

Г.А. СОЛОВЬЕВ, В.А. ЧУГУНОВА  
**МЕТОД НАВЕДЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА  
НАЗЕМНЫЕ ОБЪЕКТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БРЛС С САР**

---

*Соловьев Г.А., Чугунова В.А. Метод наведения летательных аппаратов на наземные объекты с использованием БРЛС с САР.*

**Аннотация.** Рассмотрен вариант реализации алгоритма траекторного управления летательными аппаратами (ЛА) при решении задачи их наведения на наземные объекты с использованием бортовых радиолокационных средств (БРЛС) с синтезированием антенного раскрыва (САР).

**Ключевые слова:** синтезирование антенного раскрыва (САР), бортовые радиолокационные средства (БРЛС), наведение летательных аппаратов, траектория.

*Solovyev G.A., Chugunova V.A. The method of aircraft guidance at the ground elements using airborne radar aids with SAR.*

**Abstract.** An aircraft path control algorithm in solving a problem of ground elements guidance using airborne radar with synthetic aperture (SAR) was considered.

**Keywords:** synthetic aperture radar (SAR), airborne radar, aircraft guidance, path.

---

**1. Введение.** Синтезирование антенного раскрыва (САР) является одним из способов, обеспечивающих улучшение радиолокационной наблюдаемости наземных объектов (НО) при самонаведении на эти объекты летательных аппаратов (ЛА) с использованием их бортовых радиолокационных средств (БРЛС). При этом считается, что радиолокационная наблюдаемость наземных объектов в процессе наведения ЛА с использованием БРЛС с САР поддерживается на постоянном уровне в том случае, когда ЛА приближается к наземному объекту по криволинейной траектории, обеспечивающей стабилизацию линейного разрешения формируемых радиолокационных изображений.

Варианты решения задачи формирования траекторий полета ЛА, обеспечивающих постоянство азимутального линейного разрешения радиолокационных изображений (РЛИ), получаемых с использованием САР, для условий горизонтального полета ЛА приведены в [1, 2, 3].

При наведении ЛА на наземные объекты по наклонным траекториям за счет вертикальной составляющей скорости полета ЛА, возможно возникновение искажений синтезируемых РЛИ наземных объектов, проявляющихся в ухудшении линейного разрешения этих изображений и их развороте.

Цель настоящей работы — разработка алгоритма траекторного управления ЛА, наводящихся по наклонным траекториям с использованием БРЛС с САР, обеспечивающего при поддержании постоянства

заданного линейного разрешения формируемых РЛИ по дальности минимизацию искажений этих изображений, возникающих за счет вертикальной составляющей скорости полета ЛА, а также стабилизацию линейного разрешения РЛИ по азимуту.

**2. Описание и обоснование алгоритма.** Известно, что доплеровская частота радиолокационного сигнала, отраженного от неподвижного наземного точечного объекта, наблюдаемого с борта летательного аппарата (ЛА), зависит от величины скорости ЛА, определяемой в некоторой неподвижной земной системе координат, и угла отклонения линии визирования этого объекта от направления вектора указанной скорости летательного аппарата. Значение этой частоты определяется соотношением:

$$F_d = \frac{2 V_r}{\lambda} = \frac{2 V \cos \varphi}{\lambda}, \quad (1)$$

где:  $V_r$  — скорость сближения носителя БРЛС (ЛА) с наблюдаемым объектом (радиальная скорость);

$V$  — скорость ЛА относительно неподвижной земной системы координат;

$\varphi$  — угол отклонения линии визирования наблюдаемого объекта от вектора скорости ЛА;

$\lambda$  — длина волны зондирующих сигналов БРЛС.

Определив с использованием БРЛС с САР значение  $F_d$  доплеровской частоты радиолокационных сигналов, отраженных от наземного точечного объекта, зная величину скорости полета ЛА, очевидно, можно получить оценку абсолютного значения угла  $\varphi$ :

$$|\varphi| = \arccos \left( \frac{\lambda F_d}{2 V} \right). \quad (2)$$

Рассматривая  $F_d$  как функцию двух углов, соотношение (1) можно записать в виде:

$$F_d(\varphi_r, \varepsilon) = \frac{2 (V_{\Pi} \cos \varphi_r \cos \varepsilon + V_Y \sin \varepsilon)}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $\varphi_r$  — азимутальный угол отклонения проекции линии визирования наблюдаемого объекта на горизонтальную плоскость XOZ (нормальной подвижной системы координат (СК) OXYZ) — земную поверхность, как это показано на рис. 1, от проекции вектора скорости ЛА на эту же плоскость, совпадающей по направлению с осью OX;

