

УДК 629.783 – 112:527

Некоторые свойства и результаты сравнительного анализа орбитальных группировок глобальных навигационных спутниковых систем

Н.Н.Балашова, А.И.Болкунов, Е.И.Игнатович, С.Г.Ревнивых, А.И.Сердюков, А.Ф.Щекутьев

Аннотация

Существующие системы описания РНП и ОГ ГНСС оперируют понятиями точность, доступность, целостность, непрерывность. Этих параметров явно недостаточно для проведения детального сравнительного анализа РНП И ОГ ГНСС.

Ключевые слова

радионавигационное поле; параметры радионавигационного поля; навигационные услуги; зоны ухудшения навигации.

Характеристики радионавигационных полей (РНП), формируемых глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС), зависят от достаточно большого числа факторов, среди которых немаловажную роль играют выбранные конфигурации орбитальных группировок (ОГ) этих систем.

Радионавигационное поле (РНП) – совокупность (суперпозиция) радиосигналов навигационных спутников, обладающая определенными информационными свойствами, которая, наряду с цифровой информацией, передаваемой в каждом из радиосигналов, позволяет в любой точке ограниченной пространственно-временной области (зоне действия ГНСС) решать навигационную задачу с использованием специальной приемно-обрабатывающей аппаратуры – навигационной аппаратуры потребителя (НАП).

Информационные свойства РНП в каждой точке области действия ГНСС описываются информационной матрицей

$$F_0 = \sum_{i=1}^{n_v} w_i w_i^T,$$

где w_i^T – вектор-строка ($w_i^T = \frac{1}{\sigma_i} \|n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}, 1\|$);

n_v – количество видимых спутников для заданного маскирующего угла γ_m ;

σ_i – вес i -го измерения (совпадает со значением $UERE(\gamma)$),

n_{xi}, n_{yi}, n_{zi} – компоненты единичного вектора в направлении на i -ый навигационный спутник в топоцентрической системе координат.

Под параметрами РНП понимаются диагональные элементы (комбинации этих элементов) матрицы, обратной к информационной матрице (геометрические факторы при $\sigma_i = 1$, среднеквадратическая ошибка местоопределения при $\sigma_i = UERE(\gamma)$, γ – угол места).

Установлены следующие свойства и особенности информационной матрицы (параметров РНП):

- Задача уточнения положения и времени потребителя по одномоментному набору измерений псевдодалейностей является вырожденной (ненаблюдаемой в силу снижения ранга информационной матрицы на единицу) тогда и только тогда, когда все используемые навигационные спутники лежат на поверхности (в пределах одной полости) кругового конуса с вершиной в точке положения потребителя.
- Для кинематически правильных ОГ информационная матрица обладает рядом свойств симметрии и периодичности (пространственно-временной повторяемостью).

Был проведен цикл исследований с целью анализа влияния параметров ОГ на характеристики навигационного поля – точности/доступности решения навигационной задачи.

В результате, были получены зависимости навигационной точности/доступности от количества спутников, количества орбитальных плоскостей, высоты и наклона орбит.

Оценка выполнения указанных выше требований была проведена для ОГ существующих и перспективных ГНСС. Был проведен сравнительный анализ точности, доступности и устойчивости ОГ различных ГНСС.

Существующие системы описания РНП и ОГ ГНСС оперируют понятиями точность, доступность, целостность, непрерывность. Этих параметров явно недостаточно для проведения сравнительного анализа РНП и ОГ ГНСС.

В минимум параметров, описывающих ОГ должны входить:

- пространственно-временная непрерывность и глобальность РНП;
- минимизация средних значений параметров РНП и локальных отклонений от этих средних на заданной пространственно-временной области;
- устойчивость конфигурации ОГ (затраты топлива на корректирующие маневры);
- устойчивость параметров РНП к уходам навигационных спутников из номинальных орбитальных позиций (к нарушениям геометрии ОГ), а также к нарушениям штатного функционирования спутников или выхода их из строя;
- приемлемые стратегии развертывания, поддержания и резервирования ОГ системы.

В качестве параметров, которые могут быть использованы для описания качества РНП и ОГ ГНСС используются:

- функции и параметры описывающие поведение РНП (в зависимости от характеристик ГНСС и ее системы управления);
- функции и параметры, описывающие качество навигационных услуг (в зависимости от характеристик ГНСС и дополнительных внесистемных параметров и факторов).

