

Геометрический фактор созвездий геостационарных спутников

Рассматривается модель для расчета геометрических факторов созвездий геостационарных спутников из состава SBAS. Приводятся результаты моделирования PDOP, HDOP, VDOP по данным альманаха для различных регионов. Показывается, что дополнение ограниченного количества навигационных спутников геостационарными приводит к снижению геометрических факторов.

В условиях ограниченной доступности GNSS из-за пересеченной местности, электромагнитных помех число навигационных спутников в прямой видимости может существенно уменьшиться, что приведет к невозможности определения координат. Геостационарные спутники в составе SBAS потенциально могут выполнять роль дополнительных дальномерных источников.

В работе на основании конкретных данных текущей конфигурации навигационных спутников исследуется доступность GNSS при ограниченном числе видимых спутников. Согласно альманаха конца 2014 года фирмы Trimble Inc на орбитах находились спутники GPS с номерами 1, 2, 4- 32; ГЛОНАСС 38 – 61; GALILEO 211, 212, 214, 218, 219, 220, 251, 252; COMPASS 264-277, включая GEO 264-268; геостационарные спутники GEO 120, 124-129, 133, 135, 136, 137, 138.

Оценка доступности проводится с применением следующих метода и модели. В топоцентрической системе координат составляется матрица геометрии навигационных спутников

$$[G] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & 1 \\ -\cos EL_i \cos Az_i & -\cos EL_i \sin Az_i & -\sin EL_i & 1 \\ \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где EL_i - угол видимости i -го навигационного спутника;

Az_i - азимут i -го навигационного спутника; $i \in 1, \dots, N$;

N - количество навигационных спутников, используемых при расчетах.

Углы видимости и азимута в (1) вычисляются через кеплеровские элементы орбит спутников. Альманах спутников фирмы Trimble Inc преобразовывается в стандартный формат YUMA.

Используя (1) вычисляются диагональные элементы матрицы

$$[G^T G]^{-1} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & gg_{ii} & \dots \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где T - признак транспонированной матрицы;

$i \in 1, \dots, 4$.

Через элементы (2) рассчитываются геометрические факторы: пространственно-временной ($GDOP$), пространственный ($PDOP$), горизонтальный ($HDOP$), вертикальный ($VDOP$), временной ($TDOP$) соответственно

$$\begin{aligned}
 GDOP &= \sqrt{gg_{11} + gg_{22} + gg_{33} + gg_{44}}, \\
 PDOP &= \sqrt{gg_{11} + gg_{22} + gg_{33}}, \\
 HDOP &= \sqrt{gg_{11} + gg_{22}}, \\
 VDOP &= \sqrt{gg_{33}}, \\
 TDOP &= \sqrt{gg_{44}}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Применение геометрических факторов при оценке качества навигационных характеристик широко применяется и позволяет, в частности, перейти от ошибок измерения псевдодалности к оценке точности определения координат и времени в пространстве, горизонтальной и вертикальной плоскостях [1]. Так точность (accuracy) определяется по выражению

$$Accuracy = UERE \cdot DOP, \tag{4}$$

где $UERE$ (User Equivalent Range Error) – среднеквадратическая ошибка измерения псевдодалности пользователем.

Выражение (4) через формулы (3) позволяет получить среднеквадратические навигационные ошибки координат в пространстве ($UPNE$), горизонтальной ($UHNE$) и вертикальной $UVNE$ плоскостях

$$UPNE = UERE \cdot PDOP, \tag{5}$$

$$UHNE = UERE \cdot HDOP, \tag{6}$$

$$UVNE = UERE \cdot VDOP. \tag{7}$$

Если известны среднеквадратические ошибки измерений скорости изменения псевдодалности ($UERRE$), то ошибки измерения скоростей вычисляются по выражениям аналогичным (5), (6), (7).

Геометрические факторы для типичных условий: потребитель находится на поверхности земли, угол маски 5° , затенения спутников отсутствуют, система комбинированная (GPS + ГЛОНАСС) лежат в пределах 1.5 – 2.0 на 24-часовом временном интервале. Для навигации величина GDOP меньше 6 считается приемлемой. Если навигационных спутников меньше четырех, то определение координат в трехмерном пространстве общепринятыми методами не представляется возможным.

На рис. 1 – 4 приведены результаты расчета $PDOP$, $HDOP$, $VDOP$ для Киева, Лондона, Пекина и Бостона. Центр круговых диаграмм соответствует координатам городов, углы видимости спутников от 0° (уровень горизонта) до 90° (зенит), номера спутников в малых окружностях. Геометрические факторы

рассчитаны на 24- часовом интервале с дискретом 600 секунд (144 отсчета по горизонтальной оси).

