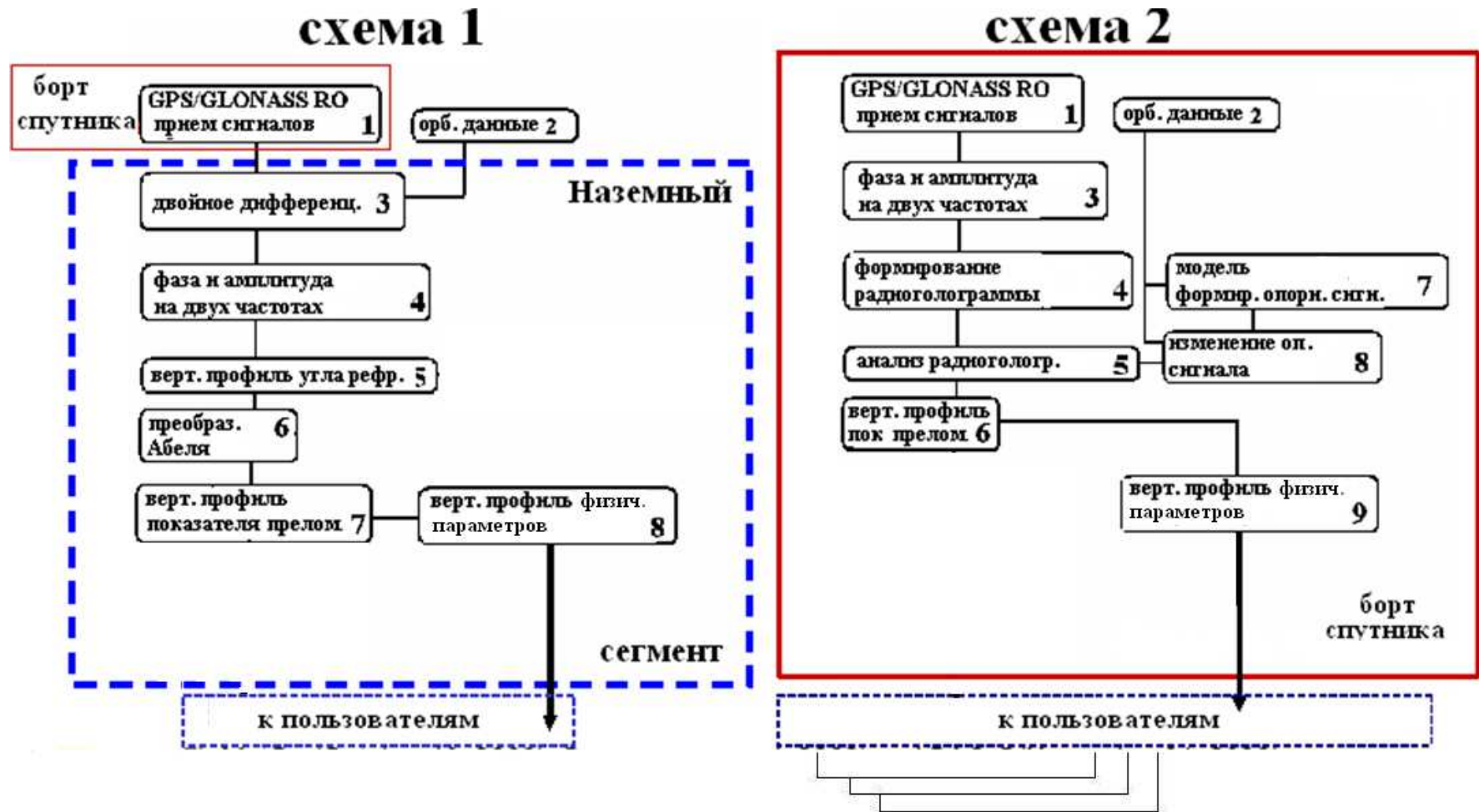
$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\Delta\varphi)}{dt}$$

$$N(r) = \frac{1}{\pi} \int_r^\infty \xi(p) (p^2 - r^2)^{-1/2} dp.$$

$$N = (n-1) \times 10^6 = 77,6 \times D/T + 3,73 \times 10^5 \times e/T^2 + 4,03 \times 10^7 \times N_a/f^2 + 1,4 \times W,$$

где N - приведенный коэффициент преломления в N -единицах (1 N -ед.=106), P - атмосферное давление в мбар, T - температура в К, e - парциальное давление водяного пара в мбар, N_e - электронная концентрация в см⁻³, f - частота сигнала в Гц, W - концентрация жидкой воды в г/м³.

