

# РЕАЛИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ НА БОРТОВЫХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНДИКАТОРАХ

**В. В. Маркелов<sup>а</sup>**, ведущий инженер-программист

**М. О. Костишин<sup>а, б</sup>**, ассистент, старший инженер

**И. О. Жаринов<sup>а, б</sup>**, заведующий кафедрой, руководитель учебно-научного центра

**В. А. Нечаев<sup>а, б</sup>**, доцент, главный конструктор

<sup>а</sup>АО «ОКБ «Электроавтоматика», Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** для обеспечения эффективного выполнения экипажем воздушного судна заданного плана полета предусматривается отображение траектории маршрута полета на бортовых многофункциональных индикаторах, что требует использования в бортовых комплексах специализированного математического аппарата, обеспечивающего преобразование данных плана полета и их визуализацию в виде прогнозируемой траектории движения воздушного судна в горизонтальной плоскости. **Цель:** разработка принципов и алгоритмов построения маршрутных траекторий полета летательного аппарата в горизонтальной плоскости, основанных на унификации используемых маршрутных траекторий и реализуемых в бортовых вычислительных комплексах в условиях ограничения потребляемых вычислительных ресурсов. **Результаты:** сформулированы алгоритмы формирования и расчета массивов данных маршрутных траекторий для построения их отображения на многофункциональных индикаторах. Траектория полета отображается в виде последовательной прорисовки определенных графических примитивов в соответствии с массивом данных для отображения маршрута. Массив данных сформирован программным обеспечением бортового комплекса на основе информации, представленной в полетном задании и соответствующей базе данных Jeppesen или аналогичной. Формирование массива осуществлено приведением заданных траекторий маршрута к форматам трех типовых описанных траекторий. При этом каждая из типовых траекторий имеет стандартное описание и алгоритм расчета параметров, составляющих массив данных для отображения. **Практическая значимость:** полученные алгоритмы построения маршрутных траекторий унифицируют алгоритмы формирования информации для отображения на индикаторах навигационной обстановки и оптимизируют набор расчетных данных для управления полетом по траектории в горизонтальной плоскости.

**Ключевые слова** — траектория маршрута летательного аппарата, навигационная обстановка, зональная навигация.

## Введение

Для обеспечения выполнения полета по заданному в полетном задании (плане полета) маршруту предусматривается отображение данного маршрута на индикаторах навигационной обстановки в кабине экипажа.

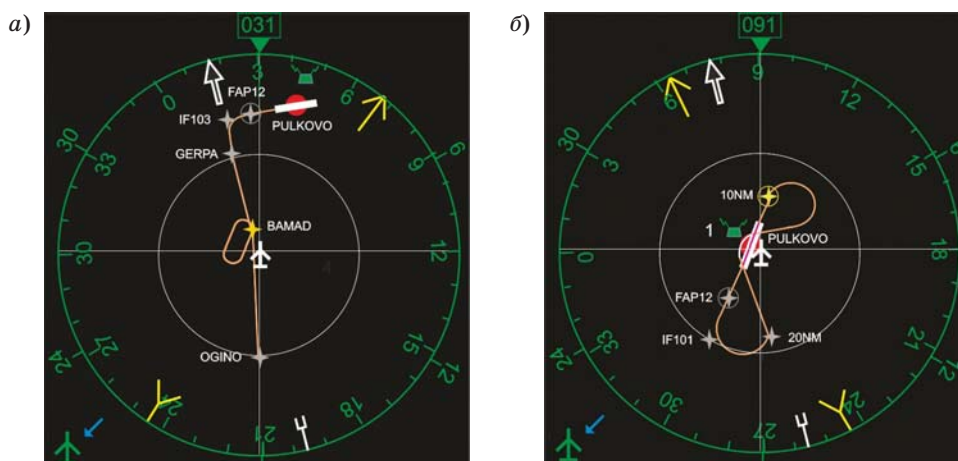
Современные требования по точности навигации при полете по маршруту, в том числе по правилам зональной навигации с вероятностью выдерживания заданной траектории 0,95 не более 1,85 км (навигационные характеристики  $RNP$  не хуже  $RNP1$ ), обуславливают повышенные требования и к точности отображения маршрута на бортовых индикаторах, включая отображение участков перехода между фиксированными траекториями маршрута, которые должны максимально соответствовать фактической реализации данных переходов, обеспечиваемой бортовой системой управления [1–11]. Выполнение данных требований реализуется при использовании современных многофункциональных индикаторов и детализации маршрута на отдельные конечные траектории.

В общем случае представление маршрута состоит из набора заданных контрольных точек

маршрута и набора образующих маршрут траекторий, определенных в геодезической системе координат. Непосредственно отображение маршрута на индикаторе обеспечивается преобразованием контрольных точек и траекторий из геодезической в экранную систему координат с учетом выбранного окна индикатора и масштаба изображения [12–17].

Исходные данные для построения маршрута включают в себя массив навигационной информации, определенный полетным заданием (планом полета) и содержащий последовательный перечень контрольных точек и описание траекторий полета между ними. В зависимости от поставленных задач описание контрольных точек и траекторий может соответствовать стандартам ARINC-424 или собственной структуре базы данных [18–21].

Бортовой комплекс преобразует заданную навигационную информацию в массив образующих маршрут траекторий, каждая из которых формируется из характерных расчетных точек, соединенных друг с другом. Координаты характерных точек траектории и тип соединительной линии определяются расчетным путем в зависимости



■ **Рис. 1.** Отображение участков маршрута на многофункциональном индикаторе: *a* — полет по маршруту; *б* — повторный заход на посадку

от заданных параметров соответствующего участка маршрута. Принципы и алгоритмы преобразования не являются регламентированными и определяются целевым назначением воздушного судна и техническими характеристиками бортового комплекса [1, 2, 22].

