

УДК 532.5

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОГРАНИЧЕНИЯ УГЛА ВОЗВЫШЕНИЯ НКА НА ТОЧНОСТЬ И ДОСТУПНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ВС ПО СИГНАЛАМ ГЛОНАСС НА КОНЕЧНОМ УЧАСТКЕ ЗАХОДА НА ПОСАДКУ

Г.В. КРИНИЦКИЙ, А.В. ЗИМИНА, А.С. ЗИМИН

Определяется зависимость точности и доступности определения местоположения ВС по сигналам системы ГЛОНАСС на конечном участке захода на посадку от маски угла возвышения НКА. Оценка точности и доступности местоположения ВС проводилась для углов возвышения НКА в заданном диапазоне для различных положений ВС.

Ключевые слова: спутниковая навигация, маска угла возвышения, геометрический фактор, геометрическая дальность, точность определения местоположения ВС.

ВВЕДЕНИЕ

На точностные характеристики навигационной аппаратуры потребителей влияет как геометрия видимого спутникового созвездия, так и погрешности измерений параметров сигнала каждого навигационного космического аппарата в зависимости от условий распространения в среде. С целью исследования совокупного влияния вышеупомянутых факторов проведен расчет прогнозируемых точностных характеристик навигационной аппаратуры воздушного судна при заходе на посадку в различных регионах с учетом моделей погрешностей измерений навигационных параметров, представленных в международных стандартах ИКАО.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В представленной работе проводилась оценка точности и доступности определения положения воздушного судна (ВС) в точке принятия решения на расстоянии 400 м от локально контрольно-корректирующей станции (ЛККС). Расчет точности и доступности местоположения ВС проводился для углов возвышения θ_v навигационных космических аппаратов (НКА), заданных в диапазоне от 5° до 29° с шагом $0,5^\circ$ для 8 различных положений ВС (см. табл. 1). Первоначально рассчитывался вектор состояния НКА по данным альманаха системы ГЛОНАСС на сутки с шагом 1 минута. Для каждого НКА определялся угол возвышения в каждый момент времени. Способ расчета вектора состояния НКА по данным альманаха системы ГЛОНАСС подробно описан в [1]. После отбора НКА по углу возвышения вычислялся геометрический фактор изменения точности определения положения объекта.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Исходя из того, что при решении системы уравнений положения по одной системе ГНСС матрица Якоби вектор-функции $D(X)$, где $X = \{x, y, z, \Delta R\}^T$ вектор решения, имеет вид:

$$D(X) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} & \frac{df_1}{d\Delta R} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x} & \frac{\partial f_n}{\partial y} & \frac{\partial f_n}{\partial z} & \frac{df_n}{d\Delta R} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Строки матрицы (1) представлялись в виде:

$$\left(\begin{array}{l} \frac{\partial f_j}{\partial x} = -\frac{(x_j-x)}{\sqrt{(x_j-x)^2+(y_j-y)^2+(z_j-z)^2}} \\ \frac{\partial f_j}{\partial y} = -\frac{(y_j-y)}{\sqrt{(x_j-x)^2+(y_j-y)^2+(z_j-z)^2}} \\ \frac{\partial f_j}{\partial z} = -\frac{(z_j-z)}{\sqrt{(x_j-x)^2+(y_j-y)^2+(z_j-z)^2}} \\ \frac{df_j}{d\Delta R} = 1 \end{array} \right). \quad (2)$$

В точке решения системы уравнений положения вычислялась матрица ковариации (3):

$$\left[[D(\dot{X}^k)]^T \cdot D(\dot{X}^k) \right]^{-1} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Геометрический фактор изменения точности определения местоположения определялся выражением:

$$GDOP_i = \sqrt{d_{11} + d_{22} + d_{33}}. \quad (4)$$

Пороговое значение геометрического фактора принималось равным 4. Если вычисленный геометрический фактор определялся больше порогового значения, тогда считалось, что навигации в этой точке нет и соответственно этот момент времени в расчетах не учитывался. Далее задавались координаты ВС (см. табл. 1) и решалась задача по определению геометрических дальностей на НКА.