Обработка сигналов радиозатменного зондирования в
существующих радиозатменных миссиях (1)
и в системе «Радиомет-МКА» (2)



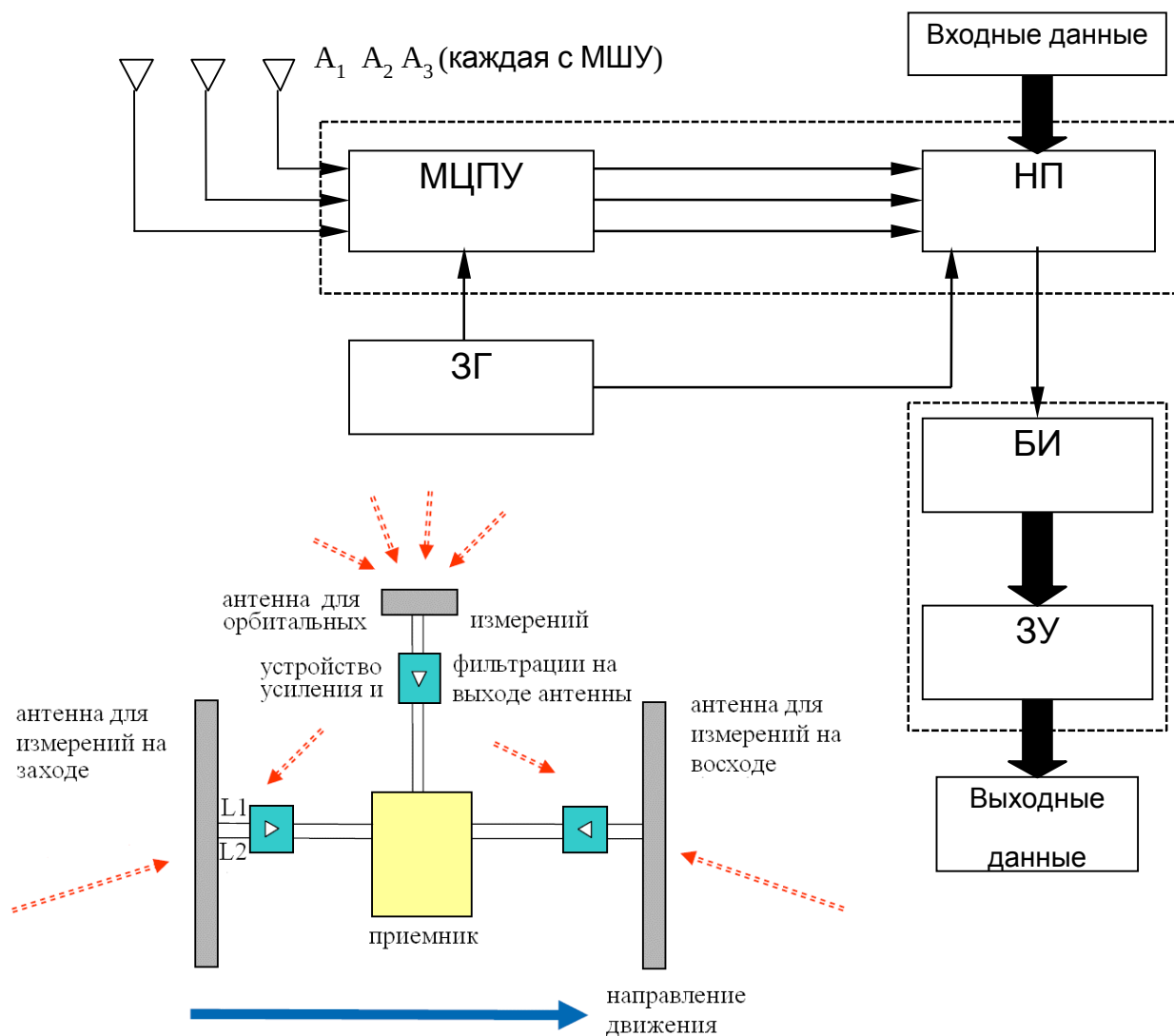
Уровни обработки и предоставления потребителям данных, получаемые при РЗЗА