$\varepsilon$  — угол наклона линии визирования наблюдаемого наземного точечного объекта;

$V_{\Pi}$  — горизонтальная (путевая) составляющая скорости полета ЛА;

$V_Y$  — вертикальная составляющая скорости полета ЛА;

$$V_{\Pi} = V \cos \Theta, \quad V_Y = V \sin \Theta; \quad (4)$$

$\Theta$  — угол наклона вектора скорости ЛА  $\left( \operatorname{tg} \Theta = \frac{V_Y}{V_{\Pi}} \right)$ .

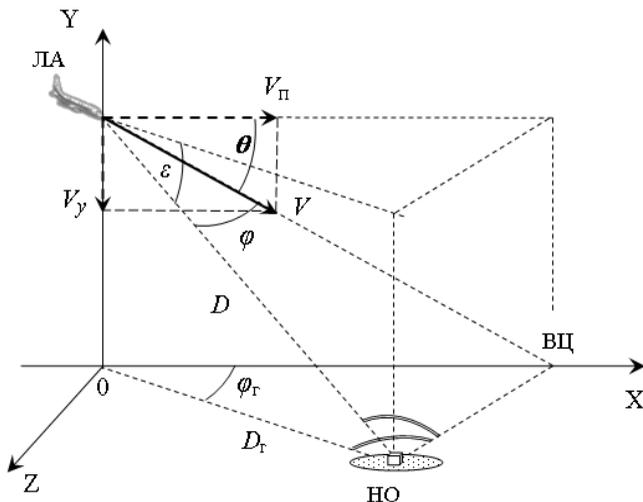


Рис. 1. Геометрическое представление визирования НО БРЛС с САР.

Приравнявая (1) и (3), нетрудно показать, что углы  $\phi_{\Gamma}$  и  $\phi$  связаны между собой соотношением:

$$\phi_{\Gamma} = \arccos \left( \frac{\cos \phi}{\cos \Theta \cos \varepsilon} - \operatorname{tg} \Theta \operatorname{tg} \varepsilon \right). \quad (5)$$

С использованием разложения (3) в кратный ряд Тейлора [4], в его линейном приближении, для точки на земной поверхности, направление на которую отстоит от направления на рассматриваемый точечный наземный объект на малые углы  $\Delta\phi_{\Gamma}$  в горизонтальной плоскости и  $\Delta\varepsilon$  в вертикальной плоскости можно записать:

$$F_d(\varphi_{\Gamma} + \Delta\varphi_{\Gamma}, \varepsilon + \Delta\varepsilon) = F_d(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon) + \Delta F_d(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon, \Delta\varphi_{\Gamma}) + \Delta F_d(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon, \Delta\varepsilon), \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta F_d(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon, \Delta\varphi_{\Gamma}) &= \frac{\partial F_d(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon)}{\partial \varphi_{\Gamma}} \Delta\varphi_{\Gamma}, \\ \Delta F_d(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon, \Delta\varepsilon) &= \frac{\partial F_d(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon)}{\partial \varepsilon} \Delta\varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

величины, характеризующие изменение доплеровской частоты отраженного сигнала при смещении направления визирования рассматриваемого наземного объекта соответственно на угол  $\Delta\varphi_{\Gamma}$  в горизонтальной плоскости и угол  $\Delta\varepsilon$  в вертикальной плоскости. Для  $\Delta\varphi_{\Gamma}$ ,  $\Delta\varepsilon$ , с учетом их предполагаемой малости, справедливо:

$$\Delta\varphi_{\Gamma} = \frac{\Delta l}{D_{\Gamma}}, \quad \Delta\varepsilon = -\frac{\Delta d \sin \varepsilon}{D}, \quad (8)$$

где:  $\Delta l$  — линейное азимутальное отклонение наблюдаемого объекта на земной поверхности, соответствующее  $\Delta\varphi_{\Gamma}$ . Знак  $\Delta l$  определяется знаком  $\Delta\varphi_{\Gamma}$ ;

$\Delta d$  — линейное отклонение наблюдаемого объекта на горизонтальной плоскости (земной поверхности) по направлению горизонтальной проекции линии визирования объекта, соответствующее  $\Delta\varepsilon$ , как показано на рис. 2.

