

УДК 629. 072

В. В. Конин, д. т. н.

СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В НЕУСТОЙЧИВОМ
РАДИОНАВИГАЦИОННОМ ПОЛЕНациональный авиационный университет, vkonin@mail.ru

Дается связь между углами видимости навигационных спутников и высотами объекта. Приводятся диаграммы видимости спутников и пространственно-временной геометрический фактор для GPS, ГЛОНАСС на высотах 3000 - 6000 км. Рассматривается метод оценки доступности в неустойчивом радионавигационном поле.

Ключевые слова: радионавигационное поле, геометрический фактор, доступность.

Введение.

Согласно техническим условиям спутниковые системы навигации GPS и ГЛОНАСС нормально функционируют вплоть до высот 3000 км и 2000 км соответственно. Это же, по-видимому, будет относиться и к вновь создаваемым системам GALILEO, COMPASS.

В связи с интенсивным освоением космоса представляет существенный интерес определение координат космических аппаратов методами спутниковой навигации на высотах более 3000 км. Это касается как спутников связи, так и аппаратов для утилизации космического мусора.

Определения координат в трехмерном пространстве выполняется по данным, полученным от четырех спутников с удовлетворительным геометрическим расположением относительно объекта, для которого вычисляется местоположение. Для прогнозирования доступности спутниковых навигационных систем широко используется геометрический фактор.

Состояние вопроса.

Под доступностью навигационных спутников понимается возможность приема электромагнитных сигналов (ЭМС) работоспособных спутников, находящихся в прямой видимости потребителя. Доступность минимум четырех спутников одной системы для определения координат в 3D – пространстве является первым необходимым условием, но недостаточным. Второе условие заключается в таком расположении спутников относительно потребителя, при котором геометрический фактор не превышает определенной величины, задаваемой погрешностями определения координат.

Прием ЭМС осуществляется в радионавигационном поле (РНП), которое формируется антенными системами спутников. До высот 3000 км (для GPS) и 2000 км (для ГЛОНАСС) РНП непрерывно. В этом поле обеспечивается видимость спутников в пределах $0^\circ - 90^\circ$ над плоскостью горизонта. За пределами указанных высот интенсивность РНП в определенных областях низкая и аппаратура потребителя не в состоянии непрерывно обрабатывать и выделять полезный сигнал навигационного спутника. Такое РНП будем называть неустойчивым. Зоны устойчивого РНП рассмотрены в [1, 2] с позиций приема сигналов навигационных спутников.

Концепция пространственно-временного геометрического фактора снижения точности (GDOP) применительно к авиации рассмотрена в [3] и в настоящее время широко используется в задачах определения координат, оценки целостности, прогнозирования доступности.

Отклонения от четырех координат (широта, долгота, высота, время) может быть определено из соотношения [4]

$$\begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \delta x_3 \\ \delta x_4 \end{bmatrix} = (G^T G)^{-1} G^T \begin{bmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta \rho_2 \\ \dots \\ \Delta \rho_n \end{bmatrix},$$

где δx - отклонения координат, G - матрица геометрии, G^T - транспонированная матрица геометрии, $\Delta \rho$ - отклонения измеренных псевдодальностей.

Пространственно-временной геометрический фактор определяется так

$$GDOP = \sqrt{\text{Tr}[(G^T G)^{-1}]}, \quad (1)$$

где $\text{Tr}[\dots]$ - есть след матрицы, т. е. сумма элементов главной диагонали.

Постановка задачі и цель работы.

Задача работы состоит в получении и исследовании условий, при которых в неустойчивом РНП возможно проводить навигационные определения. Целью статьи является развитие методов прогнозирования доступности навигационных спутников и расчета геометрического фактора при применении спутниковых системы навигации на высотах, превышающих 2000 – 3000 км.

Метод, методика и результаты исследования.

При определении геометрического фактора используется топоцентрическая система координат (ТСК) (рис. 1).