Вариант отображения траекторий полета на бортовом многофункциональном индикаторе представлен на рис. 1.

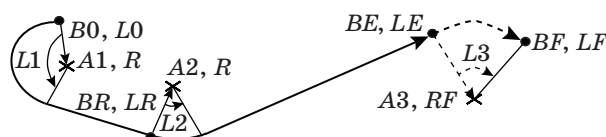
В качестве одного из вариантов алгоритма преобразования навигационной информации, определенной полетным заданием, представлен типовой вариант формирования массива данных для отображения маршрута (участков маршрута) на бортовых индикаторах в целях обеспечения полетов по правилам зональной навигации или аналогичным.

### Массив данных траектории

Массив данных каждой траектории включает в себя последовательный набор графических примитивов дуга — отрезок, определенных в геодезической системе координат. В общем случае каждая траектория состоит из набора дуг, построенных из характерных расчетных точек и соединенных отрезками.

Схема построения типовой траектории представлена на рис. 2. Для ее отображения используется ряд следующих рассчитываемых параметров, составляющих два или три участка типа дуга — прямая:

- геодезические координаты текущего местоположения ( $B0, L0$ );
- радиус разворота ( $R$ );
- азимут центра первого разворота ( $A1$ );
- угол дуги первого разворота ( $L1$ ) (знаковый);
- геодезические координаты точки конечного разворота ( $BR, LR$ );
- азимут центра конечного разворота ( $A2$ );



■ **Рис. 2.** Схема построения траектории

- угол дуги конечного разворота ( $L2$ ) (знаковый);
- геодезические координаты точки окончания траектории ( $BE, LE$ );
- радиус дуги ( $RF$ ) (только для полета по дуге);
- азимут центра дуги ( $A3$ ) (только для полета по дуге) (знаковый);
- угол полета по дуге ( $L3$ ) (только для полета по дуге).

При построении маршрута последовательно отображаются все траектории, из которых маршрут состоит. При этом точка окончания траектории ( $BE, LE$  или  $BF, LF$  — для полета по дуге) принимается в качестве точки текущего местоположения ( $B0, L0$ ) для следующей траектории.

Величина радиуса разворота ( $R$ ), используемая при построении траектории, определяется скоростью полета и углом крена и вычисляется по формуле

$$R = V_{\text{ист}}^2 / (9,81 \cdot \text{tg}(\gamma)),$$

где  $V_{\text{ист}}$  — истинная скорость (заданная на данной траектории);  $\gamma$  — значение номинального угла крена на текущей траектории.

Для определения окончания траектории с упрещением разворота используется значение расчетного радиуса разворота для полета по следующей траектории ( $RE$ ), определяемое данной формулой, в качестве исходных данных которой являются заданные параметры, относящиеся к следующей траектории.

**Траектории полета в горизонтальной плоскости**

Траектории полета в горизонтальной плоскости могут быть представлены тремя типовыми траекториями. Варианты реализуемых типовых траекторий и исходные данные для их расчета представлены в табл. 1.

При построении маршрута, состоящего из последовательности траекторий, в качестве текущего путевого угла принимается расчетный азимут окончания предыдущей траектории.

Представление стандартных типов траекторий, в том числе траекторий зональной навигации [1, 2, 18, 19], в виде типовых приведено в табл. 2. Там же представлено преобразование

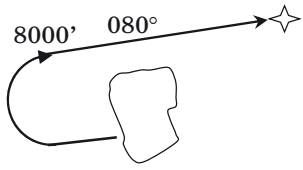


■ **Таблица 1.** Типовые траектории в горизонтальной плоскости

Траектория	Схема	Исходные данные
Линия пути		$B_0, L_0$ — координаты текущего местоположения $\psi_0$ — текущий путевой угол $B_F, L_F$ — координаты исполняемой навигационной точки $A_F$ — конечный азимут ортодромии
Прямо на точку (на касательную к окружности, построенной в заданном направлении)		$B_0, L_0$ — координаты текущего местоположения $\psi_0$ — текущий путевой угол $B_F, L_F$ — координаты исполняемой навигационной точки $A_F$ — заданное направление подхода $R_F$ — радиус окружности $TDF$ — направление разворота
Полет по дуге		$B_0, L_0$ — координаты текущего местоположения $\psi_0$ — текущий путевой угол $B_F, L_F$ — координаты центра дуги $A_F$ — заданный исполняемый азимут навигационной точки $R_F$ — радиус дуги $TDF$ — направление разворота

■ **Таблица 2.** Представление траекторий в типовом формате

Описание траектории	Исходные данные траектории	Исходные данные типовой траектории
Линия пути между двумя точками <i>TF LEG</i>	$B_1, L_1$ — координаты первой точки $B_2, L_2$ — координаты второй точки	<i>Линия пути</i> $B_F, L_F = B_2, L_2$ $A_F = F_{об}(B_2, L_2, B_1, L_1) + \pi$
Полет с выдерживанием ЗПУ* на точку <i>CF LEG 080°</i>	$B, L$ — координаты точки ЗПУ	<i>Линия пути</i> $B_F, L_F = B, L$ $A_F = \text{ЗПУ}$
Полет прямо на точку <i>DF LEG</i>	$B, L$ — координаты точки	<i>Прямо на точку</i> $B_F, L_F = B, L$ $A_F = R_F = 0$ $TDF = 0$
Полет с выдерживанием ЗПУ от точки до высоты <i>FA LEG 8000' 080°</i>	$B, L$ — координаты точки ЗПУ $\Delta H$ — необходимый набор высоты	<i>Линия пути</i> $B_F, L_F = F_{пр}(B, L, \text{ЗПУ}, H/grd)$ , где $grd$ — заданный градиент набора высоты $A_F = \text{ЗПУ}$