- Данные первого уровня** содержат подробную информацию об условиях измерений.
 - Данные второго уровня** содержат сведения о дате и времени начала сеанса измерений, о порядковом номере сеанса измерений в данные сутки, о номере навигационного спутника, участвующего в зондировании, об используемом канале измерительного приемника, о временном интервале между последовательными отсчетами, о значениях отношения сигнала к шуму в диапазонах L1 и L2, о навигационных параметрах навигационных спутников и СМКА «Радиомет», о значениях фазового набег и амплитуды сигналов диапазонов L1 и L2, обусловленного влиянием зондируемой среды. **Данные второго уровня обычно передаются с борта существующих радиозатменных миссий (COSMIC и др.), после чего производится их дальнейшая обработка до 3 уровня на наземном сегменте.**
 - Данные третьего уровня** содержат значения физических параметров среды: вертикальные профили коэффициента преломления, плотности, давления и температуры нижней атмосферы, электронной концентрации в ионосфере, структуру внутренних волн и неоднородностей атмосферы, давление водяных паров, распределение абсолютной и относительной влажности, профили угла рефракции радиоволн и другие величины в интересах конкретных потребителей. **В системе «Радиомет-СМКА» с борта КА смогут передаваться и ряд данных третьего уровня (профили угла рефракции, коэффициента преломления, электронной концентрации, температуры сухой атмосферы).**
- Более полный набор физических параметров формируется в Центрах анализа и обработки с привлечением дополнительных наземных данных и, при необходимости, уточненных данных орбит навигационных КА и СМКА «Радиомет».

Основные технические требования к бортовой аппаратуре РЗЗА на СМКА «Радиомет»

- Обеспечивается прием излучаемых спутниками ГЛОНАСС и GPS CDMA-сигналов в частотных диапазонах L1 и L2 (в перспективе – и по спутникам Galileo)
- Число двухчастотных каналов не менее 24 (прием сигналов от любой комбинации спутников ГЛОНАСС - GPS).
- Инструментальная погрешность измерений при усреднении за 1 сек:
 - по фазе несущей - от 1 до 3 мм в диапазонах L1 и L2 при отношении сигнал/шум до 46 дБ/Гц;
 - по дальномерным кодам -
 - по C/A коду GPS и СТ коду ГЛОНАСС 0,6÷1 м
 - по P коду GPS и ВТ коду ГЛОНАСС- 0,2÷0.6 м.
 - при измерении амплитуды сигналов (отношения сигнал/шум) не хуже 0,1 дБ.
- Обеспечиваются измерения фазы несущей и амплитуды сигналов с частотой выборок:
 - при зондировании ионосферы выше 200 км над земной поверхностью - 1 Гц;
 - при зондировании ионосферы на высотах от 200 до 130 км - 10 Гц;
 - при зондировании атмосферы на высотах от 130 до 1 км - **50 Гц и более.**
- Обеспечивается решение навигационной задачи для СМКА «Радиомет» при темпе навигационных измерений 0,1 Гц со среднеквадратическими ошибками определения:
 - положения - 20 м
 - скорости - 0,5 м/с
 - времени ± 400 нс.
- Среднеквадратическая относительная случайная вариация частоты опорного генератора за время 10с должна быть не более $10 \cdot 10^{-12}$.
- Объем запоминающего устройства 150 Мб.

Структурная схема бортовой аппаратуры РЗЗА для СМКА «Радиомет»



Антенны:

A_1 – антенна для навигационных измерений;

A_2 и A_3 – антенны для затменных измерений (по восходящему и заходящему НКА);

МШУ – малошумящий усилитель;

МЦПУ – многоканальное цифровое приемное устройство;

НП – навигационный процессор;

БИ – блок интерфейса;