$D$ ,  $D_{\Gamma}$  соответственно дальность от ЛА до наземного объекта и горизонтальная дальность от ЛА до наземного объекта.

Из (5), с учетом (3) и (6) можно записать:

$$\Delta F_d(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon, \Delta l) = -\frac{2V \cos \Theta \sin \varphi_{\Gamma} \Delta l \cos \varepsilon}{\lambda D_{\Gamma}}, \quad (9)$$

$$\Delta F_d(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon, \Delta d) = \frac{2V \Delta d \sin \varepsilon}{\lambda D} (\cos \Theta \cos \varphi_{\Gamma} \sin \varepsilon - \sin \Theta \cos \varepsilon), \quad (10)$$

Данными выражениями определяется разность:

$$\Delta F_d(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon, \Delta l, \Delta d) = \Delta F_d(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon, \Delta l) + \Delta F_d(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon, \Delta d), \quad (11)$$

доплеровских частот сигналов, отраженных от двух точечных наземных объектов, наблюдаемых в условиях, характеризующихся параметрами  $(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon, \Theta, V, D, \lambda)$ , и отстоящих друг от друга на величины  $\Delta d$  и  $\Delta l$ .

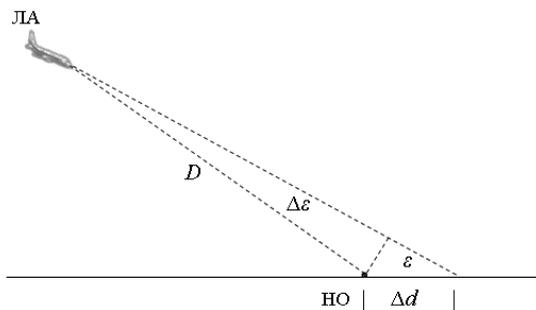


Рис. 2. Взаимосвязь углового и линейного элементов разрешения по дальности.

Также выражение (11) в первом приближении характеризует ширину доплеровского спектра радиолокационных сигналов, отражаемых малоразмерным наземным объектом или участком местности, имеющим протяженность  $\Delta d$  и  $\Delta l$  соответственно по горизонтальной дальности, и азимуту при его радиолокационном наблюдении с борта ЛА.

Если величина  $\Delta d$  соответствует величине элемента разрешения БРЛС по дальности, формируемого за счет амплитудной или внутриимпульсной модуляции зондирующих сигналов БРЛС, то при наблюдении наземного объекта, имеющего пренебрежимо малую протяженность по азимуту ( $\Delta l=0$ ), величина  $\Delta F_d(\varphi_r, \varepsilon, \Delta d)$  определяет степень азимутальной размытости радиолокационной отметки от наблюдаемого объекта на РЛИ, формируемом с использованием САР.

Если величина  $\Delta d$  превышает величину элемента разрешения БРЛС по дальности, формируемого за счет амплитудной или внутриимпульсной модуляции зондирующих сигналов БРЛС, то величина  $\Delta F_d(\varphi_r, \varepsilon, \Delta d)$  также определяет степень разворота радиолокационного изображения этого объекта в частотной области.

Оба указанных эффекта могут приводить к искажению радиолокационных изображений наземных объектов, формируемых БРЛС ЛА в полете при использовании САР.

Данные искажения, очевидно, отсутствуют при выполнении условия:

$$\Delta F_d(\varphi_T, \varepsilon, \Delta d) = 0. \quad (12)$$

Выполнение этого условия, как следует из (10), обеспечивается в том случае, когда:

$$\cos \Theta \cos \varphi_T \sin \varepsilon - \sin \Theta \cos \varepsilon = 0 \quad (13)$$

или при заданных  $\varphi_T$  и  $\varepsilon$  угол наклона траектории полета ЛА в процессе синтезирования антенного раскрыва:

$$\Theta = \arctg(\cos \varphi_T \operatorname{tg} \varepsilon). \quad (14)$$

В этом случае горизонтальная проекция (О – НО) линии визирования наблюдаемого точечного наземного объекта является касательной к изодопе (линии равного доплеровского сдвига частоты [5]), проходящей через этот объект в горизонтальной плоскости (по земной поверхности), а вектор скорости ЛА в плоскости ХОУ направлен в точку (ВЦ), как показано на рис. 1 ( $\varepsilon \neq 0$ ), образованную пересечением перпендикуляра (НО – ВЦ) к горизонтальной проекции (О – НО), проходящего через наземный объект и принадлежащего горизонтальной плоскости, с вертикальной плоскостью ХОУ, которой принадлежит вектор скорости летательного аппарата.