■ Окончание табл. 2

Описание траектории	Исходные данные траектории	Исходные данные типовой траектории
<p>Выход на точку с ЗПУ на заданном удалении</p> 	<p><math>B, L</math> — координаты точки ЗПУ  <math>D_{уп}</math> — дальность упреждения</p>	<p>1-й участок прямо на точку  <math>BF, LF = F_{пр}(B, L, ЗПУ + \pi, D_{уп})</math>  <math>AF = ЗПУ</math>  <math>RF =</math> радиус разворота  <math>TDF = 0</math>                  2-й участок линии пути  <math>BF, LF = B, L</math>  <math>AF = ЗПУ</math></p>
<p>Полет по дуге заданного радиуса до точки</p> 	<p><math>B, L</math> — координаты точки  <math>B_{ц}, L_{ц}</math> — координаты центра дуги  <math>R_{дуги}</math> — радиус дуги  <math>HP</math> — направление разворота</p>	<p>Полет по дуге  <math>BF, LF = B_{ц}, L_{ц}</math>  <math>AF = F_{об}(B_{ц}, L_{ц}, B, L)</math>  <math>RF = R_{дуги}</math>  <math>TDF = HP</math></p>
<p>Полет в зоне ожидания</p> 	<p><math>B, L</math> — координаты точки зоны ожидания ЗПУ  <math>S</math> — длина участка приближения  <math>HP</math> — направление разворота</p>	<p>1-й участок прямо на точку  <math>BF, LF = F_{пр}(B, L, ЗПУ + \pi, S)</math>  <math>AF = ЗПУ</math>  <math>RF =</math> радиус разворота  <math>TDF = HP</math>                  2-й участок линии пути  <math>BF, LF = B, L</math>  <math>AF = ЗПУ</math></p>

\* ЗПУ — заданный путевой угол.

исходных данных для расчета траекторий по типовым методикам.

Алгоритмы расчета параметров трех типовых траекторий: линия пути, прямо на точку и полет по дуге — приведены далее.

Функция типа  $F_{пр}(B, L, A, D)$  представляет собой решение прямой геодезической задачи в пространстве и обеспечивает расчет геодезических координат навигационной точки по известным координатам заданной точки, азимуту и дальности. Функция типа  $F_{об}(B1, L1, B2, L2)$  представляет собой решение обратной геодезической задачи на эллипсоиде и обеспечивает расчет азимута от первой заданной координатами навигационной точки ко второй.

**Исходные данные для расчета параметров типовых траекторий**

В качестве исходных данных для расчета траекторий принимаются:

- текущий путевой угол ( $\Psi_0$ );
- азимут текущего местоположения от исполняемой навигационной точки или центра дуги — для траектории полета по дуге ( $AF_0$ );
- азимут на исполняемую навигационную точку или центр дуги — для траектории полета по дуге от текущего местоположения ( $AOF$ );

— расстояние до исполняемой навигационной точки или центра дуги ( $DOF$ ).

Для траектории линии пути дополнительно:

— конечный азимут ортодромии ( $AF$ ).

Для путевого участка комбинированного способа или для выхода на точку касания окружности в заданном направлении дополнительно:

— заданное направление подхода ( $AF$ );

— радиус окружности конечного разворота ( $RF$ );

— направление разворота по окружности ( $TDF$ ) — при необходимости.

Для траектории полета по дуге дополнительно:

— радиус дуги ( $RF$ );

— заданный азимут исполняемой навигационной точки от центра дуги ( $AF$ );

— направление разворота ( $TDF$ ).

Все развороты на участке выхода на траектории осуществляются с расчетным радиусом ( $R$ ).

**Расчет параметров траектории линии пути**

Участок выхода на траекторию полета по линии пути — ортодромии — включает в себя дугу первого разворота от текущего местоположения до достижения угла приближения и дугу конечного разворота выхода на ортодромию от точки начала конечного разворота, соединенные пря-

мой. Радиусы дуг равны расчетному радиусу разворота. Параметры участка выхода на линию пути представлены на рис. 3.

Боковое отклонение от ортодромии

$$Z = D0F \cdot \sin(AF - AF0).$$

Азимут ортодромии

$$\Psi F = AF + \pi + (A0F - AF0) \text{ в диапазоне } [-\pi; \pi].$$

Направление первого разворота при угле приближения, равном  $45^\circ$ :

— при  $|Z| \geq R \cdot (1 - \cos(\pi/4))$

$$TD = \text{sign}(\sin(\text{sign}(Z) \cdot \pi/4 - (\Psi0 - \Psi F)));$$

— при  $|Z| < R \cdot (1 - \cos(\pi/4))$

$$TD = \text{sign}(\sin(\text{sign}(Z) \cdot \arccos(1 - |Z|/R) - (\Psi0 - \Psi F))).$$

Здесь и далее при определении направления разворотов: при 1 — разворот по часовой стрелке, при минус 1 — против.

В случае иной величины угла приближения значение  $\pi/4$  в приведенных формулах заменяется на соответствующее значение.

Угол приближения представляет собой угол выхода на дугу окружности, касательную к ортодромии, и отсчитываемый от направления ортодромии.