РНП и 2-3 типа стандартных навигационных услуг описываются однотипными функциями, определенными на некоторой заданной пространственно-временной области (местоположение и время). Для описания стандартных навигационных услуг предлагается использование элементов обратной матрицы, DOP для описания РНП и RMS для описания навигационных функций.

В зависимости от количества используемых DOP и RMS, РНП и навигационные услуги описываются 9-12 однотипными функциями.

Для проведения сравнительного анализа ОГ различных ГНСС были выбраны следующие параметры:

Номинальное состояние - $f_0(\varphi, \lambda, t)$;

Полная ОГ с наихудшими комбинациями уходов по широте - $f_{0,U}(\varphi, \lambda, t)$;

ОГ без одного спутника - $f_{1\max}(\varphi, \lambda, t)$ (берется наихудший случай для каждого момента времени);

ОГ без одного спутника с наихудшими комбинациями уходов по широте - $f_{1,U\max}(\varphi, \lambda, t)$;

ОГ без двух спутников - $f_{2\max}(\varphi, \lambda, t)$;

ОГ без двух спутников с наихудшими комбинациями уходов по широте - $f_{2,U\max}(\varphi, \lambda, t)$;

В качестве результатов проведенного сравнительного анализа можно отметить следующие:

- были получены зависимости между точностью/доступностью навигационных характеристик и количеством спутников, плоскостей, высотами орбит и наклоном;
- были обнаружены особенности пространственно-временного распределения навигационных характеристик при нормально функционирующей системе и системе, функционирующей с неисправностями при данной модели UERE (априорной);

Значения ошибок, доступности для ГЛОНАСС, GPS, Galileo показаны на Рис. 1-4.

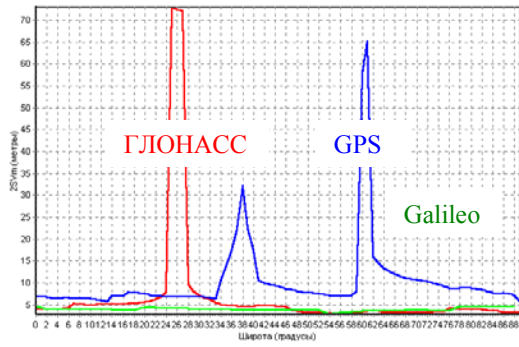


Рис. 1. Максимальная вертикальная ошибка ($2\sigma_{maxvert}$), $\gamma_m = 5^\circ, UERE3$

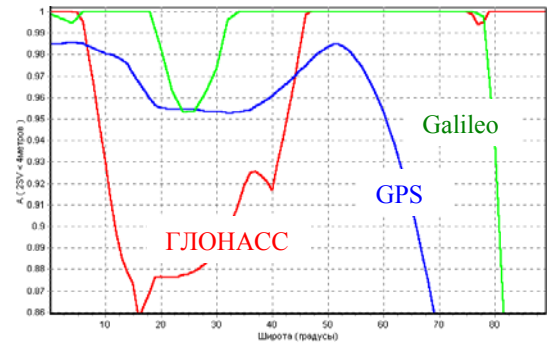


Рис 2. Доступность $A(2\sigma_{vert} \leq 4m)$ $\gamma_m = 5^\circ, UERE3$

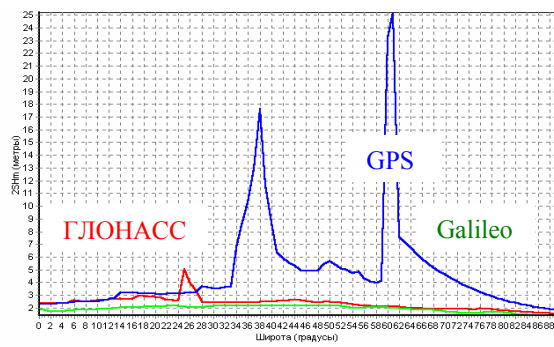


Рис. 3. Максимальная вертикальная ошибка ($2\sigma_{maxhor}$), $\gamma_m = 5^\circ, UERE3$