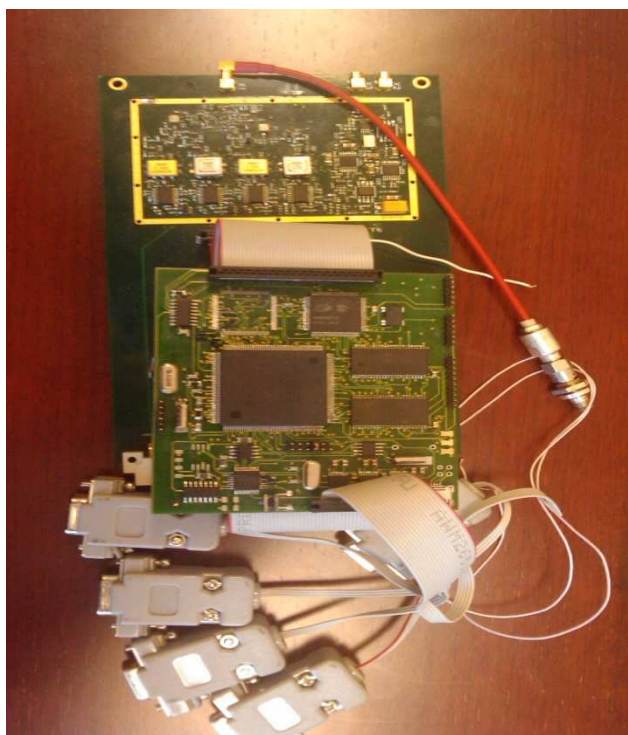
ЗГ – задающий генератор;

ЗУ – запоминающее устройство;

ВИП – вторичный источник питания.

Экспериментальный образец аппаратуры РЗЗА на основе бортового приемного устройства сигналов ГЛОНАСС/GPS

Основные характеристики образца



Принимаемые сигналы: C/A сигналы GPS,
ПТ и ВТ сигналы ГЛОНАСС;

Диапазоны частот: ~ 1.6 ГГц и 1.2 ГГц;

Измеряемые РНП:

- псевдодальность,
- псевдодоплер,
- псевдофаза;

Число каналов:

- при поиске 2048,
- при слежении 48;

Дискретность измерений до 10Гц;

Порты ввода/вывода RS 232

Состав образца:

- плата в/ч обработки сигналов (аналоговая часть);
- плата цифровой обработки сигналов

Доработки для приема сигналов РЗЗА:

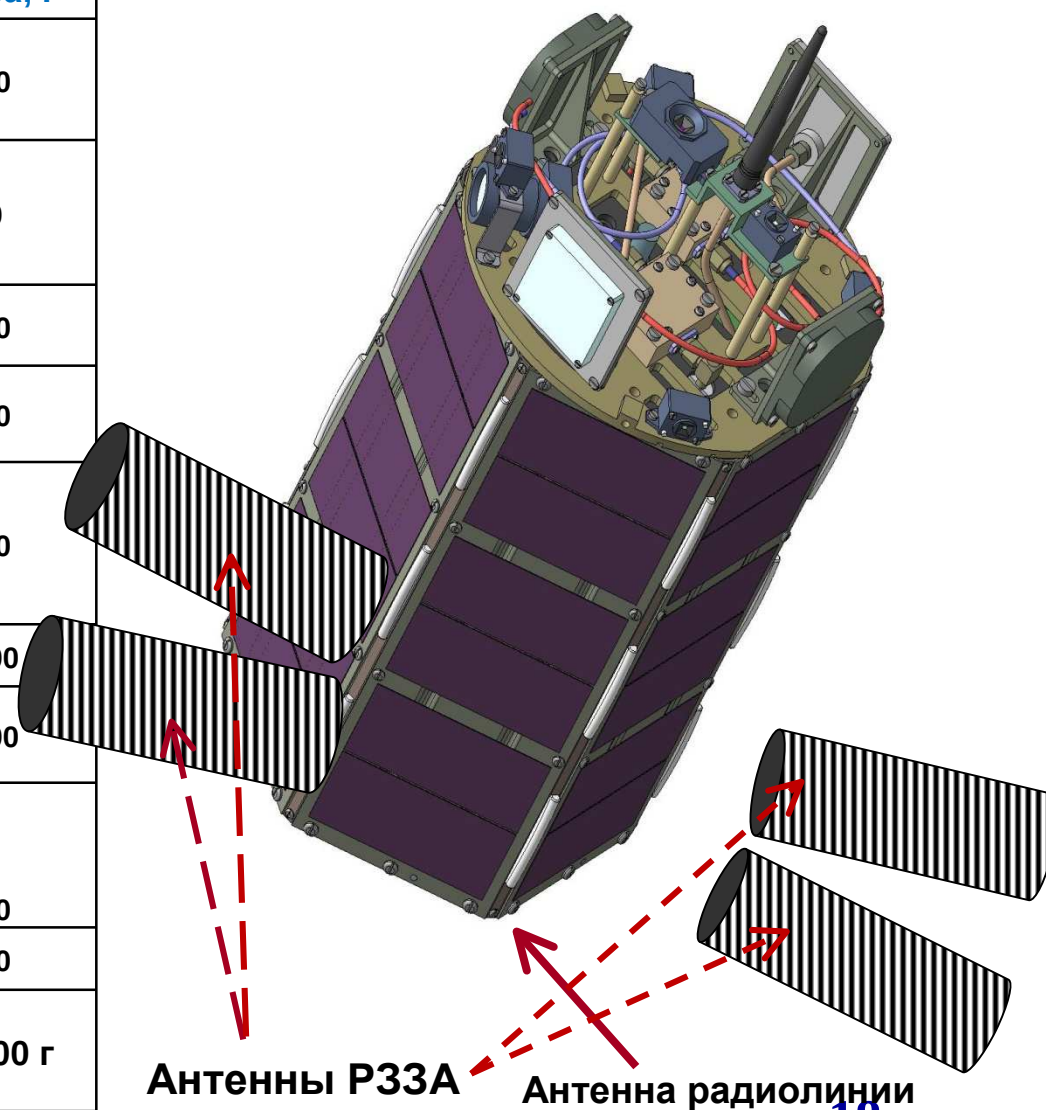
- Ускоренный поиск сигналов
- Улучшенная чувствительность и линейность
- Возможность частоты выборок до 50Гц