Угол приближения:

— при  $TD \cdot Z > R \cdot (1 + \cos(\Psi0 - \Psi F) - 2\cos\pi/4)$

$$\Phi = TD \cdot \pi/4;$$

— при  $TD \cdot Z \geq R \cdot (\cos(\Psi0 - \Psi F) - 1)$  и  $TD \cdot Z \leq R \cdot (1 + \cos(\Psi0 - \Psi F) - 2\cos\pi/4)$

$$\Phi = TD \cdot \arccos(0,5 \cdot (1 + \cos(\Psi0 - \Psi F) - TD \cdot Z/R));$$

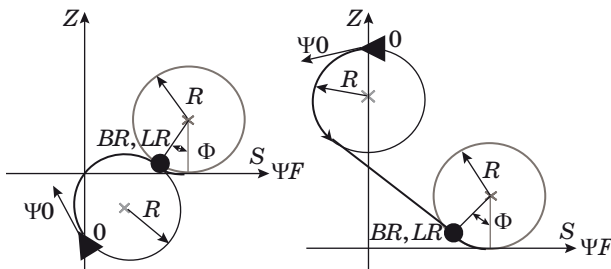
— при  $TD \cdot Z < R \cdot (\cos(\Psi0 - \Psi F) - 1)$

$$\Phi = -TD \cdot \pi/4.$$

Путевой угол приближения

$$\Psi D = \Psi F + \Phi \text{ в диапазоне } [-\pi; \pi].$$

Азимут и дальность точки начала конечного разворота от текущего местоположения ( $AR, DR$ ),



■ Рис. 3. Параметры выхода на траекторию полета по линии пути

определяющие координаты точки начала конечного разворота ( $BR, LR$ ):

$$AR = \Psi F + \arctg((Z - ZR) / SR);$$

$$DR^2 = ((Z - ZR)^2 + SR^2),$$

где ( $ZR, SR$ ) — координаты точки начала конечного разворота в ортодромической системе координат:

$$ZR = \text{sign}(\Phi) \cdot R \cdot (1 - \cos(\Phi));$$

$$SR = TD \cdot R / \sin(\Phi)(1 - \cos(\Psi0 - \Psi F - \Phi)) + (Z - ZR) / \text{tg}(\Phi); \text{ при } \Phi = 0 \text{ } SR = 0.$$

Азимут центра первого разворота

$$A1 = \Psi0 + \pi/2 \cdot TD.$$

Угол дуги первого разворота

$$L1 = TD \cdot L10,$$

где  $L10 = TD \cdot (\Psi D - \Psi0)$  в диапазоне  $[0; 2\pi]$ .

Азимут центра конечного разворота

$$A2 = \Psi D - \pi/2 \cdot \text{sign}(\Phi).$$

Угол дуги конечного разворота

$$L2 = (-\Phi) \cdot R.$$

Суммарная длина прямолинейного участка ортодромии

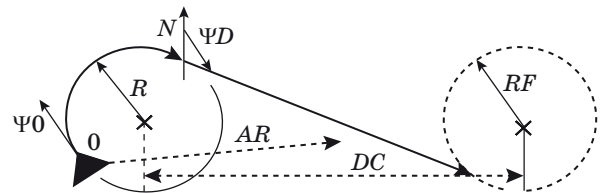
$$S0 = -D0F \cdot \cos(AF0 - AF) - (SR + \text{sign}(\Phi) \cdot R \cdot \sin(\Phi)).$$

Таким образом, определен необходимый набор параметров, составляющих массив данных траектории линии пути для ее отображения.

### Расчет параметров траектории прямо на точку

Участок выхода на траекторию включает в себя дугу первого разворота от текущего местоположения до достижения угла приближения с радиусом, равным расчетному радиусу разворота. Параметры участка выхода на траекторию представлены на рис. 4.

Направление первого разворота определяется из условия обеспечения меньшего угла разворота



■ Рис. 4. Параметры траектории выхода прямо на точку



та, необходимого для выхода на азимут приближения к заданной навигационной точке или точке касания окружности.

Направление разворота рассчитывается по формуле

$$TD = \text{sign}(\sin(AR - \Psi_0 - TDF \cdot \arcsin(RF/DR))),$$

где дальность и азимут к центру окружности конечного разворота ( $DR, AR$ ):

$$DR^2 = D0F^2 + RF^2 +$$

$$+ 2 \cdot TDF \cdot D0F \cdot RF \cdot \sin(AF - AF_0);$$

$$AR = A0F - TDF \cdot \arcsin(RF \cdot \cos(AF - AF_0)/DR);$$

$TDF$  — направление конечного разворота, определяемое для путевого участка комбинированного способа или для выхода на точку касания окружности в заданном направлении. Направление конечного разворота подлежит расчету при отсутствии его однозначного задания и определяется по формуле

$$TDF = \text{sign}(R \cdot \text{sign}(\sin(\Psi_0 - AF))(1 + \cos(A0F - AF_0 + AF - \Psi_0)) + D0F \sin(AF_0 - AF)).$$

Угол приближения есть путевой угол выхода на исполняемую навигационную точку либо, для путевого участка комбинированного способа полета или для выхода на точку касания окружности, путевой угол выхода на касательную к окружности конечного разворота. Угол приближения

$$\Psi_D = AC + \arcsin((TD \cdot R - TDF \cdot RF)/DC)$$

в диапазоне  $[-\pi; \pi]$ ,

где расстояние между центрами окружностей первого и конечного разворотов ( $DC$ ) и угол между ними ( $AC$ ):

$$DC^2 = DR^2 + R^2 + TD \cdot 2 \cdot DR \cdot R \cdot \sin(\Psi_0 - AR);$$

$$AC = AR - TD \cdot \arcsin(R/DC \cdot \cos(\Psi_0 - AR)).$$

Азимут центра первого разворота

$$A1 = \Psi_0 + \pi/2 \cdot TD.$$

Угол дуги первого разворота

$$L1 = TD \cdot L10,$$

$$L10 = TD \cdot (\Psi_D - \Psi_0) \text{ в диапазоне } [0; 2\pi].$$

Суммарная длина прямолинейного участка траектории

$$S0^2 = DC^2 - TDF \cdot (R - TD \cdot TDF \cdot RF)^2.$$

Вычисленные параметры определяют в полном объеме массив данных траектории прямо на точку.

## Расчет параметров траектории полета по дуге

Участок выхода на траекторию полета по дуге включает в себя дугу первого разворота от текущего местоположения до достижения угла приближения и дугу конечного разворота выхода на заданную исполняемую дугу от точки начала конечного разворота, соединенные прямой. Радиусы дуг при разворотах равны расчетному радиусу разворота.