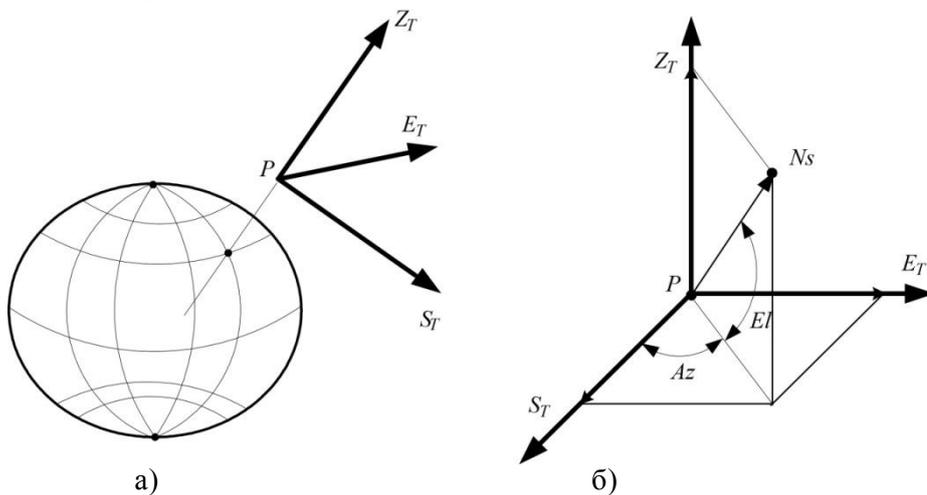


Рис.1. Топоцентрическая система координат: а) – расположение осей относительно Земли
б) – положение спутника N_s относительно осей

Центр ТСК точка P, расположенная на расстоянии h вдоль нормали к эллипсоиду, которым аппроксимируется Земля, оси Z_T , S_T , E_T направлены в зенит, на Юг и на Восток соответственно. Положение навигационного спутника N_s задается углами азимута (Az) и видимости или места (El). Прогнозирование доступности навигационных спутников в точке P и оценка геометрического фактора производится по данным альманаха.

Матрица геометрии представляется в виде [4]

$$[G] = \begin{bmatrix} \cos El_i \sin Az_i & \cos El_i \cos Az_i & \sin El_i & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cos El_k \sin Az_k & \cos El_k \cos Az_k & \sin El_k & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $i \in 1, \dots, n$ – количество видимых спутников первой системы (например, GPS),
 $k \in 1, \dots, m$ – количество видимых спутников второй системы (например, ГЛОНАСС).

Для того чтобы воспользоваться (2) необходимо определить углы видимости El и азимута Az . Углы видимости зависят от диаграмм направленности (ДН) антенн спутников, формирующих РНП.

Радионавигационное поле представляет собой наложение электромагнитных волн излучаемых всеми навигационными спутниками в пределах основного лепестка ДН антенны каждого спутника. На рис. 2, а изображено электромагнитное излучение антенны одного спутника. Электромагнитное поле сосредоточено внутри конической поверхности с углом при вершине, равным 2Θ (одно из сечений ДН). При угле 2φ освещается сегмент земной поверхности. В секторах $\pm(\Theta - \varphi)$ электромагнитное поле распространяется в пространстве до геостационарной орбиты и далее. Если чувствительность приемной аппаратуры позволяет, то РНП в этой области может быть использовано для навигационных определений.

На рис. 2 обозначено: 2φ – ширина диаграммы направленности спутника, при которой освещается поверхность земли; 2Θ – ширина диаграммы направленности спутника, при которой обеспечивается непрерывность навигационного поля на максимальной высоте над поверхностью земли; N_s – фазовый центр антенны спутника; O – центр масс Земли; ON_s – радиус орбиты спутника; OA – радиус земли + максимальная высота над поверхностью земли,

при которой спутники с объекта наблюдается в пределах от 0° до 90° ; OD - радиус Земли, равный 6400 км; (6367445 м); DC – максимальная высота, при которой сохраняется устойчивое РНП; A, P – положения объектов в навигационном поле, при которых спутник входит в зону видимости; El – угол видимости спутника.