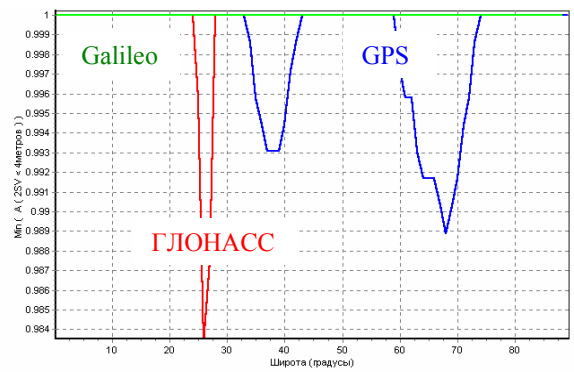


Рис. 4. Минимальная локальная доступность $A(2\sigma_{vert} \leq 10m)$

Для номинальных состояний ОГ ГЛОНАСС, Galileo и GPS, для состояний без одного и без двух спутников получены зависимости, представленные на Рис. 5-10.

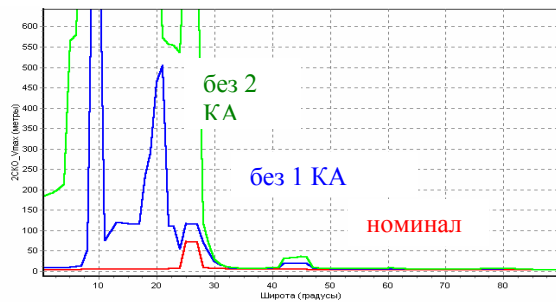


Рис. 5. Зависимость $2\sigma_{\text{втах}}$ от широты для ГЛОНАСС-24

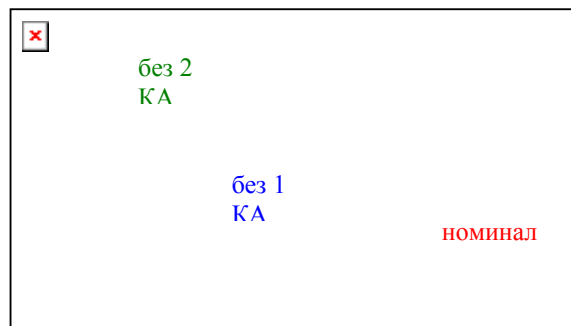


Рис. 6. Зависимость $2\sigma_{\text{втах}}$ от широты для GPS-27 SV, наклонение 54°

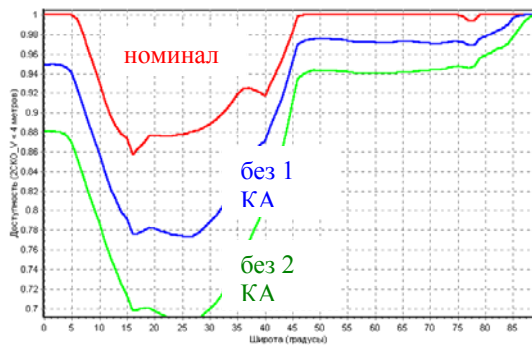


Рис. 7. Зависимость доступности $A(2\sigma_{\text{vert}} \leq 4\text{м})$ от широты для ГЛОНАСС-24

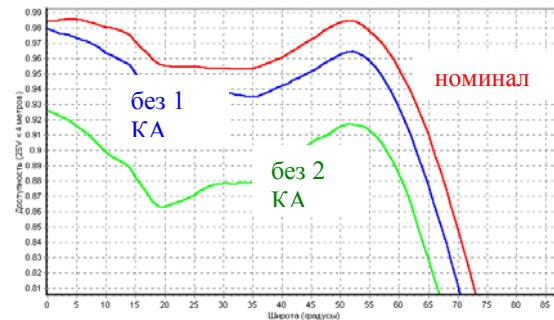


Рис. 8. Зависимость доступности $A(2\sigma_{\text{vert}} \leq 4\text{м})$ от широты для GPS-27 (наклонение 54°)