Параметры траектории выхода на дугу представлены на рис. 5.

Направление первого разворота определяется из условия обеспечения меньшего угла разворота, необходимого для выхода на траекторию приближения к дуге. Направление разворота:

— при  $D0F^2 \geq (RF^2 + 2 \cdot RF \cdot R)$

$$TD = \text{sign}(\sin(A0F - \Psi_0));$$

— при  $D0F \geq RF$  и  $D0F^2 < (RF^2 + 2 \cdot RF \cdot R)$

$$TD = \text{sign}(TDF \cdot \cos(A0F - \Psi_0 - TDF \cdot \arccos((D0F^2 - RF^2)/2/R/D0F - RF/D0F)));$$

— при  $D0F < RF$  и  $D0F^2 > (RF^2 - 2 \cdot RF \cdot R)$  и  $D0F > (2 \cdot R - RF)$

$$TD = -\text{sign}(TDF \cdot \cos(A0F - \Psi_0 - TDF \cdot \arccos((D0F^2 - RF^2)/2/R/D0F + RF/D0F)));$$

— при  $D0F^2 \leq (RF^2 - 2 \cdot RF \cdot R)$  и  $D0F > (2 \cdot R - RF)$

$$TD = -\text{sign}(\sin(A0F - \Psi_0));$$

— при  $D0F \leq (2 \cdot R - RF)$

$$TD = TDF.$$

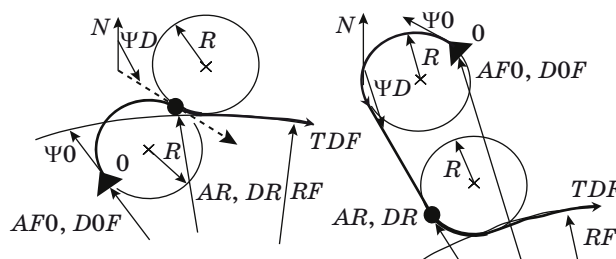
Угол приближения есть путевой угол выхода на дугу окружности, касательную к заданной исполняемой дуге. Угол приближения:

— при  $DC \geq (RF + R)$

$$\Psi_D = AC + TD \cdot \arcsin(R/DC) \text{ в диапазоне } [-\pi; \pi];$$

— при  $DC < (RF + R)$  и  $DC > (RF - R)$

$$\Psi_D = AC + TD \cdot \pi/2 - TDF \cdot \arccos((DC^2 + 4R^2 - (RF + TDF \cdot TD \cdot R)^2)/4/DC/R) \text{ в диапазоне } [-\pi; \pi];$$



■ Рис. 5. Параметры траектории выхода на дугу

— при  $DC \leq (RF - R)$

$$\Psi D = AC - TD \cdot \arcsin(R/DC) + \pi \text{ в диапазоне } [-\pi; \pi],$$

где дальность от центра первого разворота до центра заданной дуги ( $DC$ ):

$$DC^2 = D0F^2 + R^2 + 2 \cdot TD \cdot D0F \cdot R \cdot \sin(\Psi 0 - A0F).$$

Азимут от центра первого разворота до центра заданной дуги:

— при  $D0F^2 > R^2 + DC^2$

$$AC = \Psi 0 +$$

$$+ TD \cdot (\pi/2 - \arcsin(D0F \cdot \cos(\Psi 0 - A0F)/DC));$$

— при  $D0F^2 \leq R^2 + DC^2$

$$AC = \Psi 0 -$$

$$- TD \cdot (\pi/2 - \arcsin(D0F \cdot \cos(\Psi 0 - A0F)/DC)).$$

Дальность и азимут точки начала конечного разворота от центра дуги ( $DR, AR$ ), определяющие координаты точки начала конечного разворота ( $BR, LR$ ):

— при  $DC \geq (RF + R)$

$$DR^2 = RF^2 + 2 \cdot RF \cdot R;$$

$$AR = AF0 - A0F + \Psi D;$$

— при  $DC < (RF + R)$  и  $DC > (RF - R)$

$$DR^2 = DC^2 + R^2 + TD \cdot 2 \cdot DC \cdot R \cdot \sin(AC - \Psi D);$$

$$AR = AF0 - A0F + AC +$$

$$+ TDF \cdot \arccos((DC^2 + DR^2 - R^2)/2/DC/DR);$$

— при  $DC \leq (RF - R)$

$$DR^2 = RF^2 - 2 \cdot RF \cdot R;$$

$$AR = AF0 - A0F + \Psi D + \pi.$$

Азимут центра первого разворота

$$A1 = \Psi 0 + \pi/2 \cdot TD.$$

Угол дуги первого разворота

$$L1 = TD \cdot L10,$$

где  $L10 = TD \cdot (\Psi D - \Psi 0)$  в диапазоне  $[0; 2\pi]$ .

Угол дуги конечного разворота:

— при  $DR \geq RF$

$$L2 = -TDF \cdot \arccos((R^2 +$$

$$+ (RF + R)^2 - DR^2)/2/R/(RF + R));$$

— при  $DR < RF$

$$L2 = TDF \cdot \arccos(-(R^2 +$$

$$+ (RF - R)^2 - DR^2)/2/R/(RF - R)).$$

Азимут центра конечного разворота

$$A2 = \Psi D + \pi/2 \cdot \text{sign}(L2).$$

Вычисленные параметры однозначно определяют массив данных траектории полета по дуге и ее отображение.

### Окончание траекторий

Азимут окончания траектории полета по линии пути

$$\Psi E = AF \text{ в диапазоне } [-\pi; \pi].$$

Азимут окончания траектории полета прямо на точку

$$\Psi E = \Psi D + A0F - AF0 + \pi \text{ в диапазоне } [-\pi; \pi].$$

Окончание траектории полета по линии пути, а также полета прямо на точку, если траектория не является участком комбинированного способа или выходом на точку касания окружности, определяется признаком прохождения исполняемой навигационной точки, который может принимать значения:

- пролет исполняемой точки;
- достижение упреждения разворота.