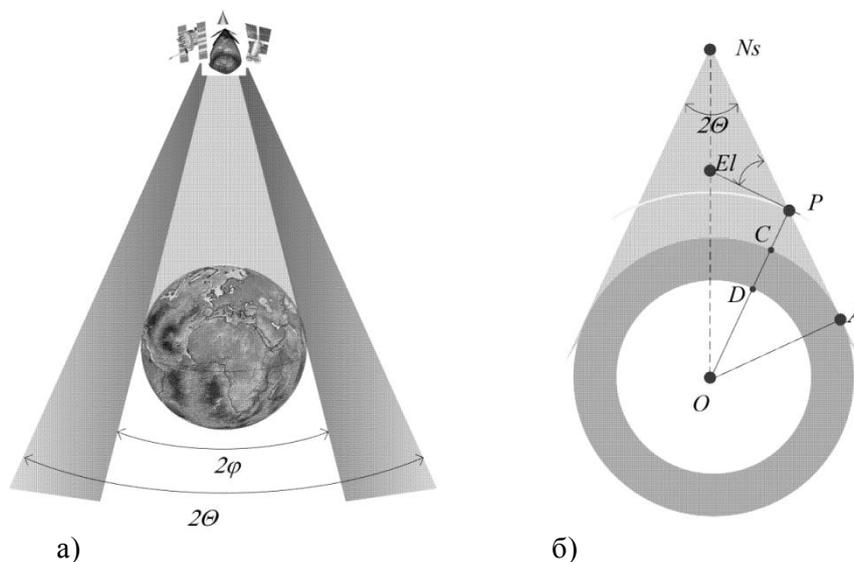


Рис. 2. Формирование радионавигационного поля: а) – зоны устойчивого приема сигнала, б) – определение угла видимости спутника

Рассмотрим, как изменяется угол видимости спутника El потребителем в зависимости от высоты над поверхностью земли. Минимальное значение угла видимости спутника El можно определить по формулам (3.1) [4] и рис. 2, б

$$El = \arccos\left(\frac{ONs}{OD+h} \sin \theta\right).$$

Для спутников GPS $ONs = 26560445$ м, $\theta = 21.3^\circ$; для ГЛОНАСС - $ONs = 25509715,5$ м, $\theta = 38^\circ$. Графики зависимости El от высоты изображены на рис. 3.

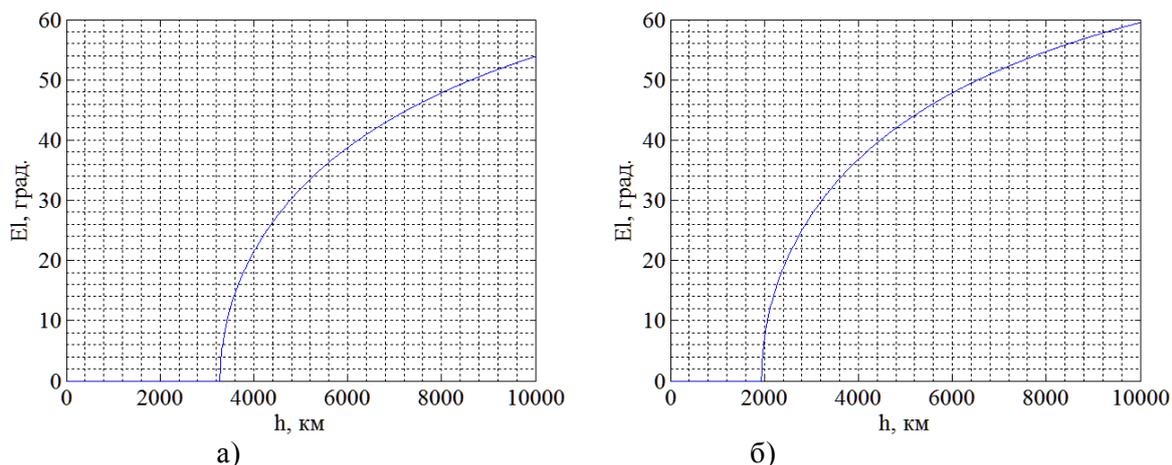


Рис. 3. Зависимости углов видимости спутников от высоты: а) – GPS, б) – ГЛОНАСС

Исследования проводились следующим образом. По данным альманаха GPS и ГЛОНАСС на временном интервале 24 часа вычислялись углы видимости и азимута спутников относительно заданного местоположения. По полученным данным рассчитывались диаграммы видимости спутников, а по формулам (1) и (2) рассчитывались GDOP. Результаты исследования приведены на рис. 4- рис. 6.