Основные характеристики СМКА «Радиомет»

- Для РЗЗА используются - CDMA-сигналы ГНСС GPS, Глонасс и GALILEO на 2 частотах.
- Ежесуточное число сеансов радиопросвечиваний – 500-700.
- Объем навигационной и измерительной информации, получаемой в одном сеансе: около 200 кБайт (предварительно обработанные (сырые) данные РЗЗА) / 20-40 кБайт (тематически обработанные данные РЗЗА).
- Скорость передачи данных РЗЗА на наземные станции - до 200 кбит/с (при длительности сеанса сброса до 10 мин.)
- Точность ориентации и стабилизации (3σ):
 - $\approx 0,001-0,002$ °/с,
 - не более $0,5^\circ$.
- Мощность средневиткового энергопотребления до 10 Вт.
- Объем ЗУ для данных РЗЗА – 1 Гб.
- Терморегулирование пассивное. Негерметичное исполнение приборов.
- Конструкция на основе углесотопластовых монтажных плат.
- Общая масса МКА «Радиомет» - около 9 кг (без учета резервирования).

Ориентировочная массовая сводка СМКА
«Радиомет»
 (без учета резервирования подсистем)

Прибор, элемент	Масса, г	Прибор, элемент	Масса, г
Модем ГЛОБАЛСТАР	280	Передатчик радиолинии сброса данных	650
Антенно – фидерное устройство (АФУ) ГЛОБАЛСТАР	250	Антенна радиолинии сброса данных	50
Магнетометр	150	Системный контроллер	250
Катушки системы ориентации 3 шт.	300	Датчики телеметрии	100
Маховики системы ориентации 3 шт.	450	Аппаратура спутниковой навигации (АСН) с антенной	500
Датчики солнца 6 шт.	360	СЭП	2000
Датчик горизонта 1 шт.	50	Несущая конструкция	1500
Антенны РЗЗА (2 комплекта на цилиндр.спиралях)	1200	Крепеж	100
Приемник РЗЗА	200	Кабельная сеть	300
Устройство бортовой тематической обработки	□ 400	ИТОГО:	~ 9100 г



**Сравнение характеристик систем
«Радиомет-СМКА» и «Formosat-3»**

Система радиозатменного зондирования	“Formosat-3” (COSMIC)	“Радиомет-СМКА”
Регистрируемые радионавигационные сигналы	GPS	GPS, “Glonass”, Galileo
Число ежедневных измерений	1500...2500	До 8 000
Средний период повторных замеров	~ 1 раз в день	3...4 раза в день
Наблюдение полярных зон	Нет	Есть
Конечные параметры атм. и ионосферы формируются:	На Земле	На борту КА
Оперативность доставки данных потребителям:	≥ 3 часов	Вплоть до РМВ