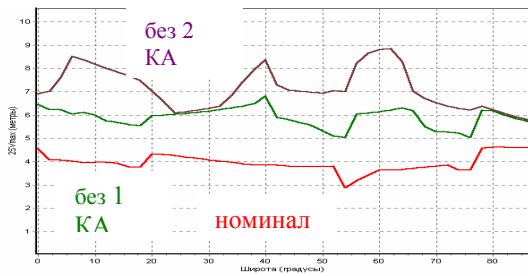


Рис. 9. Зависимость $2\sigma_{\max}$ от широты для ОГ GALILEO

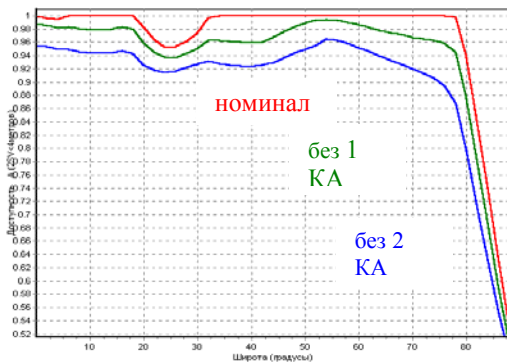


Рис. 10. Зависимость $A(2\sigma_{\text{vert}} \leq 4\text{м})$ от широты для ОГ GALILEO

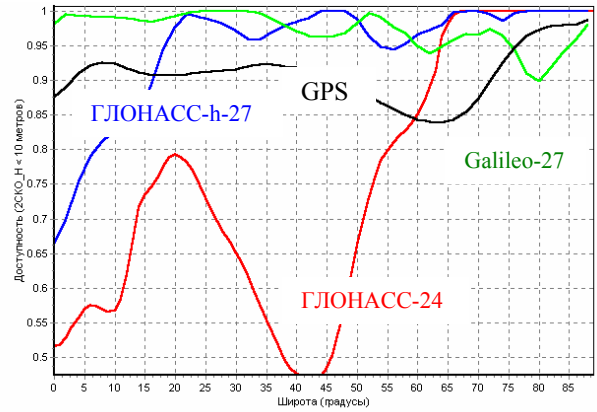


Рис. 11. Доступности для различных систем

На Рис. 11 представлены доступности $A(2\sigma_H \leq 10\text{м})$ для различных систем при ограничивающем угле места $\gamma_m = 25^\circ$ (UEREЗ_{ап}).

Зависимость эквивалентных ошибок измерений псевдодальности (UERE) от угла места γ представлена в Табл. 1.

Таблица 1

	Угол места (град)								
UERE	5	10	15	20	30	40	50	60	90
$\sigma_{\text{UERE1, м}}$	17.34	15.60	14.42	13.57	12.41	11.70	11.35	11.17	11.00
$\sigma_{\text{UERE2, м}}$	6.91	6.06	5.59	5.32	4.94	4.72	4.62	4.56	4.53
$\sigma_{\text{UERE3, м}}$	2.38	1.44	1.15	1.01	0.87	0.80	0.76	0.73	0.69

Варианты эквивалентной ошибки измерений псевдодальности представлены на Рис. 12.

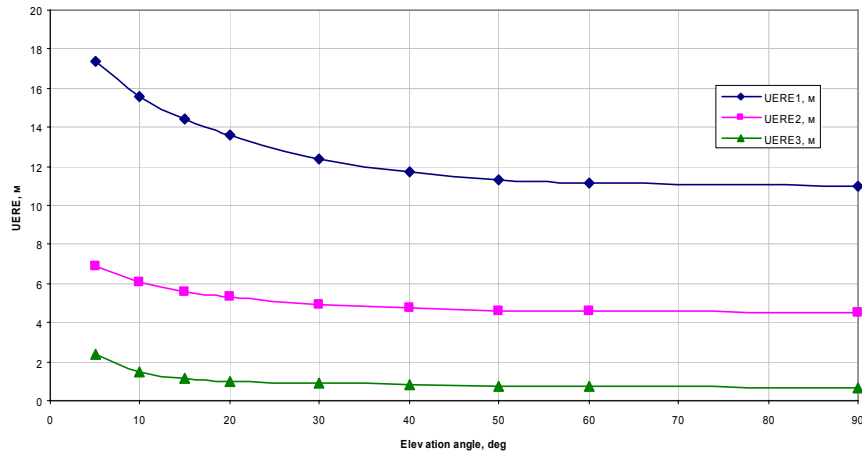


Рис. 12.

