

УДК 629.7

**ТРЕХМЕРНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ANP НА ОСНОВЕ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПРИ
ПОЛЕТЕ В УСЛОВИЯХ RNP****Кириллов Дмитрий Олегович,**

Независимый исследователь,

Россия, г. Санкт-Петербург.

sibir_dimsan@mail.ru

Аннотация

Навигация, основанная на характеристиках (PBN), является перспективным элементом гражданской авиации будущего. В целях дальнейшего обеспечения безопасности и эффективности эксплуатации воздушных судов навигация перейдет от 2D на 3D / 4D. Точная оценка фактических навигационных характеристик в трехмерном пространстве (3D ANP) при полете в условиях RNP важна для гарантии безопасности полетов. Однако в настоящее время существует лишь двумерный метод оценки ANP, который в основном фокусируется на характеристиках в горизонтальной плоскости, в нем отсутствует оценка вертикального направления. Таким образом, в данной статье строится трехмерная модель эллипсоида равной плотности нормального распределения для неопределенности пространственного положения гражданских воздушных судов и приводятся трехмерные результаты расчета ANP путем численного интегрирования.

Ключевые слова: требуемые навигационные характеристики (RNP), фактические навигационные характеристики (ANP), неопределенность пространственного положения, эллипс рассеивания, эллипсоид равной плотности.

**THREE-DIMENSIONAL ANP EVALUATION METHOD BASED ON SPATIAL
POSITION UNCERTAINTY UNDER RNP OPERATION****Dmitriy O. Kirillov,**

Independent researcher,

Russia, Saint-Petersburg

sibir_dimsan@mail.ru

ABSTRACT

Performance-based navigation (PBN) is a promising element of the civil aviation of the future. In order to further ensure the safety and efficiency of aircraft operation, navigation will

switch from 2D to 3D/4D. An accurate assessment of the actual navigation characteristics in three-dimensional space (3D ANP) when flying in RNP conditions is important to ensure flight safety. However, currently there is only a two-dimensional ANP estimation method, which mainly focuses on characteristics in the horizontal plane, it does not estimate the vertical direction. Thus, this article builds a three-dimensional model of an ellipsoid of equal density of the normal distribution for the uncertainty of the spatial position of civil aircraft and provides three-dimensional results of calculating ANP by numerical integration.

Keywords: required navigation performance (RNP), actual navigation performance (ANP), spatial position uncertainty, scattering ellipse, ellipsoid of equal density.

Введение

Растущее многообразие видов воздушного транспорта и непрерывный рост объемов авиаперевозок выдвигают новые требования к авиационным системам. Международная организация гражданской авиации (ИКАО), Федеральное авиационное управление (FAA), Европейское агентство авиационной безопасности (EASA) и Федеральное Агентство Воздушного Транспорта (ФАВТ) активно продвигают метод навигации, основанный на характеристиках (PBN), для повышения возможностей управления будущей четырехмерной траекторией (4DT) [2,4]. Развитие эксплуатации систем с использованием требуемых навигационных характеристик RNP и инновации бортовых навигационных систем освободили гражданские воздушные суда от зависимости от наземных навигационных средств, сделали полетные процедуры более гибкими и еще больше повысили безопасность, эффективность полетов и пропускную способность воздушного пространства. В то же время это позволило снизить воздействие воздушного транспорта на окружающую среду.

Требуемые навигационные характеристики разработаны на основе зональной навигации (RNAV), которая представляет собой навигацию по любым желаемым траекториям, но добавлением функций мониторинга характеристик в воздухе и выдачей предупреждений [3].

RNP представляет собой общую погрешность системы, которая включает погрешность навигационной системы (NSE), летно-техническую ошибку (FTE) и погрешность определения траектории (PDE) в качестве стандартов измерения навигационных возможностей. В обозначенном воздушном пространстве, пока воздушное судно отвечает данным требованиям к навигационным характеристикам, ему разрешается использовать данное воздушное пространство. Ожидается, что предельное значение RNP будет достигнуто не менее чем на протяжении 95% времени полета.