Соотношение (14) отражает те условия формирования траектории полета ЛА в процессе его наведения на наземный объект, при которых БРЛС с САР обеспечивает формирование РЛИ наземного объекта с наименьшими искажениями, возникающими за счет наличия вертикальной составляющей скорости полета ЛА.

Помимо обеспечения минимальных искажений радиолокационных изображений, формируемых БРЛС с САР в процессе наведения ЛА на наземный объект, целесообразно осуществление стабилизации линейной разрешающей способности этих изображений по азимуту и горизонтальной дальности. При этом существенно упрощаются процедуры обработки РЛИ, с использованием которых осуществляется наведение ЛА на наземный объект.

Стабилизация требуемой разрешающей способности БРЛС с САР по горизонтальной дальности ( $\Delta d_T = \text{const}$ ) при использовании в БРЛС модулированных зондирующих сигналов, как следует из рис. 2, требует поддержания постоянства угла визирования наземного объекта в вертикальной плоскости ( $\varepsilon = \varepsilon_T = \text{const}$ ).

При обеспечении постоянства угла визирования наземного объекта в вертикальной плоскости снижаются уровень и частота флуктуаций радиолокационных сигналов, отраженных от этого объекта, обуслов-

ленных изрезанностью его диаграммы обратного рассеяния в вертикальной плоскости.

В соответствии с [6], (а также из (9)) для стабилизации требуемого линейного азимутального разрешения ( $\Delta l_T = const$ ), формируемого РЛИ при выполнении условий визирования наземного объекта, представленных на рис. 1, требуется обеспечивать отклонение направления линии визирования этого объекта от направления вектора скорости ЛА в плоскости, образуемой вектором скорости ЛА и указанной линией визирования (плоскости визирования наземного объекта):

$$\varphi_{IT} = \arcsin \left( \frac{\lambda D}{2 V_{II} T_C \Delta l_T} \right), \quad (15)$$

где  $T_C$  — время синтезирования антенного раскрыва БРЛС;

$V_{II}$  — путевая скорость ЛА относительно неподвижной земной системы координат.

При этом, из (14), требуемый угол наклона вектора скорости ЛА в процессе синтезирования антенного раскрыва БРЛС:

$$\Theta_T = \arctg(\cos(\varphi_{IT}) \operatorname{tg}(\varepsilon_T)) \quad (16)$$

Значения  $\varphi_{IT}$ ,  $\Theta_T$ , получаемые с использованием соотношений (15) и (16), определяют требуемую траекторию полета ЛА в процессе его наведения на наземный объект, при условии обеспечения  $\varepsilon_T = const$ . Траекторию, обеспечивающую минимальные искажения радиолокационных изображений, формируемых БРЛС с САР в полете, и стабилизацию требуемого линейного разрешения этих изображений, как по горизонтальной дальности, так и по азимуту.

Несоответствие оценок значений параметров ( $\varphi_T$ ,  $\varepsilon$ ,  $\Theta$ ), характеризующих траекторию полета ЛА в процессе его наведения на наземный объект, их требуемым значениям ( $\varphi_{IT}$ ,  $\varepsilon_T$ ,  $\Theta_T$ ) обуславливает необходимость осуществления соответствующего траекторного управления полетом ЛА.

При реализации рассматриваемого алгоритма наведения ЛА на наземный объект могут использоваться различные известные методы [3], [7] формирования сигналов управления ( $\Delta_G$ ,  $\Delta_B$ ) летательным аппаратом в горизонтальной и вертикальной плоскостях, в том числе соответствующие методу прямого наведения, путевому методу, методу пропорциональной навигации и др.

Во всех случаях применения этих методов, в процессе наведения ЛА на наземный объект с использованием рассматриваемого способа, должна осуществляться оценка текущих отклонений (невязок): угла между проекциями на горизонтальную плоскость линии визирования наземного объекта и вектора скорости ЛА

$$\Delta\varphi_{\Gamma} = \varphi_{\Gamma T} - \varphi_{\Gamma} , \quad (17)$$

угла наклона линии визирования наземного объекта в вертикальной плоскости

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\Gamma} - \varepsilon , \quad (18)$$

угла наклона вектора скорости ЛА

$$\Delta\Theta = \Theta_{\Gamma} - \Theta \quad (19)$$

от их требуемых значений.