На рис. 4 изображены диаграммы доступности спутников GPS на временном интервале 24 часов (1440 отсчета по 60с - горизонтальная ось). По вертикальной оси отложены номера

спутников. Количество доступных спутников определяется как число пересечений любого отсчета (вертикальная линия) с соответствующими спутниками (горизонтальные линии). Из приведенных результатов моделирования следует, что по мере увеличения высоты ограничивается доступность (количество спутников уменьшается).

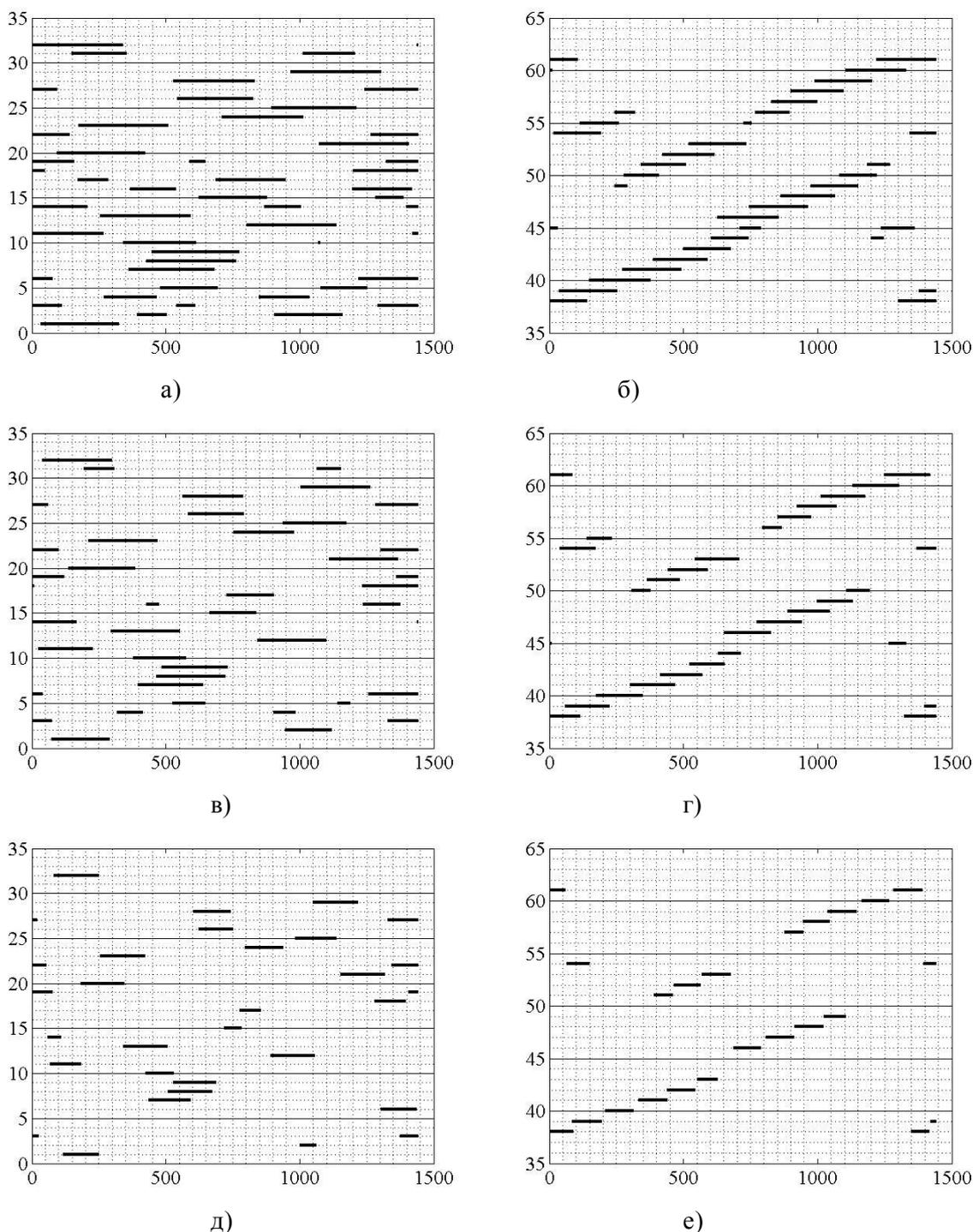


Рис. 4. Диаграммы доступности спутников: а) – GPS (высота 3000 км, угол видимости 10°), б) – ГЛОНАСС (высота 3000 км, угол видимости 27°), в) – GPS (высота 4000 км, угол видимости 24°), г) – ГЛОНАСС (высота 4000 км, угол видимости 37°), д) – GPS (высота 6000 км, угол видимости 40°), е) – ГЛОНАСС (высота 6000 км, угол видимости 48°)

Значения *GDOP* для GPS и ГЛОНАСС приведены на рис. 5. На высотах выше 3000 км ГЛОНАСС практически недоступна, а GPS имеет существенно ограниченную доступность.