ИКАО установила минимальное значение навигационных характеристик для гражданских воздушных судов для различных этапов полета в виде навигационных спецификаций [3]. Как показано на рисунке 1, в спецификациях RNP используется концепция защищенного воздушного пространства для количественного описания конкретных требований всех этапов полета воздушного судна, начиная со взлета, набора высоты, крейсерского полета, снижения, захода на посадку и приземления, то есть на каждом этапе полета имеется воображаемая область, которая определяет вертикальные и горизонтальные границы траектории полета, а навигационные характеристики воздушного судна должны соответствовать требованиям RNP на данном этапе полета.

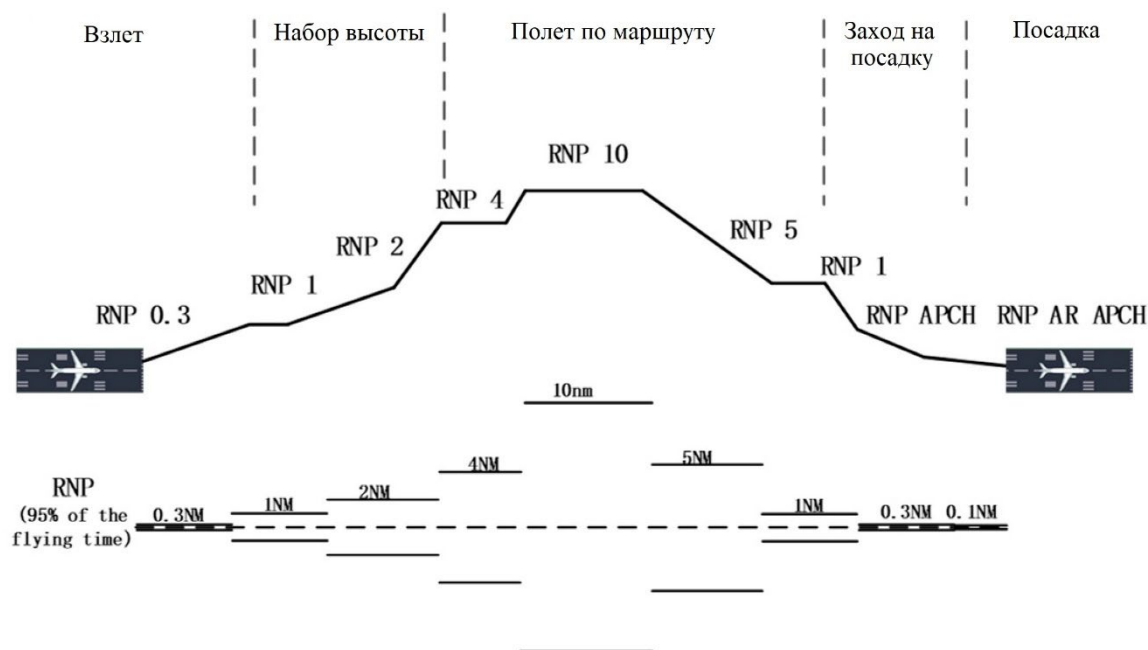


Рис. 1 – Спецификации RNP на каждом этапе полета

Система управления полетом использует фактические навигационные характеристики (ANP) в качестве показателя для оценки точности навигационной системы, чтобы судить, находится ли воздушное судно в заданных пределах [6]. На данном этапе модель ANP использует вероятностную характеристику в виде радиальной погрешности определения положения места самолета (МС) в горизонтальном направлении в качестве фактических навигационных характеристик гражданского воздушного судна во время полета по RNP. Данный метод приводит информацию о местоположении гражданского воздушного судна в трехмерном пространстве к двумерному [7,8]. Из-за этого возникает проблема отсутствия информации и фактических навигационных характеристик в вертикальной плоскости.

Традиционная двухмерная модель ANP

Традиционный расчет ANP учитывает только случайную погрешность местоположения, вызванную лишь одним датчиком, и в основном фокусируется на характеристиках навигации самолета в горизонтальной плоскости.