*Причины возникновения зон ухудшения навигации по измерениям псевдодальностей до
НКА ГЛОНАСС*

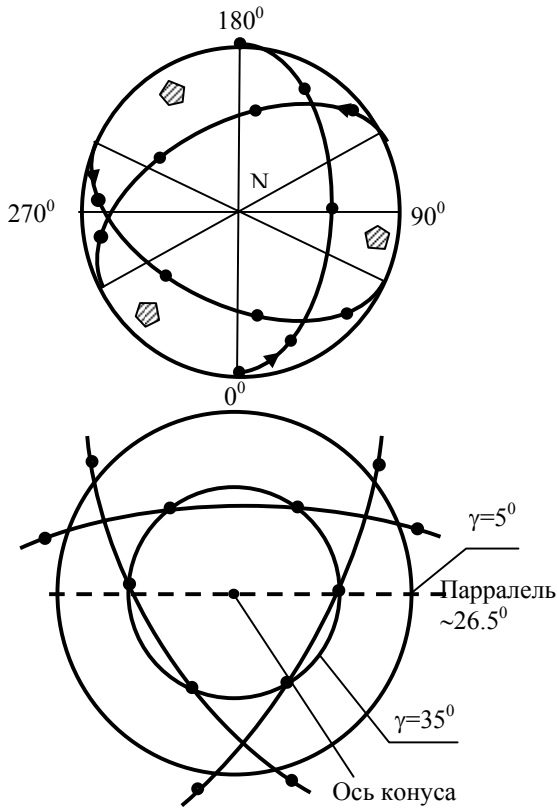


Рис. 13.

Причиной возникновения зон является совпадение двух факторов:

- периодически возникающие кратковременные (до 25 мин) конусоподобные конфигурации 6-ти видимых навигационных спутников;
- отсутствие видимости в ограниченных регионах (единицы градусов и единицы минут) хотя бы одного пригоризонтного «седьмого» спутника (Рис. 13).

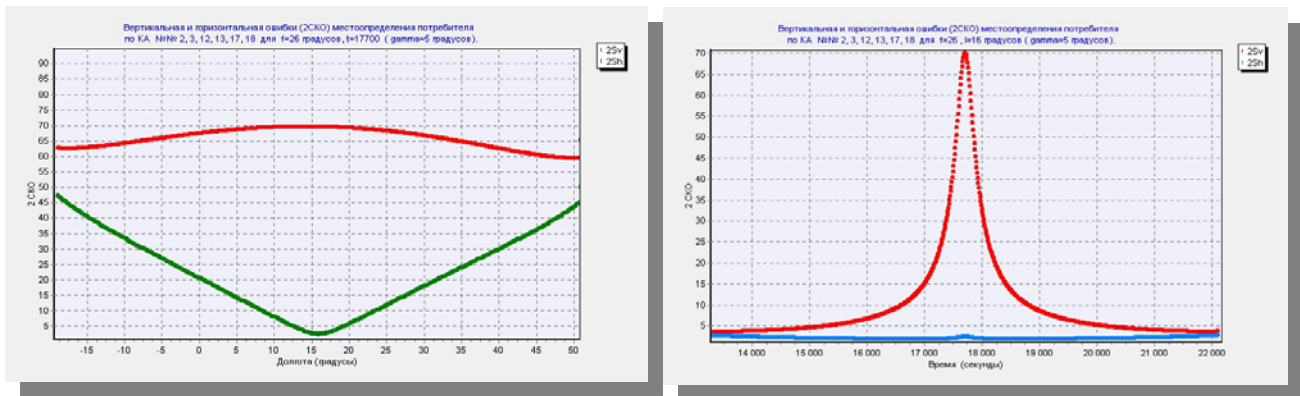


Рис. 14. Зависимости вертикальных и горизонтальных ошибок позиционирования от долготы и времени (для 6 КА)

На Рис. 15 представлена карта на момент вырождения.