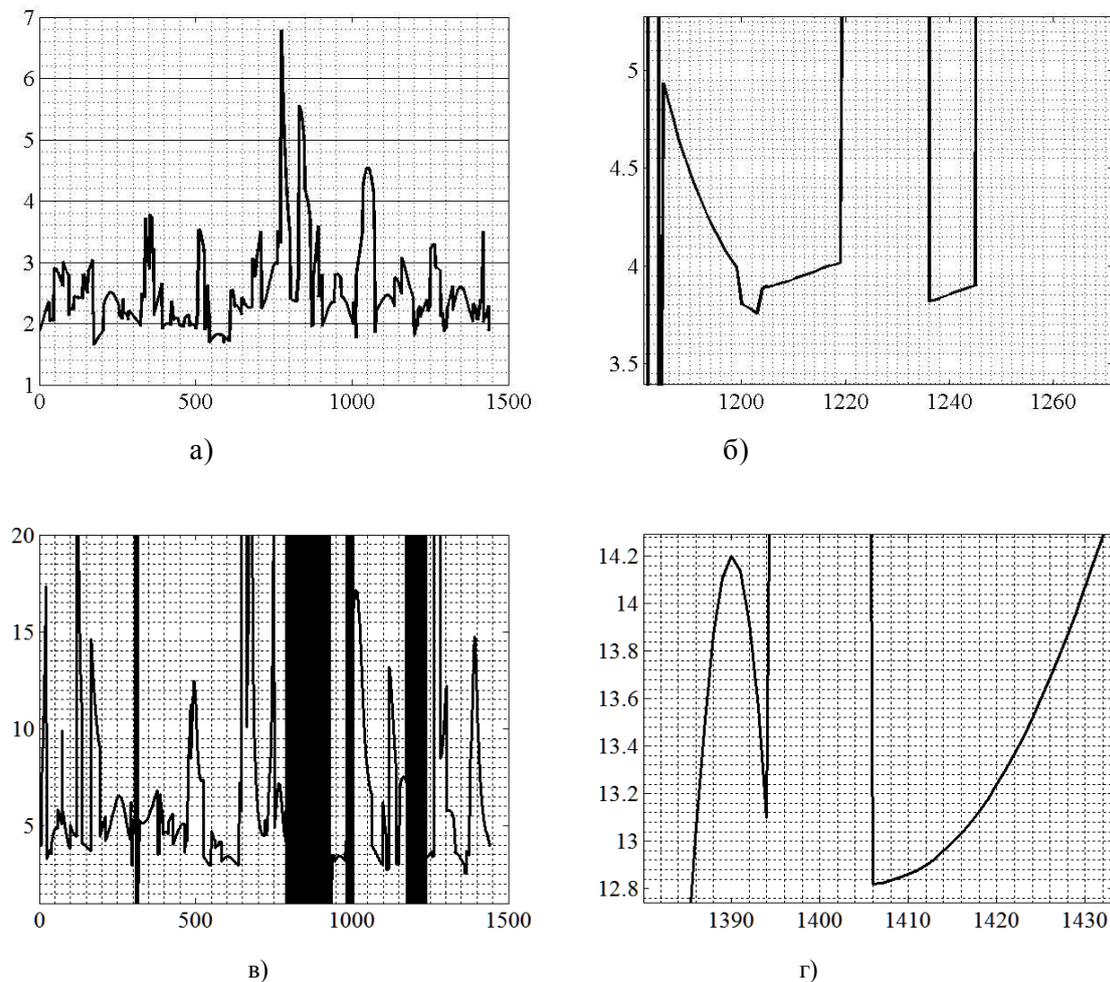


Рис. 5. Пространственно-временной геометрический фактор ($GDOP$): а) – GPS (высота 3000 км, угол видимости 10°), б) – ГЛОНАСС (высота 3000 км, угол видимости 27°), в) – GPS (высота 4000 км, угол видимости 24°), г) – GPS (высота 6000 км, угол видимости 40°)

Из сопоставления рис. 4 и рис. 5 следует. На высоте 3000 км GPS практически полностью доступна на 24 часовом временном интервале (рис. 4, а; рис. 5,а). Это соответствует заявленным техническим характеристикам системы. ГЛОНАСС на той высоте имеет существенно ограниченную доступность. Геометрический фактор из-за ограниченного количества видимых спутников имеет приемлемое значение на коротком временном интервале (рис. 4, б; рис. 5,б). На высоте 4000 км существенно уменьшается доступность GPS (рис. 4, в; рис. 5,в). ГЛОНАСС на этой и больших высотах недоступна. На высоте 6000 км GPS доступна на очень коротких временных интервалах (рис. 4, д; рис. 5,г).

Моделирование $GDOP$ при совместном применении GPS и ГЛОНАСС изображены на рис. 6 и рис. 7. На высоте 3000 км $GDOP$ значительно меньше, чем при раздельном применении систем (рис. 5, а; рис. 5,б; рис. 6, а). На высоте 4000 км система из конфигураций GPS и ГЛОНАСС практически доступна на всем суточном временном интервале (рис. 6, б). На высоте 6000 км объединенная система доступна на ограниченном временном интервале (рис. 6, в; рис. 6, г).

Заключение.

Проведенные исследования показали, что имеется принципиальная возможность

использовать существующие спутниковые системы для навигации космических аппаратов на высотах до 6000 км при одномоментном приеме навигационных сигналов от двух систем.

Отметим также, что проведенное выше исследование выполнялось для навигационных спутников, находящихся в верхней полусфере относительно плоскости горизонта потребителя. Поскольку на больших высотах можно наблюдать навигационные спутники и ниже плоскости горизонта, то имеется возможность повысить доступность за счет сигналов со спутников, находящихся с «обратной стороны Земли».