Оценка ANP по горизонтали рассматривается как процесс вычисления средней квадратической радиальной погрешности определения МС [5]. Она представляет собой радиус окружности рассеивания возможных местоположений ВС с центром в предполагаемом МС.

$$\sigma r = \frac{\sqrt{\sigma \rho_1^2 + \sigma \rho_2^2}}{\sin \omega}, \tag{1}$$

где $\sigma \rho_1$ и $\sigma \rho_2$ - погрешности определения навигационных параметров, ω - угол между линиями положения.

Но СКРП не несет полной информации о характере рассеяния измеренного места самолета вокруг фактического. Полную картину точности определения МС можно получить с помощью эллипса рассеивания [5].

Представим, что оси X и Y - это линии положения, определяющие местоположение ВС, тогда эллипс рассеивания будет располагаться таким образом, что его полуоси совпадут с осями X и Y (рис.2).

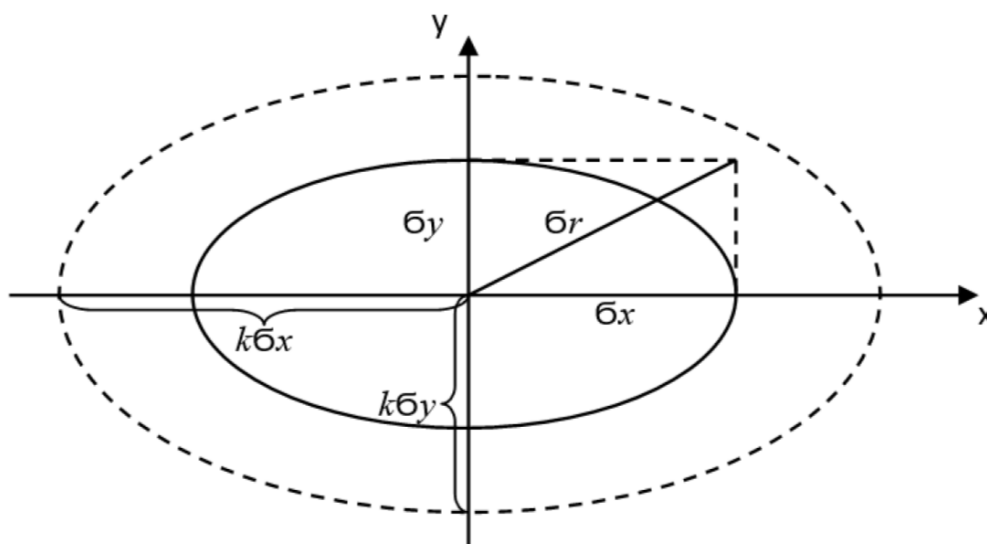


Рис. 2 – Эллипс погрешностей

Такой эллипс, в котором длины полуосей будут равны средним квадратическим погрешностям линий положения называется эллипсом погрешностей.

Вероятность попадания МС внутрь данного эллипса будет равна [1]:

$$P = 1 - e^{-\frac{k^2}{2}}, \quad (2)$$

где k – масштабный коэффициент.

При требуемом значении вероятности $P = 0,95$ масштабный коэффициент численно будет равен

$$k = 2,4477$$

При этом СКРП по теореме Пифагора может быть определена как:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (3)$$

Отсюда ANP выражается как:

$$ANP = k * \sigma_r \quad (4)$$

Трехмерная модель расчета ANP

Для работы в режиме RNP FMS необходимо отслеживать навигационные характеристики как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Учитывая неопределенность положения гражданских ВС в полете, используем модель эллипсоида рассеивания равной плотности для описания точности определения местоположения объекта в трехмерном пространстве, которая может быть использована для оценки 3D ANP.

Полуоси данного эллипсоида пропорциональны главным средним квадратическим отклонениям навигационных параметров:

$$a = k\sigma_x; \quad b = k\sigma_y; \quad c = k\sigma_z.$$

Плотность нормального распределения в трехмерном пространстве будет равна [1]:

$$f(x, y, z) = \frac{1}{2\pi\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)}, \quad (5)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – средние квадратические отклонения.