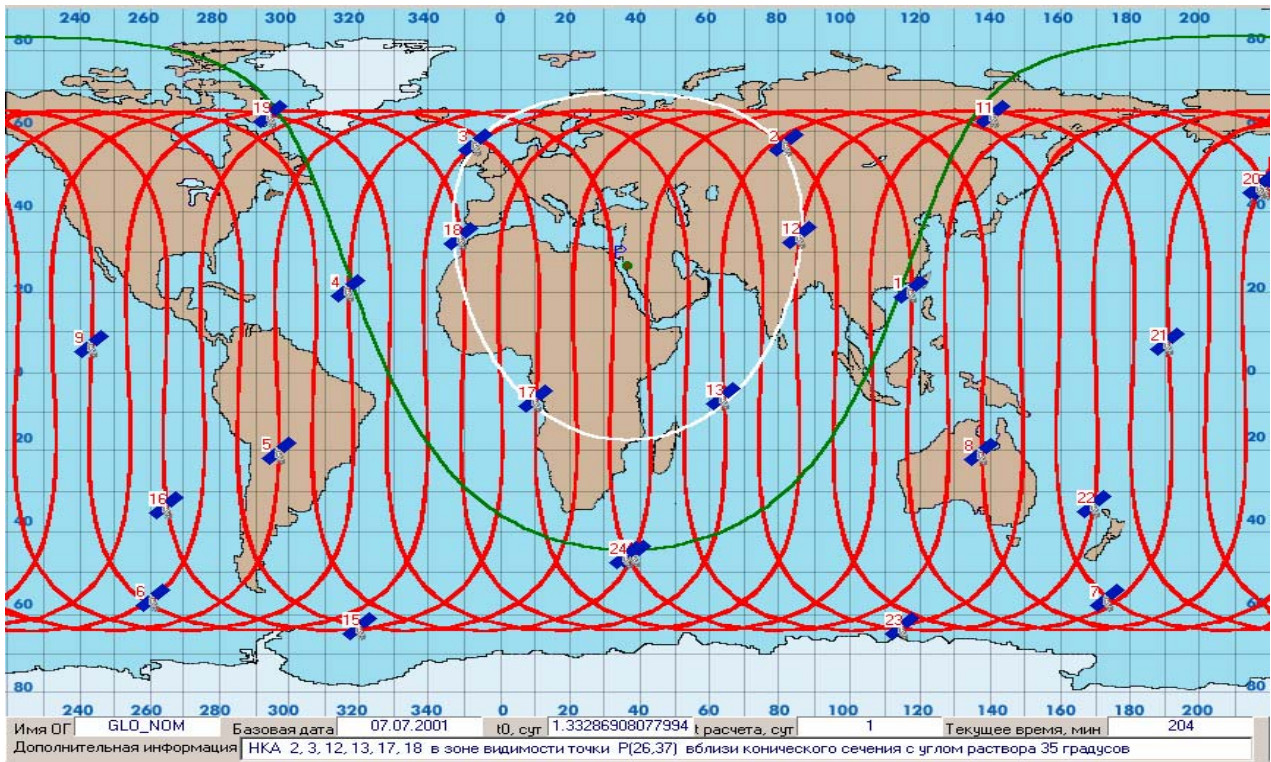


Рис. 15.

Зоны ухудшения навигации для номинального состояния ОГ ГЛОНАСС.

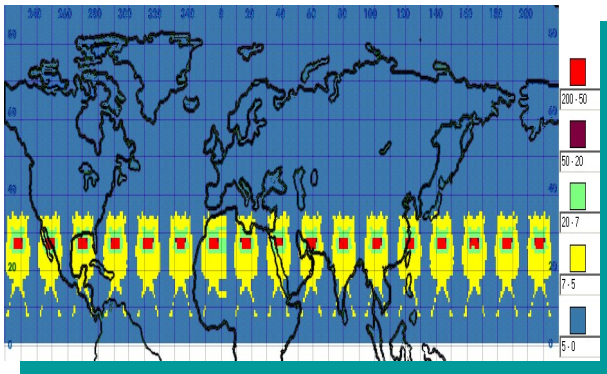


Рис. 16. Долготы зон ухудшения навигации в северном полушарии

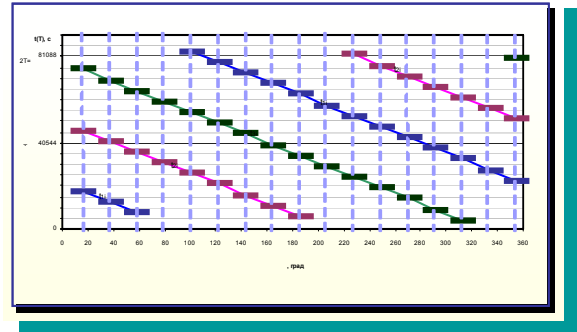


Рис. 17. Времена возникновения зон ухудшения навигации в северном полушарии

Пространственно-временное расположение зон ухудшения навигации показано на Рис. 16-17.

Общее количество зон:	48 (за период); 102 в сутки
• в северном полушарии $\varphi = +26.05$	24 (за период); 51 в сутки
• в южном полушарии $\varphi = -26.05$	24 (за период); 51 в сутки
Частота появления зон:	каждые 28 мин по 1 зоне в южном и северном полушарии.
Максимальные размеры зон:	$\approx 5^0$ по долготе, 3^0 по широте.
Продолжительность зон:	≈ 10 мин.