Таблица 1

Места положения ВС

№ п/п	Места расположения ВС	Широта	Долгота	Высота, м
1	Владивосток	43	132	150
2	Сочи	43	39	150
3	Бухта Тикси	71	128	150
4	Красноярск	56	92	150
5	Москва	55	37	150
6	Новая Земля	76	60	150
7	Санкт-Петербург	59	30	150
8	Магадан	59	150	150

Геометрическая дальность рассчитывалась по формуле:

$$D_j = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}, \quad (5)$$

где $X = \{x_i, y_i, z_i\}^T$ – рассчитанный вектор состояния НКА; $X = \{x, y, z, \Delta R\}^T$ – заданный вектор состояния ВС.

Геометрическая дальность до НКА D_j рассчитывалась итерационным методом, из-за отсутствия априорной информации о времени распространения сигнала, от конкретного НКА до ВС. На первом шаге итерационного процесса $t^1 = t_b - t_z$, а $D_j(X^0(t^0)) = 0$, соответственно для последующих шагов время распространения сигнала рассчитывалось по формуле:

$$t^{k+1} = t^k - \frac{D_j(X^k(t^k)) - D_j(X^{k-1}(t^{k-1}))}{c}, \quad (6)$$

где $X^k(t^k) = \{x, y, z\}$ -координаты i -го НКА, вычисленные на момент времени t^k .

Решение по итерационной схеме оканчивается по достижению модуля вектора невязки значения ε , то есть при условии $|D_j^{k+1} - D_j^k| \leq \varepsilon$, где $\varepsilon = 10^{-6}$. С целью упрощения расчета не учитывалось время распространения сигнала от НКА до навигационной аппаратурой потребителя (НАП), так как за это время угол возвышения НКА меняется несущественно.

Согласно алгоритму, представленному в [2], рассчитывалась дисперсия измерения геометрической дальности НАП по формуле:

$$\sigma_{D,i}^2 = \sigma_{D_возд,i}^2 + \sigma_{D_земн,i}^2 + \sigma_{трон,i}^2 + \sigma_{ион,i}^2 \quad (7)$$

Дисперсия погрешностей $\sigma_{D_земн,i}^2$ геометрической дальности за счет наземной части, зависит от угла возвышения НКА и рассчитывалась по формуле:

$$\sigma_{D_земн,i}^2 = \frac{(a_0 + a_1 e^{-\theta_i/\theta_0})^2}{M_{RS}} + a_2^2, \quad (8)$$

где значения параметров a_0 , a_1 , a_2 для аппаратуры класса А и В ГЛОНАСС определены в табл. 2. $M_{RS} = 4$ - число опорных приемников; θ_i - угол возвышения i -го НКА. В материалах [2] расчеты приведены для аппаратуры класса В.

Таблица 2

Точностные характеристики наземной аппаратуры ГЛОНАСС

Х-ка Класс	θ_i , град	a_0 , м	a_1 , м	a_2 , м	θ_0 , град
А	≥ 5	1,58	5,18	0,078	14,3
В	≥ 5	0,3	2,12	0,078	15,5

Различия в тропосферных условиях приема сигналов на ЛККС и ВС учитываются с помощью $\sigma_{трон}$, определенной соотношением:

$$\sigma_{трон} = \frac{\sigma_N h_0 * 10^{-6}}{\sqrt{0,002 + \sin^2(\theta)}} (1 - e^{-\Delta h/h_0}) \quad (9)$$

где $\sigma_N = 100$ - неопределенность рефракции; Δh - превышение ВС над ЛККС; θ - угол места НКА; h_0 - высота по тропосферной школе; $h_0 = 1200$ м, согласно [2].