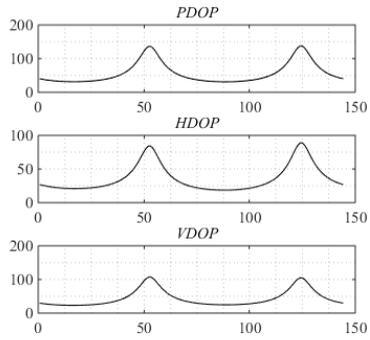
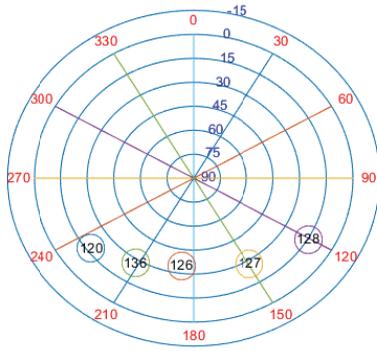


Рис.1. Конфигурация спутников и геометрический фактор (Киев)

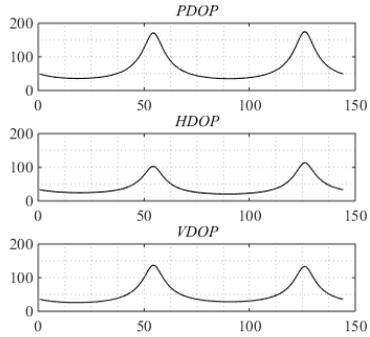
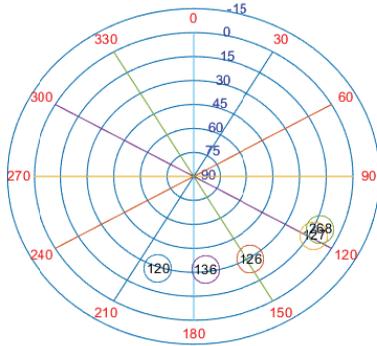


Рис.2. Конфигурация спутников и геометрический фактор (Лондон)

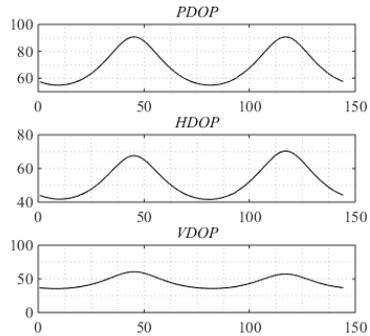
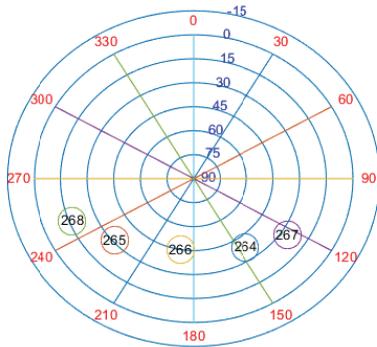


Рис.3. Конфигурация спутников и геометрический фактор (Пекин)

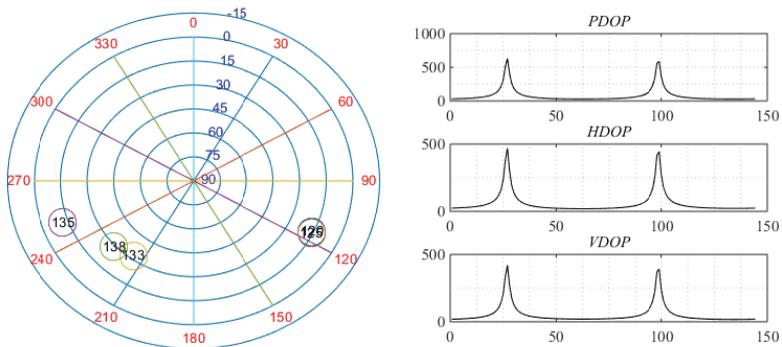


Рис.4. Конфигурация спутников и геометрический фактор (Бостон)

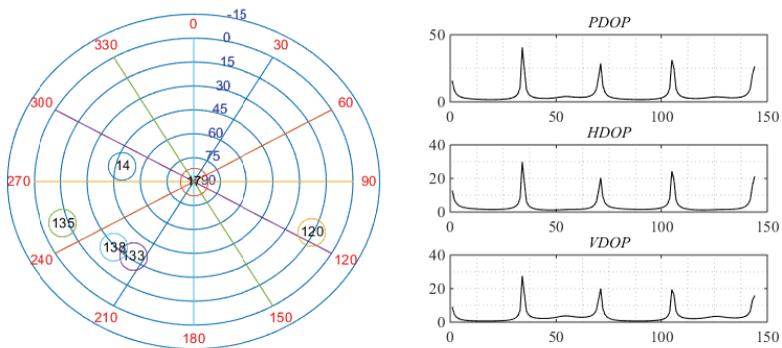


Рис.5. Конфигурация спутников (4-GEO, 2- GPS) и геометрический фактор (Бостон)

Моделирование геометрических факторов созвездий геостационарных спутников показало следующее. Пространственный геометрический фактор $PDOP$, как правило, существенно больше 10 и может достигать максимального значения несколько десятков более.

На рис. 5 показаны типичные результаты, которые могут быть получены при дополнении ограниченного количества навигационных спутников геостационарными. В данном сценарии созвездие из двух спутников GPS (№№ 14 и 17) дополнено геостационарными спутниками. В итоге геометрические факторы на значительных временных интервалах существенно меньше 6, что позволяет заключить о возможности проведения навигационных определений.

Список литературы

1. GLOBAL POSITIONING SYSTEM. PRECISE POSITIONING SERVICE. PERFORMANCE STANDARD (GPS PPS PS), 2007. – 156 p.