Упреждение разворота предусматривает сдвиг точки окончания траектории от исполняемой навигационной точки на линейное упреждение разворота ( $SE$ ) в целях обеспечения выхода на следующую траекторию полета в один разворот.

Если следующая траектория — линия пути, в качестве расчетного параметра принимается азимут на точку следующей траектории от исполняемой точки ( $AN$ ).

Если следующая траектория — полет по дуге, расчетные параметры:

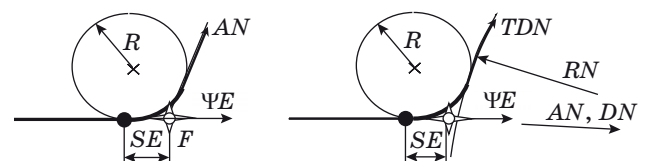
- азимут на центр следующей дуги от исполняемой точки ( $AN$ );
- дальность до центра следующей дуги от исполняемой точки ( $DN$ );
- радиус следующей дуги ( $RN$ );
- направление разворота по следующей дуге ( $TDN$ ).

Развороты на участке выхода на следующую траекторию осуществляются с расчетным радиусом разворота ( $RE$ ).

Параметры линейного упреждения разворота представлены на рис. 6.

Если следующая траектория — линия пути, упреждение разворота

$$SE = RE \cdot |\text{tg}((\Psi E - AN)/2)|.$$



■ Рис. 6. Параметры линейного упреждения разворота

Если следующая траектория — полет по дуге, упреждение разворота при  $|RN + TDR \cdot RE| > |TDN \cdot RE - TDR \cdot DN \cdot \sin(\Psi E - AN)|$

$$SE2 = TDR \cdot \sqrt{(RN + TDR \cdot RE)^2 - (TDN \cdot RE - TDR \cdot DN \cdot \sin(\Psi E - AN))^2} - DN \cdot \cos(\Psi E - AN),$$

где  $TDR = \text{sign}(\cos(\Psi E - AN))$ .

При невыполнении данного условия или при  $SE < 0$   $SE = 0$ .

Во избежание некорректного перехода между соседними траекториями величина линейного упреждения разворота ограничивается некоторой заданной величиной, в частности радиусом разворота.

Азимут точки окончания траектории от исполняемой навигационной точки, определяющий координаты точки окончания траектории ( $BL, LE$ ):

$$AE = \Psi E + \pi.$$

В случае путевого участка комбинированного способа полета по траектории или выхода на точку касания заданной окружности траектория оканчивается в точке касания окружности конечного разворота на исполняемую точку. Дальность и азимут точки окончания траектории ( $DE, AE$ ), отсчитываемые от исполняемой навигационной точки, определяющие координаты точки окончания траектории ( $BE, LE$ ):

$$DE = RF \cdot \sqrt{2 \cdot (1 + \cos(A0F - AF0 + \Psi D - AF))};$$

$$AE = \arccos(DE/RF/2).$$

Траектория полета по дуге строится от точки выхода на дугу до исполняемой навигационной точки. Координаты точки выхода на дугу ( $BE, LE$ ) определяются расчетным азимутом точки выхода на дугу от центра и дальностью, равной радиусу дуги. Азимут точки выхода на дугу от центра дуги

$$A0 = \Psi D + L2 - \pi/2 \cdot TDF.$$

Азимут центра разворота по заданной дуге до исполняемой точки

$$A3 = A0 + \pi.$$

Угол разворота по заданной дуге

$$L3 = TDF \cdot L30,$$

где  $L30 = TDF \cdot (AF - A0)$  в диапазоне  $[0; 2\pi]$ .

Азимут окончания траектории полета по дуге

$$\Psi E = AF + \pi/2 \cdot TDF \text{ в диапазоне } [-\pi; \pi].$$

### Прерывание траектории

Прерывание траектории полета по линии пути определяется условием

$$S0 - SE < 0.$$

Прерывание траектории полета прямо на точку определяется условием

$$|TD \cdot R - TDF \cdot RF| > DC \text{ или } S0 - SE < 0.$$

Прерывание траектории полета по дуге определяется условием

$$|L3| > (2\pi - \pi/12).$$

Выполнение условий прерывания означает невозможность выхода на траекторию линии пути до достижения точки окончания траектории. При этом данная траектория игнорируется, и ее расчет не производится.

### Заключение

Построение маршрута полета летательного аппарата в горизонтальной плоскости для отображения на бортовых индикаторах обеспечивается преобразованием заданных траекторий, составляющих маршрут, определенный полетным заданием (планом полета), в фиксированный массив данных траекторий. Массив данных содержит определенный набор расчетных точек в геодезической системе координат, соединенных друг с другом либо дугой, либо отрезком.

При этом любая заданная траектория полета воздушного судна (в том числе траектория зональной навигации) может быть представлена в виде одной или нескольких определенных типовых траекторий: линия пути, прямо на точку или полет по дуге. Данное представление унифицирует алгоритмы формирования информации для отображения на индикаторах навигационной обстановки и оптимизирует набор расчетных данных для управления полетом по траектории в горизонтальной плоскости.

### Литература

1. Производство полетов воздушных судов. Т. 1: Правила производства полетов. Doc 8168. — Монреаль: ИКАО, 2006. <http://www.icao.int> (дата обращения: 12.05.2015).
2. Производство полетов воздушных судов. Т. 2: Построение схем визуальных полетов и полетов по приборам. Doc 8168. — Монреаль: ИКАО, 2006. <http://www.icao.int> (дата обращения: 12.05.2015).
3. Minimum Aviation System Performance Standards: Required Navigation Performance for Area Navigation. RTCA DO-236B. (EUROCAE ED-75). <http://www.rtca.org> (дата обращения: 12.05.2015).
4. Global Positioning System. Standard Positioning Service. Performance Standard. Department of Defense USA. Washington. DC 20301-6000, Feb. 2007. <http://www.gps.gov> (дата обращения: 07.06.2014).