Различия в ионосферных условиях приема сигналов на ЛККС и ВС учитываются с помощью $\sigma_{\text{ион}}$ вычисляемой с помощью выражения:

$$\sigma_{\text{ион}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_e \cdot \cos\theta}{R_e + h_i}\right)^2}} \cdot \sigma_{\text{ионо_град}} \cdot (x_{\text{возд}} + 2 \cdot \tau \cdot v_{\text{возд}}), \quad (10)$$

где θ – угол возвышения; R_e – радиус Земли; $h_i = 350$ км – высота слоя максимальной плотности электронов ионосферы; $\sigma_{\text{ионо_град}} = 8$ мм/км – среднеквадратическое отклонение нормального распределения, соответствующее остаточной ионосферной неопределенности, обусловленной пространственной декорреляцией (по данным [2] изменяется в диапазоне от 0,5 до 8 мм/км); $x_{\text{возд}}$ – расстояние (наклонная дальность) в метрах между текущим местоположением ВС и опорной точкой ЛККС; $\tau = 100$ с – постоянная времени; $v_{\text{возд}} = 210$ км/ч – горизонтальная скорость захода на посадку воздушного судна;

СКО погрешностей определения дальностей за счет бортового приемника ВС вычислялось из соотношения:

$$\sigma_{D_{\text{возд},i}}^2 = (a_0 + a_1 e^{-\theta_i/\theta_0})^2 + (0,13 + 0,53 e^{-\theta_i/10})^2, \quad (11)$$

где второе слагаемое описывает принятую модель многолучевости, а значения параметров для аппаратуры класса А и В ГЛОНАСС определены в табл. 3.

Таблица 3

Точностные характеристики бортовой аппаратуры ГЛОНАСС

Класс \ X-ка	θ_i , град	a_0 , м	a_1 , м	θ_0 , град
А	≥ 5	0,39	0,9	5,7
В	≥ 5	0,105	0,25	5,5

Дальности с учетом погрешности рассчитывались с помощью соотношения:

$$R_j = D_j + \sigma_{D,i}^2 \cdot \epsilon, \quad (12)$$

где ϵ — стандартная нормальная случайная величина.

Далее решалась задача по определению вектора состояния ВС по полученным псевдодальностям методом наименьших квадратов, описание более подробно в [3]. Рассчитывалась точность определения места ВС по боку $\sigma_{\text{ВЛ}}$ и по высоте $\sigma_{\text{Н}}$ по следующему алгоритму.

1). Координаты положения ВС $X_{\text{шум}}^i$, полученные на основе дальностей с учтенными дисперсиями вычисления геометрических дальностей и первоначально заданные координаты ВС, переводились в геодезическую систему отсчета согласно алгоритму, описанному в [4].

2). Рассчитывался вектор разницы координат вектора ВС $X_{\text{шум}}^i$ и координат первоначально заданного вектора ВС $X_{\text{г}}$ в геодезических координатах:

$$\delta_{X_{\text{м}}}^i = X_{\text{г}} - X_{\text{г_шум}}^i. \quad (13)$$

3). Компоненты вектора δ_{χ}^i x и y координатам пересчитывались в метры в соответствии с соотношением:

$$\delta_{\chi}^i = \frac{\delta^i \cdot l_3}{2\pi}, \tag{14}$$

где $l_3 = 40075000$ м – длина окружности Земли по экватору.

СКО погрешности определения места ВС по высоте и по боку рассчитывались соответственно:

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\delta_{z_m}^i)^2}, \tag{15}$$

$$\sigma_{BL} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n ((\delta_{x_m}^i)^2 + (\delta_{y_m}^i)^2)}. \tag{16}$$

На рис. 1 – 8 представлены графики полученных зависимостей точности расчетов положения ВС от угла возвышения НКА.