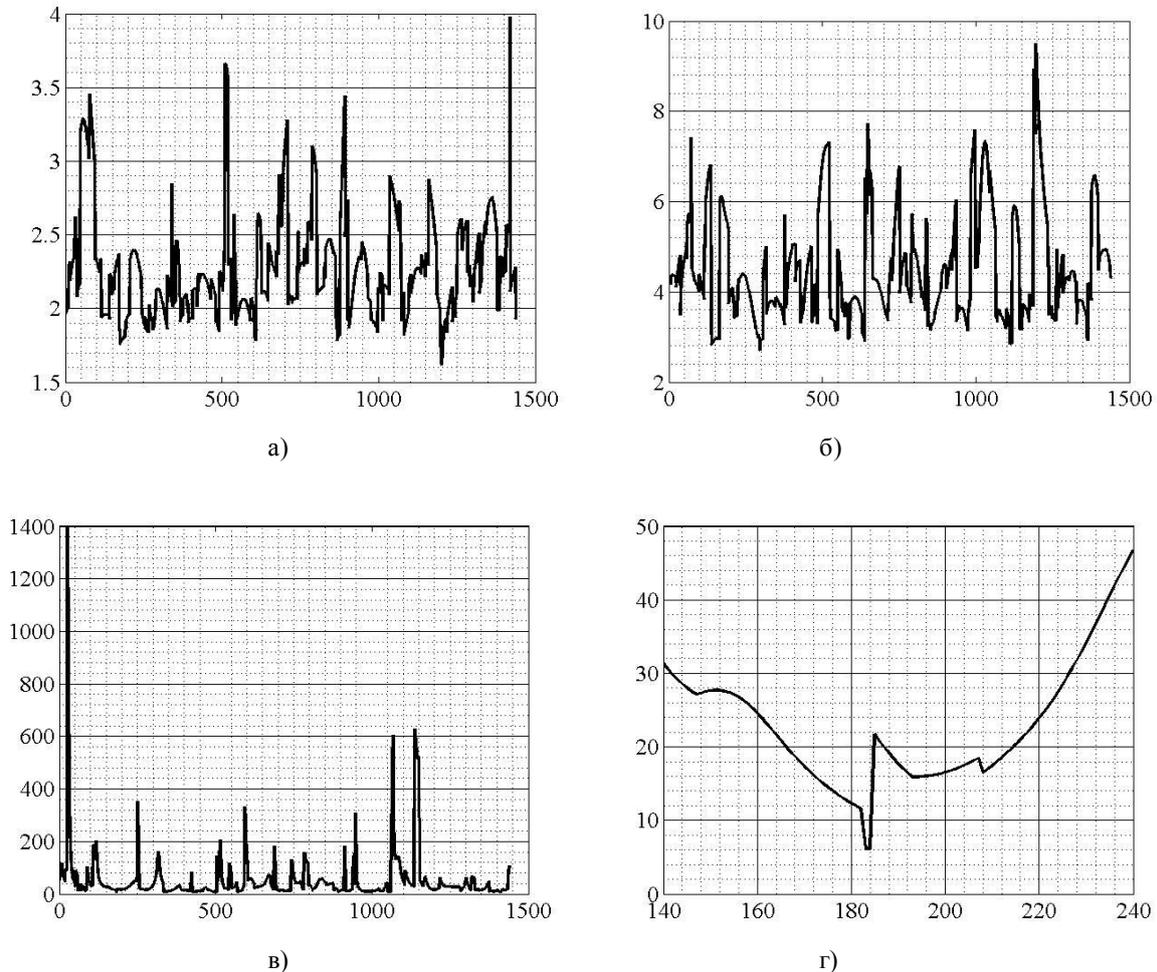


Рис. 6. Пространственно-временной геометрический фактор (GDOP) при объединенных GPS и ГЛОНАСС: а) – высота 3000 км, угол видимости 10° , б) – высота 4000 км, угол видимости 24° для GPS и 37° для ГЛОНАСС, в) – высота 6000 км, угол видимости 40° для GPS и 48° для ГЛОНАСС, г) – высота 6000 км, угол видимости 40° для GPS и 48° для ГЛОНАСС, диапазон временных отсчетов 140-240 минут

Список литературных источников

1. Moreau M. Ch. GPS receiver architecture for autonomous navigation in high earth orbits/thesis// Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado, 2001. – 222 p.
2. Avanzi A. Design and implementation of a novel multi-constellation FPGA-based dual frequency GNSS receiver for space applications// Università di Bologna, 2012. – 158 p.
3. Brogan W. L. Improvements and extensions of the geometrical dilution of precision (GDOP) concept for selectinc navigation measurements//Department of Electrical Engineering, University of Nebraska-Lincoln, 1981. – 69 p.
4. Конин В. В. Системы спутниковой радионавигации: монография/В. В. Конин, В. П. Харченко. – К. : ХОЛТЕХ, 2010. – 520 с.