5. Aeronautical Information Services Manual. Doc 8126-AN/872. <http://www.icao.int> (дата обращения: 12.05.2015).
6. **Вовк В. И., Липин А. В., Сарайский Ю. Н.** Зональная навигация. — СПб.: Академия ГА, 2004. — 127 с.
7. Организация воздушного движения. Doc 4444-RAC/501/12. — Монреаль: ИКАО, 2007. <http://www.icao.int> (дата обращения: 12.05.2015).
8. **Гриневиц А. С., Музалев А. А., Ройзензон А. Л.** Руководство по построению аэродромных схем и определению безопасных высот пролета препятствий. Изд. 3-е, доп. — СПб.: Министерство транспорта РФ, 1998. — 300 с.
9. **Щепилов Ю. Н.** Построение аэродромных схем: учеб. пособие. — СПб.: СПбГУ ГА, 2013. — 120 с.
10. Performance-based Navigation (PNB) Manual. Vol. I: Concept and Implementation Guidance. Doc 9613. — Montreal: ICAO, 2008. <http://www.icao.int> (дата обращения: 12.05.2015).
11. Performance-based Navigation (PNB) Manual. Vol. II: Implementing RNAV and RNP. Doc 9613. — Montreal: ICAO, 2008. <http://www.icao.int> (дата обращения: 12.05.2015).
12. Cockpit Display System Interfaces to User Systems. ARINC Specification 661. <http://www.aviation-ia.com> (дата обращения: 24.11.2014).
13. **Парамонов П. П.** и др. Реализация структуры данных, используемых при формировании индикационного кадра в бортовых системах картографической информации/ П. П. Парамонов, П. В. Коновалов, И. О. Жаринов, Ю. А. Кирсанова, С. Б. Уткин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2. С. 165–167.
14. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Бортовые средства отображения информации на плоских жидкокристаллических панелях: учеб. пособие. — СПб.: ГУАП, 2005. — 144 с.
15. **Костишин М. О.** и др. Оценка точности визуализации местоположения объекта в геоинформационных системах и системах индикации навигационных комплексов пилотируемых летательных аппаратов/ М. О. Костишин, И. О. Жаринов, О. О. Жаринов, В. А. Нечаев, В. Д. Суслев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1. С. 87–93.
16. **Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О., Тарасов П. Ю.** Структурный анализ и синтез графических изображений на экранах современных средств бортовой индикации на плоских жидкокристаллических панелях // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 5. С. 50–57.
17. **Парамонов П. П.** и др. Принципы формирования и отображения массива геоинформационных данных на экран средств бортовой индикации/ П. П. Парамонов, М. О. Костишин, И. О. Жаринов, В. А. Нечаев, С. А. Сударчиков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6. С. 136–142.
18. Navigation System Data Base. ARINC Specification 424. <http://www.aviation-ia.com> (дата обращения: 24.11.2014).
19. Guidance Material for Design of Terminal Procedures for Area Navigation (DME/DME, B-GNSS, Baro-VNAV & RNP-RNAV). — Eurocontrol, March 2003. — 217 с.
20. Сборники аэронавигационной информации. ЦАИ ГА России. <http://www.caiga.ru> (дата обращения: 21.04.2014).
21. **Липин А. В., Ключников Ю. И.** Применение зональной навигации при обслуживании воздушного движения. Зональная навигация. — СПб.: Университет ГА, 2011. — 79 с.
22. **Харин Е. Г.** Комплексная обработка информации навигационных систем летательных аппаратов. Опыт многолетнего практического применения. — М.: Изд-во МАИ, 2002. — 264 с.

UDC 629.051

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.40

**Forming Route Trajectories for Airborne Multi-Function Displays**Markelov V. V.<sup>a</sup>, Senior Software Engineer, [vvmarkel@gmail.com](mailto:vvmarkel@gmail.com)Kostishin M. O.<sup>a, b</sup>, Post-Graduate Student, Engineer, [maksim@kostishin.com](mailto:maksim@kostishin.com)Zharinov I. O.<sup>a, b</sup>, Dr. Sc., Tech., Chef of Department, Chief of Learning-Scientist Center, [igor\\_rabota@pisem.net](mailto:igor_rabota@pisem.net)Nechaev V. A.<sup>a, b</sup>, Assistance of Professor, Mail Constructor, [nil-12@mail.ru](mailto:nil-12@mail.ru)<sup>a</sup>Saint-Petersburg Scientific Design Bureau «Electroavtomatika», 40, Marshala Govorova St., 198095, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>b</sup>Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverksky Pr., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** To ensure that the aircraft crew efficiently follows the specified flight plan, the flight route trajectory is mapped onto airborne multi-function displays. This requires specialized mathematical tools which would transform the flight plan data and visualize it as a predictable trajectory of the aircraft in the horizontal plane. **Purpose:** The goal is to develop algorithms for building aircraft route trajectories in the horizontal plane, based on the unification of common trajectories. The algorithms should be implemented on airborne computer systems under limited computing resources. **Results:** Algorithms have been built for the formation and

calculation of route trajectories and their visual output. A flight trajectory is drawn on an airborne multi-function display as a series of graphic primitives in accordance with the route data array. The array is generated by the on-board software, using the information provided in the flight mission in Jeppesen database format or similar. When building the array, the given route is reduced to the formats of three standard predefined trajectories. Each of the three has a standard description and an algorithm for calculating the parameters which form an array of the data to display. **Practical relevance:** The obtained algorithms which form the route trajectories unify the algorithms which generate the information to display and optimize the calculated data in order to control the flight path in the horizontal plane.