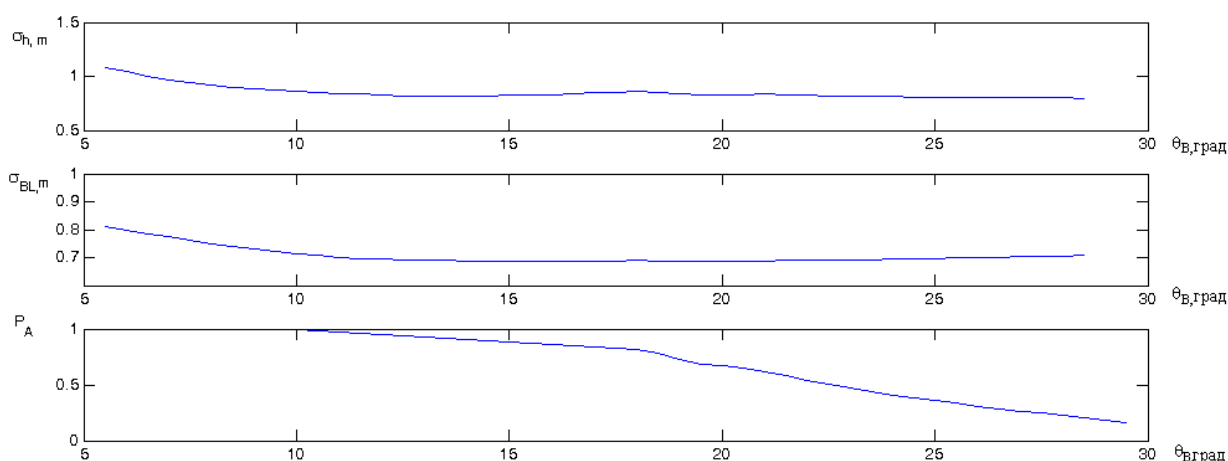


Рис. 1. Зависимость точности расчетов положения ВС от угла возвышения НКА, г. Владивосток (43 с.ш. 132 в.д.)

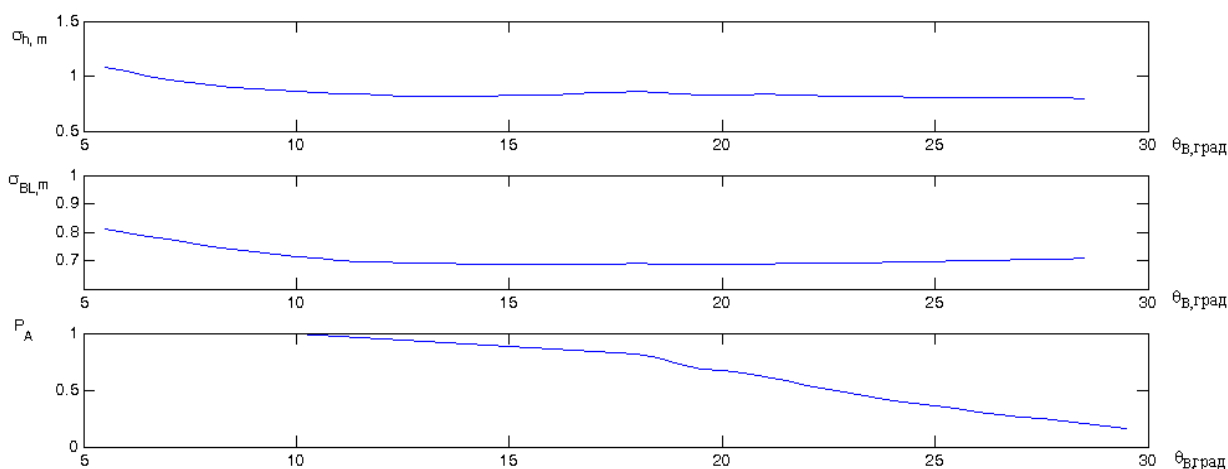


Рис. 2. Зависимость точности расчетов положения ВС от угла возвышения НКА, г. Сочи (43 с.ш. 39 в.д.)