Все зоны в случае номинальной ОГ – идентичны.

Динамика развития зон ухудшения навигации в случае номинальной ОГ ГНСС ГЛОНАСС показана на Рис. 18.

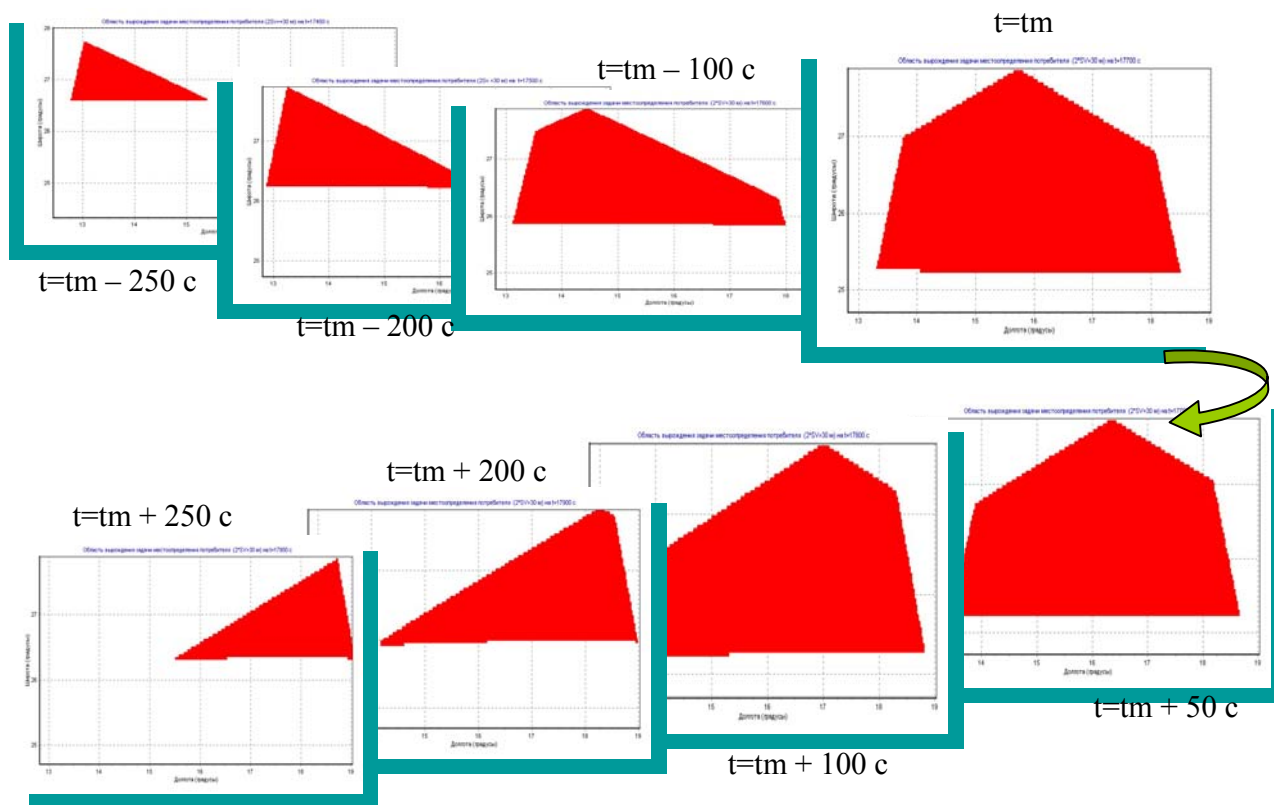


Рис. 18.