При формировании сигналов управления  $(\Delta_{\Gamma}, \Delta_B)$  ЛА в горизонтальной и вертикальной плоскостях следует учитывать, что угол  $\varepsilon$  наклона линии визирования наземного объекта в вертикальной плоскости изменяется как при управлении ЛА в горизонтальной плоскости, так и при управлении ЛА в вертикальной плоскости. Отклонение  $(\Delta\varepsilon)$  этого угла от требуемого значения, обусловленное действием сигналов управления в горизонтальной плоскости, как и отклонение  $(\Delta\Theta)$  от требуемого значения угла наклона вектора скорости ЛА должно компенсироваться соответствующим сигналом управления в вертикальной плоскости.

С учетом этого формирование сигналов управления  $(\Delta_{\Gamma}, \Delta_B)$  ЛА может рассматриваться на основе следующих функциональных связей:

$$\Delta_{\Gamma} = f_{\Gamma}(\Delta\varphi_{\Gamma}), \quad \Delta_B = f_B(\Delta\varepsilon, \Delta\Theta) . \quad (20)$$

В качестве иллюстрации рассмотрим алгоритм формирования сигналов управления  $(\Delta_{\Gamma}, \Delta_B)$  ЛА по методу пропорциональной навигации со смещением и методу прямого наведения [7, стр.59], полагая, что регулярные и флуктуационные ошибки, возникающие при формировании оценок  $(\varphi_{\Gamma}, \varepsilon, \Theta)$ , отсутствуют, ЛА стабилизирован по крену, а оценка текущих отклонений  $(\Delta\varphi_{\Gamma}, \Delta\varepsilon, \Delta\Theta)$  осуществляется с периодом, соответствующим времени  $T_C$  синтезирования апертуры антенны БРЛС.

В этом случае сигнал управления ЛА в горизонтальной плоскости

$$\Delta_{\Gamma} = N(-\dot{D}_{\Gamma})(\omega_{\Gamma} + \omega_{\Gamma C}) - \dot{J}_{\Gamma} , \quad (21)$$

где  $\omega_G$  — угловая скорость линии визирования наземного объекта в горизонтальной плоскости;

$\omega_{GC}$  — требуемое смещение угловой скорости линии визирования наземного объекта в горизонтальной плоскости;

$j_G$  — ускорение движения ЛА в горизонтальной плоскости.

При этом требуемое смещение  $\omega_{GC}$  угловой скорости линии визирования может быть определено следующим образом:

$$\omega_{GC} = \Delta\phi_G \frac{k_G}{T_C}, \quad (22)$$

где  $k_G$  — коэффициент, учитывающий способ формирования оценки  $\phi_G$  и, в том числе, временную задержку ее формирования при реализации САР в процессе приведения ЛА к наземному объекту.

Из (21) и (22) видно, что при приближении к наземному объекту и стремлении  $\phi_{GT}$  к нулю в горизонтальной плоскости обеспечивается пропорциональная навигация ЛА непосредственно по данным об угловой скорости линии визирования объекта.

При формировании по методу пропорциональной навигации со смещением движения ЛА в вертикальной плоскости сигнал управления

$$\Delta_B = N(-\dot{D})(\omega_B + \omega_{BC}) - j_B, \quad (23)$$

где  $\omega_B$  — угловая скорость линии визирования наземного объекта в вертикальной плоскости;

$\omega_{BC}$  — требуемое смещение угловой скорости линии визирования наземного объекта в вертикальной плоскости;

$j_B$  — ускорение движения ЛА в вертикальной плоскости.

При этом требуемое смещение  $\omega_{BC}$  угловой скорости может быть определено следующим образом:

$$\omega_{BC} = \Delta\Theta \frac{k_\Theta}{T_C} + \Delta\varepsilon \frac{k_\varepsilon}{T_C}, \quad (24)$$

где  $k_\varepsilon$ ,  $k_\Theta$  — весовые коэффициенты, учитывающие способ формирования оценок углов наклона линии визирования наземного объекта ( $\varepsilon$ ) и вектора скорости ЛА ( $\Theta$ ) при реализации САР БРЛС и, в том числе, временную задержку их формирования при реализации САР в процессе наведения ЛА на наземный объект, а также динамику изме-

нения значений углов  $\varepsilon$ ,  $\Theta$ , при воздействии сигналов управления ЛА в вертикальной плоскости, в том числе противофазность изменения  $\Theta$  и  $\varepsilon$  (при увеличении  $\Theta$  величина  $\varepsilon$  уменьшается и наоборот).