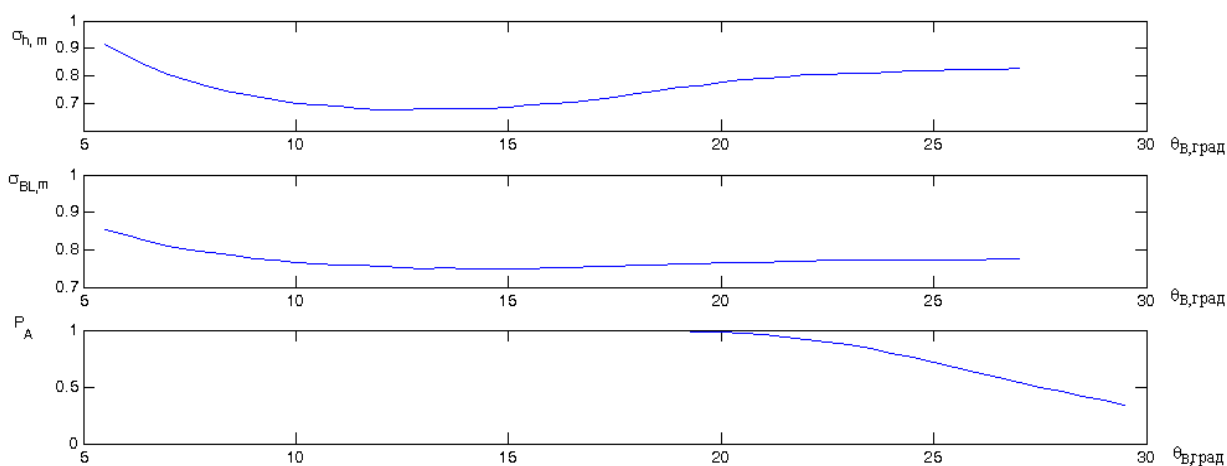


Рис. 3. Зависимость точности расчетов положения ВС от угла возвышения НКА, Бухта Тикси (71 с.ш. 128 в.д.)

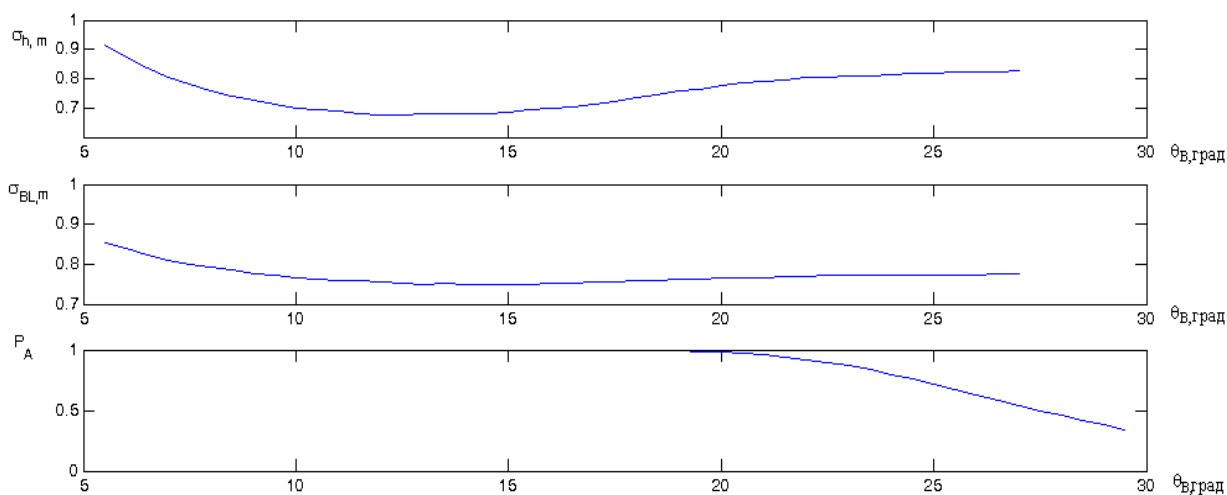


Рис. 4. Зависимость точности расчетов положения объекта от угла возвышения НКА, г. Красноярск (56 с.ш. 92 в.д.)