Перейдем от декартовых координат к полярным (сферическим):

$$\begin{cases} x = r \cos\theta \sin\varphi, \\ y = r \cos\theta \sin\varphi, \\ z = r \sin\theta. \end{cases}$$

Тогда после некоторых преобразований вероятность попадания в эллипсоид равна:

$$P = 2\Phi^*(k) - 1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} k e^{-\frac{k^2}{2}} \quad (6)$$

где $\Phi^*(k)$ – стандартная функция нормального распределения.

Как показано на рисунке 3, для заданной вероятности P процесс трехмерного вычисления ANP представлен в виде вычисления длины осей трехмерного интегрального эллипсоида нормального распределения.

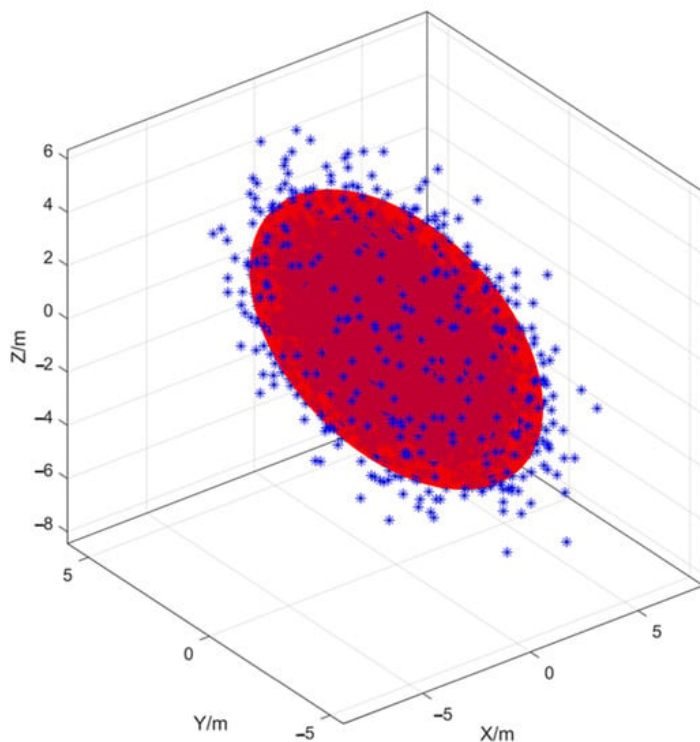


Рис. 3 – Трехмерный эллипсоид погрешностей

В данном случае уравнение (6) не может быть решено аналитически. Поэтому в статье приближенное решение получено путем численного интегрирования, как показано на рисунке 4.

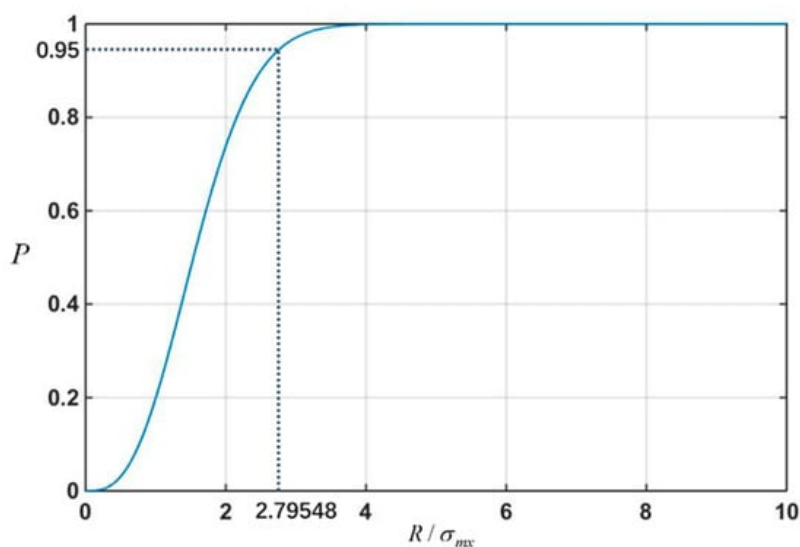


Рис. 4 – График зависимости вероятности P от масштабного коэффициента k

Из графика видно, что при требуемом значении вероятности 0,95 коэффициент k принимает значение 2,795. Отсюда длины радиусов эллипсоида по трем осям равны:

$$R_x = 2,795\sigma_x; \quad R_y = 2,795\sigma_y; \quad R_z = 2,795\sigma_z.$$

Если принять, что СКРП равна:

$$\sigma r = \sqrt{\sigma x^2 + \sigma y^2 + \sigma z^2}, \quad (7)$$

то тогда фактические навигационные характеристики могут быть, вычислены как:

$$ANP = 2,795\sigma r \quad (8)$$

Заключение

Во время полета в условиях PBN важно точно отслеживать фактические навигационные характеристики, обеспечиваемые воздушным судном. Традиционный расчет ANP в основном фокусируется на характеристиках навигации и определения места самолета в горизонтальной плоскости. Отсутствие всестороннего учета неопределенности пространственного положения приведет к потере пространственного восприятия навигационных характеристик самолета и неточной оценке ANP.

В статье для удовлетворения потребностей будущего развития навигационных систем гражданских воздушных судов до 3D / 4D, была приведена модель расчета ANP в трехмерном пространстве с помощью эллипсоида равной плотности нормального распределения.

По сравнению с традиционной двумерной моделью ANP, она полностью учитывает пространственную неопределенность местоположения гражданских воздушных судов.

Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на разработку систем, также учитывающих навигационные характеристики ВС по продольной координате или времени.

Список литературы:

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. Для вузов. – 6-е изд. стер. – М.: Высш. Шк., 1999. – 576 с.

2. Консорциум SESAR, "Карта устойчивого управления воздушным движением - европейский генеральный план по ОРВД", ЕВРОКОНТРОЛЬ, том 2, 2012.
3. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Дос 9613: Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN); ИКАО: Монреаль, QC, Канада, 2013.
4. Объединенный офис планирования и развития (JPDO). Концепция эксплуатации авиатранспортной системы следующего поколения; JPDO: Вашингтон, округ Колумбия, США, 2013.
5. Сарайский Ю.Н. Точность и надежность аэронавигации: Учебное пособие / Университет ГА им. А.А. Новикова. С-Петербург., 2023. 207 с.
6. Аэронавигационный центр FAA. Оценка обоснованности использования информации о фактических навигационных характеристиках (ANP) для поддержки назначенных летных инспекций; Аэронавигационный центр FAA: Оклахома-Сити, Оклахома-Сити, США, 2008.
7. Фу, Л.; Чжан, Дж.; Ли, Р. Оценка суммарной системной ошибки в реальном времени: моделирование и применение для обеспечения требуемых навигационных характеристик. Чин. Дж. Аэронавт. 2014.
8. Чжао, Х.; Сюй, Х.; Чжан, Дж.; Чжу, Ю.; Ян, С.; Хонг, С. Модель оценки технических ошибок при боковом полете для навигации, основанной на характеристиках. Чин, Дж. Аэронавт. 2011.

References:

1. Wentzel E.S. Probability theory: Textbook. For universities. - 6th ed. ster. - M.: Higher School, 1999. - 576 p.
2. CESAR Consortium, "Permanent Government Map - European Master Plan of Action", OCTOBER, Volume 2, 2012.
3. International Civil Aviation Organization (ICAO). Document 9613: Navigation Guidance, Analytics (PBN); ICAO: Montreal, QC, Canada, 2013.
4. Joint Office of Planning and Development (JPDO). The concept of operation of the next generation air transport system; JPDO in: Washington, DC, USA, 2013.
5. Saraisky Yu.N. Accuracy and reliability of air navigation: A textbook / University of Aviation named after A.A. Novikov. St. Petersburg, 2023. 207 p.
6. FAA Aviation Center. Assessment of the validity of using the actual navigation execution (PNP) to service the site of flight control operations; aviation FAA Center: Oklahoma City, Oklahoma, USA 2008,.
7. Fu, L.; Zhang, J.; Li, R. Evaluation of the total system error in real time: modeling and application to ensure the required navigation characteristics. Chin. J. Aeronaut. 2014.
8. Zhao, H.; Xu, H.; Zhang, J.; Zhu, Y.; Yang, S.; Hong, S. A side-flight technical error estimation model for performance-based navigation. Chin, J. Aeronaut. 2011.