При формировании сигналов управления  $(\Delta_{\Gamma}, \Delta_B)$  ЛА по методу прямого наведения

$$\Delta_{\Gamma} = K_{\Gamma} \Delta\varphi_{\Gamma}, \quad \Delta_B = K_{\Theta} \Delta\Theta + K_{\varepsilon} \Delta\varepsilon, \quad (25)$$

где  $K_{\Gamma}$ ,  $K_{\varepsilon}$ ,  $K_{\Theta}$  — коэффициенты усиления невязок  $(\Delta\varphi_{\Gamma}, \Delta\varepsilon, \Delta\Theta)$ .

Для оценки эффективности рассматриваемого алгоритма наведения летательного аппарата на наземный объект было проведено его математическое моделирование. Целью моделирования являлось исследование возможностей рассматриваемого алгоритма наведения ЛА на наземный объект в части одновременного обеспечения требуемого линейного разрешения РЛИ, формируемых БРЛС с САР, по дальности и азимуту в горизонтальной плоскости и требуемой точности наведения ЛА.

В процессе моделирования для определения качества рассматриваемого алгоритма наведения ЛА на наземный объект оценивались следующие показатели:

- величина отклонения  $\Delta\varphi_{\Gamma}$  фактического значения угла  $\varphi_{\Gamma}^*$  между проекцией линии визирования наземного объекта на горизонтальную плоскость и проекцией вектора скорости ЛА на эту же плоскость от его требуемого значения:

$$\Delta\varphi_{\Gamma} = \varphi_{\Gamma T} - \varphi_{\Gamma}^*; \quad (26)$$

- величина отклонения фактического значения  $\varepsilon^*$  угла наклона линии визирования наземного объекта в вертикальной плоскости от требуемого:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\Gamma} - \varepsilon^*; \quad (27)$$

- величина отклонения фактического значения  $\Theta^*$  угла наклона траектории полета ЛА от требуемого:

$$\Delta\Theta = \Theta_{\Gamma} - \Theta^*. \quad (28)$$

В процессе моделирования в качестве показателей эффективности алгоритма наведения рассматривались оценки текущих линейных вертикального и горизонтального промахов  $(h_B, h_{\Gamma})$ . Указанные промахи определялись соответственно по соотношениям

$$h_B = \frac{D^2 \dot{\omega}_B}{(-\dot{D})}; \quad h_G = \frac{D_G^2 \dot{\omega}_G}{(-\dot{D}_G)}; \quad (29)$$

где  $\dot{D}$  — скорость сближения ЛА с наземным объектом;  $\dot{D}_G$  — скорость сближения ЛА с наземным объектом в горизонтальной плоскости.

**3. Математическое моделирование.** Исследования проводились посредством математического моделирования во времени процесса изменения пространственного положения ЛА в неподвижной нормальной земной системе координат наземного объекта — цели ( $OX_{Ц}Y_{Ц}Z_{Ц}$ , начало которой совмещено с наземным объектом так, как это показано на рис. 3.)

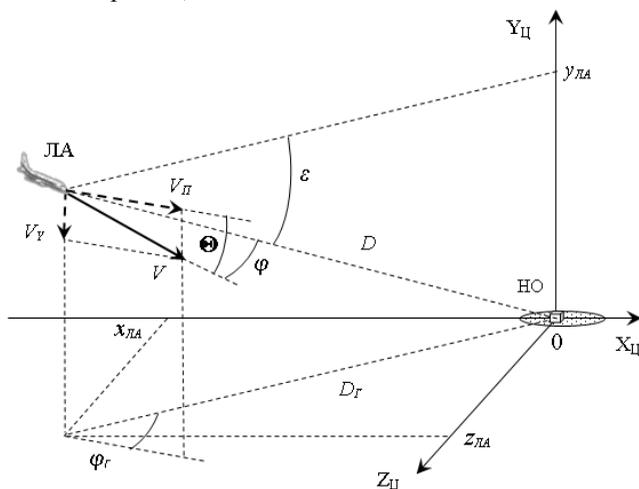


Рис. 3. Геометрическое представление процесса наведения ЛА в СК НО.