Зоны ухудшения навигации исчезают при:

- увеличении числа спутников до 27
- изменении орбитального наклона ($52 \leq i \leq 59$)
- увеличении высоты орбиты ($a \geq 28300$ км,
- увеличении периода ($T \geq 43250$ с)
- изменении межплоскостного фазирования ($\varphi: 0^0, +30^0, +15^0$ вместо of $0^0, +15^0, +30^0$ в настоящей ОГ)

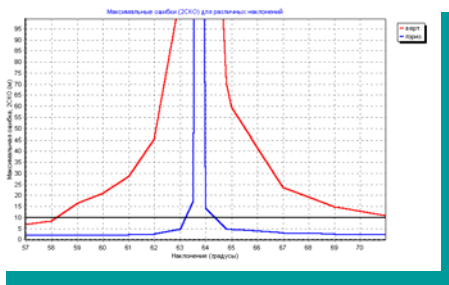


Рис. 19. Максимальные вертикальные и горизонтальные ошибки (от наклонения)

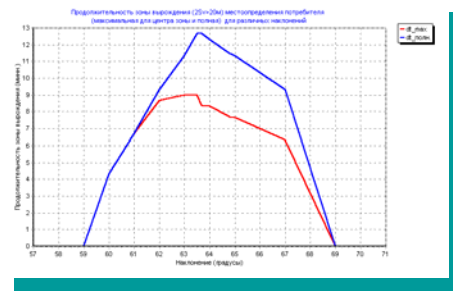
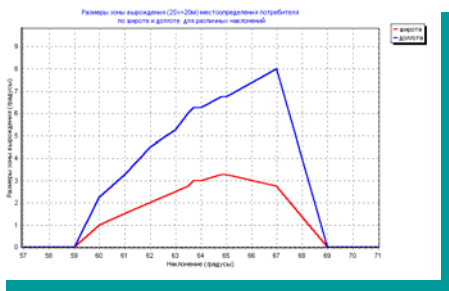


Рис. 20. Размеры и продолжительность зон ухудшения навигации (от наклонения)

Заключение

1. Зоны ухудшения навигации ($VDOP \approx 20 - 100$) в низких широтах $\varphi \approx \pm(15^0 - 30^0)$ присущи РНП ГЛОНАСС.
2. Расположение эти зон, их размер и длительность, также как и DOPы не являются случайными параметрами, а единственным образом определяются параметрами ОГ и условиями приема сигнала (минимальным углом места).
3. При номинальных значениях параметров ОГ и угле места $\gamma=5^0$ ежедневно возникают 102 зоны ухудшения навигации с центрами в ± 26.04 широты, с продолжительностью ≈ 10 мин и максимальными размерами 5^0 по долоте и 3^0 по широте, $VDOP \approx 50$, локальная доступность в центрах зон = 0,983.
4. Меньшие изменения орбитальных параметров приводят к изменению DOPов и размеров и длительности зон ухудшения навигации. Изменение положения спутников может убрать некоторые зоны ухудшения навигации, но при этом возможно (с большой вероятностью) появление таких зон на других широтах.

5. Выход из строя одного, двух, или более спутников, увеличение угла места до 70 градусов приводят к увеличению зоны ухудшения навигации ($\varphi_{\Delta} \approx \lambda_{\Delta} \approx 8^{\circ} - 10^{\circ}$, $\Delta t \approx 12 - 25$ мин), увеличению VDOP ($VDOP \approx 100$) и уменьшению локальной доступности до 0,95-0,975. Если $\gamma_m = 10^{\circ}$: $\varphi_{\Delta} \approx 15^{\circ}$, $\lambda_{\Delta} \approx 20^{\circ}$, $\Delta t \approx 30$ мин, $VDOP > 100$, то локальная доступность $\approx 0,93-0,94$.

Сведения об авторах

Балашова Наталья Николаевна, ИАЦ КВНО ЦНИИмаш, главный специалист.

Контакты: natalya.balashova@mcc.rsa.ru.

Болкунов Алексей Игоревич, ИАЦ КВНО ЦНИИмаш, инженер.

Контакты: alexey.bolkunov@mcc.rsa.ru.

Игнатович Евгений Иосифович, ИАЦ КВНО ЦНИИмаш, начальник отдела, к. т. н.

Контакты: evgeniy.ignatovich@mcc.rsa.ru.

Ревнивых Сергей Георгиевич, ИАЦ КВНО ЦНИИмаш, заместитель генерального директора – начальник ИАЦ КВНО, к. т. н.

Контакты: Sergey.revnivykh@mcc.rsa.ru, www.glonass-ianc.rsa.ru; + 7 495 586-90-00

Сердюков Александр Иванович, ИАЦ КВНО ЦНИИмаш, начальник отдела, к. т. н.

Контакты: alexander.serdyujiv@mcc.rsa.ru

Щекутьев Александр Федорович, ИАЦ КВНО ЦНИИмаш, главный специалист

Контакты: alexander.schekutiev@mcc.rsa.ru.