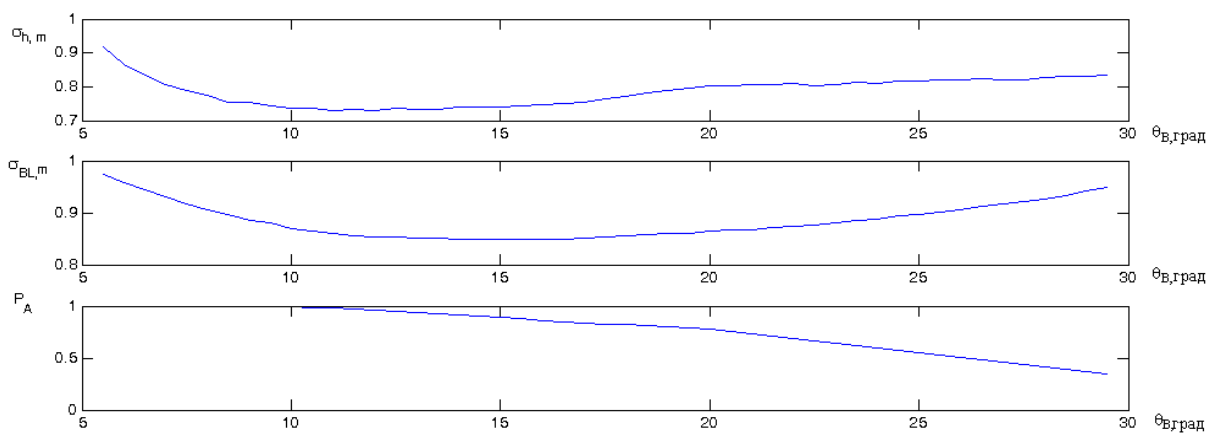


Рис. 5. Зависимость точности расчетов положения объекта от угла возвышения НКА, г. Москва (55 с.ш. 37 в.д.)

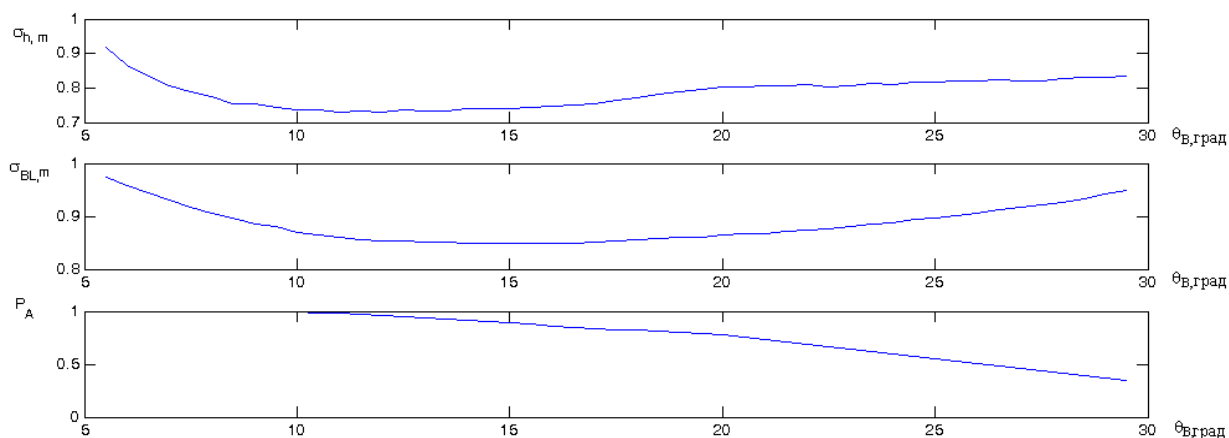


Рис. 6. Зависимость точности расчетов положения объекта от угла возвышения НКА, г. Новая Земля (76 с.ш. 60 в.д.)