**Keywords** — Aircraft Route Trajectory, Navigation Conditions, Area Navigation.

## Reference

1. *Proizvodstvo poletov vozduzhnykh sudov. T. 1. Pravila proizvodstva poletov* [Procedures for Air Navigation Services — Aircraft Operations. Vol. 1 (PANS-OPS)]. Doc 8168. Available at: <http://www.icao.int> (accessed 12 May 2015).
2. *Proizvodstvo poletov vozduzhnykh sudov. T. 2. Postroenie skhem vizual'nykh poletov i poletov po priboram* [Procedures for Air Navigation Services — Aircraft Operations. Vol. 2 (PANS-OPS)]. Doc 8168. Available at: <http://www.icao.int> (accessed 12 May 2015).
3. *Minimum Aviation System Performance Standards: Required Navigation Performance for Area Navigation*. RTCA DO-236. (EUROCAE ED-75). Available at: <http://www.rtca.org> (accessed 12 May 2015).
4. *Global Positioning System. Standard Positioning Service. Performance Standard*. Department of Defense USA. Washington, DC 20301-6000, Feb. 2007. Available at: <http://www.gps.gov> (accessed: 07 June 2014).
5. *Aeronautical Information Services Manual*. Doc 8126-AN/872. Available at: <http://www.icao.int> (accessed 12 May 2015).
6. Vovk V. I., Lipin A. V., Sarayskiy Yu. N. *Zonal'naiia navigatsiia* [Area Navigation]. Saint-Petersburg, Akademia grazhdanskoi aviatsii Publ., 2004. 127 p. (In Russian).
7. *Organizatsiia vozdušnogo dvizheniia* [Rules of the Air and Air Traffic Services]. Doc 4444-RAC/501/12. ICAO. Available at: <http://www.icao.int> (accessed 12 May 2015).
8. Grinevich A. S., Muzalev A. A., Roynozov A. L. *Rukovodstvo po postroeniui aerodromnykh skhem i opredeleniui bezopasnykh vysot proleta prepiatstviu* [Development of Terminal Procedures and Minimum Obstacle Clearance Manual]. Saint-Petersburg, Ministerstvo transporta RF Publ., 1998. 300 p. (In Russian).
9. Shchepilov Yu. N. *Postroenie aerodromnykh skhem* [Development of Terminal Procedures]. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet grazhdanskoi aviatsii Publ., 2013. 120 p. (In Russian).
10. *Performance-based Navigation (PNB) Manual. Vol. I. Concept and implementation guidance*. Doc 9613. Montreal, ICAO, 2008. Available at: <http://www.icao.int> (accessed 12 May 2015).
11. *Performance-based Navigation (PNB) Manual. Vol. II. Implementing RNAV and RNP*. Doc 9613. Montreal, ICAO, 2008. Available at: <http://www.icao.int> (accessed 12 May 2015).
12. *Cocpit Display System Interfaces to User Systems. ARINC specification 661*. Available at: <http://www.aviation-ia.com> (accessed 24 November 2014).
13. Paramonov P. P., Konovalov P. V., Zharinov I. O., Kirsanova Ju. A., Utkin S. B. Implementation of Data Structure in Indication Frame Formation for onboard Geospatial Data Computer Systems. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2, pp. 165–167 (In Russian).
14. Zharinov I. O., Zharinov O. O. *Bortovye sredstva otobrazheniia informatsii na ploskikh zhidkokristallicheskiikh paneliakh* [Onboard Display on Flat Liquid Crystal Panels]. Saint-Petersburg, Gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniia Publ., 2005. 144 p. (In Russian).
15. Kostishin M. O., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Nechaev V. A., Suslov V. D. Accuracy Evaluation of the Object Location Visualization for Geo-information and Display Systems of Manned Aircraft Navigation Complexes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2014, no. 1, pp. 87–93 (In Russian).
16. Paramonov P. P., Il'chenko Yu. A., Zharinov I. O., Tarasov P. Yu. Structural Analysis and Synthesis of Graphic Images on the Screens of Modern on-board Display on Flat Liquid Crystal Panels. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2004, no. 5, pp. 50–57 (In Russian).
17. Paramonov P. P., Kostishin M. O., Zharinov I. O., Nechaev V. A., Sudarchikov S. A. Formation and Display Principles for an Array of Geoinformation Data by means of onboard Display Screen. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 6, pp. 136–142 (In Russian).
18. *Navigation System Data Base. ARINC Specification 424*. Available at: <http://www.aviation-ia.com> (accessed 24 November 2014).
19. *Guidance Material for Design of Terminal Procedures for Area Navigation (DME/DME, B-GNSS, Baro-VNAV & RNP-RNAV)*. Eurocontrol, March 2003. 217 p.
20. *Sborniki aeronavigatsionnoi informatsii* [Aeronautical Information Publications]. Tsentr aeronavigatsionnoi informatsii grazhdanskoi aviatsii Rossii Publ. (In Russian). <http://www.caiga.ru> (accessed 21 April 2014).
21. Lipin A. V., Klyuchnikov Yu. I. *Primenenie zonal'noi navigatsii pri obsluzhivanii vozdušnogo dvizheniia. Zonal'naiia navigatsiia* [Use of Area Navigation in Airtraffic Service. Area Navigation]. Saint-Petersburg, Universitet grazhdanskoi aviatsii Publ., 2011. 79 p. (In Russian).
22. Kharin E. G. *Kompleksnaia obrabotka informatsii navigatsionnykh sistem letatel'nykh apparatov. Opyt mnogoletnego prakticheskogo primeneniia* [Complex Information Processing of Aircraft Navigation Systems. The Experience of Many Years of Practical Application]. Moscow, Moskovskii aviatsionnyi institut Publ., 2002. 264 p. (In Russian).