Основные источники и поддержка работы

- 1. Yakovlev O.I., Matyugov S.S., Vilkov I.A. Attenuation and scintillation of radio waves Earth atmosphere in radio occultation experiments on the satellite-to-satellite link //Radio Sci. 1995. V. 30. N. 3. P. 591.
- 2. Rocken C., Anthes R., Exner M. et al. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere //J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 29849.
- 3. Rocken C., Y.-H. Kuo, Schreiner W., et al. COSMIC System Description // J. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science. Special issue. 2000. V. 11. No. 1. P. 21.
- 4. A. Selivanov, A. Romanov, V. Vishnyakov, A. Vinogradov, A. Pavelyev, O. Yakovlev «Concept of space system for global radio occultation monitoring of lower atmosphere and ionosphere based on super-small satellites with GLONASS/GPS navigation signal receivers» //«United Nations/Austria/ European Space Agency Symposium on Space Tools and Solutions for Monitoring the Atmosphere and Land Cover». Austria, Graz, 9-12 September 2008.
- 5. A.G. Pavelyev, K. Igarashi, K. Hocke. Patent of Japan P2001 – 18248. Int. Cl. G 0 1 S 13/89 5/14 G 03 H 5/00 (P2003 - 4844), 2003.

Настоящая работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) (№ проекта 08-02-13535).

Точностные характеристики при обработке сигналов РЗЗА

- Компенсация ионосферной составляющей угла рефракции, вычисляемой при РЗЗА.
В отличие от тропосферной составляющей, не зависящей от частоты сигнала, ионосф.составл-я—ионосферный тренд - обратно пропорционален квадрату частоты. Если суммарные значения углов рефр (или приращения фазового пути в среде) на обеих частотах $L(L1)$ и $L(L2)$ пронормировать (умножить) каждый на свою частоту в квадрате, а потом вычесть друг из друга, то ионосферные компоненты уйдут, а тропосферные, не зависящие от частоты, останутся, и тем самым будет вычислен угол рефр. (или фаз. приращение) только за счет тропосферы.
- С задачей учета неоднозначности измерений приращения эйконала $\Phi(t)$ справляются при использовании режима программируемого гетеродина (режима «открытой петли», частота которого отслеживает ожидаемые изменения доплеровского сдвига в соответствии с принятой моделью рефракции в атмосфере.
- Точность измерений радиозатменным методом приведенного коэффициента преломления атмосферы составляет около 1% в интервале высот от 1 до 40 км. Погрешности определения температуры не превосходят $1\div 2$ К на высотах от 2 до 35 км за исключением районов с высоким содержанием влаги (напр., в тропиках).

Развитие КС РЗЗА “Formosat-3”

КА РЗЗА	<u>КА «Формосат-3»</u>	<u>Новый Формосат –</u> «Follow-On Design» (COSMIC-II)
Attitude Performance –	–3-axis non-linear control –Roll/Yaw (крен/рыскание): +/-5 deg (1σ) –Pitch (тангаж): +/- 2 deg (1σ) –Earth sensor x 2 –Sun sensor x 8 –Wheel x 1 –Torque rod x 3 –Bus GPS receiver x 1	– 3-axis linear control –Roll/Yaw: +/-0.2 deg (3σ) –Pitch: +/- 0.2 deg (3σ) –3-axis gyro –3-axis magnetometer –Wheel x 3 –Torque rod x 3 –GNSS payload x 1
GNSS RO Payload	–Track GPS signal – Receive 2000 data daily on average –Commercial oscillator –Phase array antenna –Open loop tracking algorithm	– Track GPS, GALILEO and GLONASS-CDMA signals –Receive 13,700 raw data on average –Ultra-stable oscillator –Better gain/Beam steering –Better capability for phase center, signal to noise ratio, and tracking –Add a processor to science research
weight	~ 60 kg	61 kg (w/ propellant)
Data Storage	128 M	>1.5 G
Computer Architecture	–Centralized architecture –Radiation hard	–Distributed architecture
Power	–Ni-H2 battery –dM/dC charge algorithm	–Lithium battery –Voltage based charge algorithm
Payload Interface	–Primary: GOX –Secondary: TIP, TBB	–Primary: GNSS RO payload –Secondary payload x2 (optional)
Structure	Metal Matrix (AlBeMet)	Aluminum (снижение стоимости)