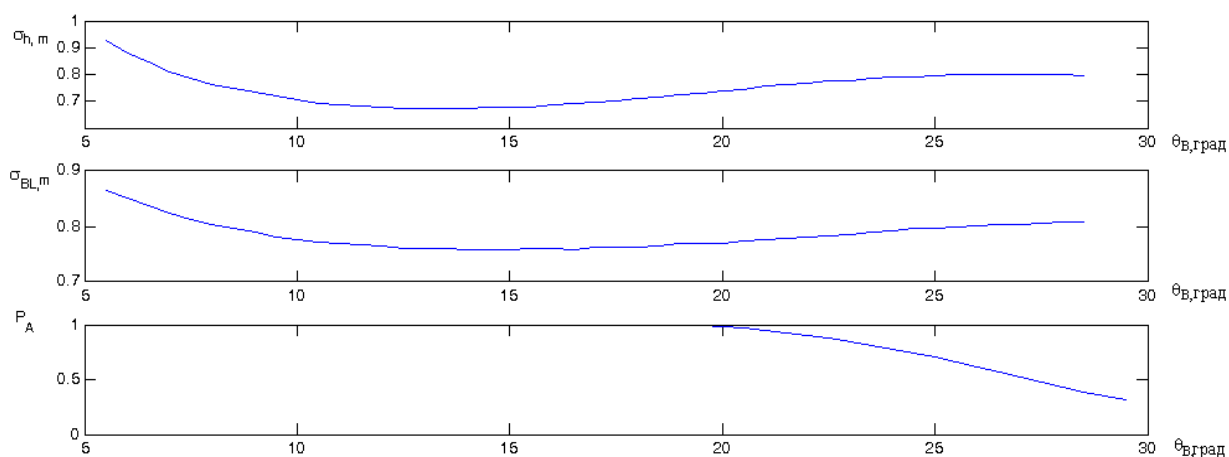


Рис. 7. Зависимость точности расчетов положения объекта от угла возвышения НКА, г. Санкт-Петербург (59 с.ш. 30 в.д.)

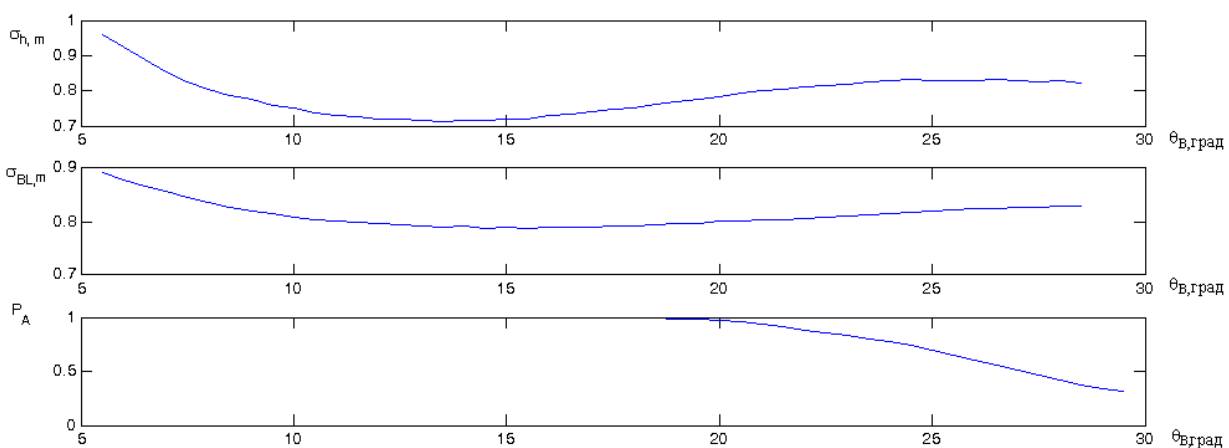


Рис. 8. Зависимость точности расчетов положения объекта от угла возвышения НКА, г. Магадан (59 с.ш. 150 в.д.)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов проведенного расчета видно, что выбор маски угла возвышения НКА с учетом компромисса между оцениваемыми значениями погрешностей и доступности измерений для известного места расположения контрольно-корректирующей станции позволит без изменения алгоритмов функционирования НАП ВС и ЛККС повысить ее эксплуатационные характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. **ГЛОНАСС.** Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. 2008.
2. **Быстраков С.Г., Соловьев Ю.А., Устюжанин Д.А.** Методические вопросы априорной оценки точности определения координат дифференциальной подсистемой ГЛОНАСС/GPS на этапе посадки воздушного судна. 2010.
3. **Каплан Э.Д., Хегарти К.Д.** Понимание принципов и применение GPS // ARTECH HOUSE. 2006. С. 54.
4. **Перов А.И., Харисов В.Н.** ГЛОНАСС принципы построения и функционирования // «Радиотехника». 2010. С. 44.
5. **ИКАО.** Международные стандарты и рекомендуемая практика. Приложение 10 к конвенции о международной гражданской авиации. Авиационная радиосвязь. Т. I. Радионавигационные средства // Издание шестое, 2006.

ASSESSMENT OF SV ELEVATION MASK ON THE ACCURACY AND ACCESSIBILITY OF CERTAIN AIRCRAFT POSITIONING ON FINAL APPROACH WITH THE SIGNALS OF GLONASS

Krinitzky G.V., Zimina A.V., Zimin A.S.

The dependence of the accuracy and availability of aircraft location on final approach on signals of GLONASS with the certain satellites elevation angle is determined. Estimation of the accuracy and accessibility of the aircraft location was calculated for angles of elevation of the satellites within the specified range for the various aircraft location.

Key words: satellite navigation, elevation mask, geometric factor, geometric range, accuracy of aircraft positioning.

REFERENCES

1. **GLONASS.** Interfejsnyj kontrol'nyj dokument. Navigacionnyj radiosignal v diapazonah L1, L2. (GLONASS. Interface control document. L1, L2 Navigation signal). 2008 г.
2. **Bystrakov S.G., Solov'ev Ju.A., Ustjuzhanin D.A.** Metodicheskie voprosy apriornoj ocenki tochnosti opredelenija koordinat differencial'noj podsystemoj GLONASS/GPS na jetape posadki vozdushnogo sudna (Methodological issues priori estimate accuracy of the coordinates of differential subsystem GLONASS / GPS in the landing phase of the aircraft). 2010.
3. **Kaplan E. D., Hegarty C. J.** Understanding GPS. Principles and Applications, ARTECH HOUSE. 2006. P. 54.
4. **Perov A.I., Harisov V.N.** GLONASS principy postroenija i funkcionirovanija (GLONASS principles of construction and functioning) // «Radiotehnika». 2010. P. 44.
5. **ICAO.** International standards and recommended practices. Aeronautical telecommunications. Annex 10 to the convention on international civil aviation. Volume I (Radionavigation aids) // Sixth Edition, 2006.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Креницкий Георгий Викторович, 1984 г.р., окончил МЭИ (ТУ) (2006), начальник отдела разработки ОАО «МКБ «КОМПАС»», автор 4 научных работ, область научных интересов – радионавигация, радиотехника, навигация и управление воздушным движением.

Зими́на Александра Васильевна, окончила НИЯУ (МИФИ) (2011), инженер-программист ОАО «МКБ «КОМПАС»», автор 1 научной работы, область научных интересов – радионавигация, математическое моделирование процессов навигации и управления воздушным движением.

Зимин Алексей Сергеевич, 1983 г.р., окончил МЭИ (ТУ) (2006), заместитель начальника отдела разработки ОАО «МКБ «КОМПАС»», автор 2 научных работ, область научных интересов – радионавигация, системы ОВЧ радиосвязи, навигация и управление воздушным движением.