В том числе моделировались:  $V$  — скорость полета ЛА;  $D$ ,  $D_G$  — наклонная и горизонтальная дальности до наземного объекта; величина отклонения  $\Delta\varphi_G$  фактического значения угла  $\varphi_G^*$  между проекцией линии визирования наземного объекта на горизонтальную плоскость и проекцией вектора скорости ЛА на эту же плоскость;  $\varphi_{ГТ}$  — требуемый угол отклонения проекции линии визирования наземного объекта на горизонтальную плоскость от проекции вектора скорости ЛА на эту же плоскость;  $\varepsilon^*$  — фактическое значение угла

наклона линии визирования наземного объекта в вертикальной плоскости;  $\varepsilon_T$  — требуемое значение угла наклона линии визирования наземного объекта в вертикальной плоскости;  $\Theta^*$  — фактическое значение угла наклона траектории ЛА;  $\Theta_T$  — требуемое значение угла наклона траектории ЛА;  $\dot{D}$  — скорость сближения ЛА с наземным объектом;  $\dot{D}_Г$  — скорость сближения ЛА с наземным объектом в горизонтальной плоскости;  $\omega_B$  — угловая скорость линии визирования наземного объекта в плоскости нормального управления ЛА;  $\omega_Г$  — угловая скорость линии визирования наземного объекта в горизонтальной плоскости;  $\Delta_Г, \Delta_B$  — сигналы управления ЛА в горизонтальной и вертикальной плоскостях;  $j_Г, j_B$  — ускорения ЛА в горизонтальной и вертикальной плоскостях;  $h_Г, h_B$  — текущие линейные промахи в горизонтальной и вертикальной плоскостях управления ЛА.

При этом требуемое значение  $\Phi_{TT}$  угла отклонения проекции линии визирования наземного объекта от проекции вектора скорости ЛА вычислялось по (15), требуемое значение  $\Theta_T$  угла наклона траектории ЛА — по (16), смещение угловой скорости  $\omega_{ГC}$  линии визирования наземного объекта в горизонтальной плоскости — по (22), смещение угловой скорости  $\omega_{BC}$  линии визирования наземного объекта в вертикальной плоскости — по (22), сигналы управления ( $\Delta_Г, \Delta_B$ ) в горизонтальной и вертикальной плоскостях — соответственно по (21) и (23), показатели качества функционирования ( $\Delta\Phi_Г, \Delta\varepsilon, \Delta\Theta, h_Г, h_B$ ) рассматриваемого алгоритма — по (26), (27), (28), (29). Текущее местоположение ЛА определялось путем счисления координат в системе координат цели.

Результаты моделирования, приведенные на рисунках 4–9, получены в предположении, что начальное значение наклонной дальности от ЛА до наземного объекта  $D = 10000$  м, начальная скорость движения ЛА  $V = 350$  м/с, ускорение торможения ЛА составляет  $-5$  м/с<sup>2</sup> и является постоянным на всей траектории полета ЛА до окончания процесса наведения ЛА на наземный объект, завершение наведения ЛА на наземный объект осуществляется при уменьшении дальности до наземного объекта до 150 м, начальный угол наклона линии визирования наземного объекта  $\varepsilon = -40^\circ$ , требуемое разрешение формируемых

РЛИ по горизонтальной дальности  $\Delta d_T = 10$  м, требуемое линейное разрешение формируемых РЛИ по азимуту  $\Delta l_T = 10$  м, длина волны БРЛС ЛА  $\lambda = 4,0$  см, время синтезирования антенного раскрыва  $T_C = 128$  мс.

На рис. 4 приведена проекция полученной по результатам моделирования криволинейной траектории полета ЛА на горизонтальную плоскость нормальной земной системы координат цели, соответствующей рис. 3.

Зависимости, приведенные на рис. 5 отражают различия в значениях углов наклона линии визирования наземного объекта и вектора скорости ЛА в процессе его самонаведения на наземный объект, при которых обеспечиваются наилучшие условия синтезирования антенного раскрыва БРЛС.

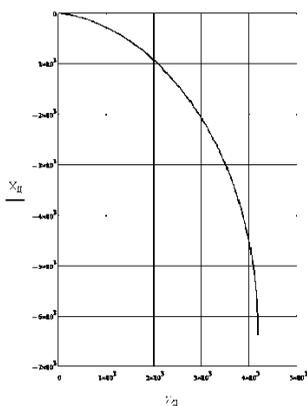


Рис. 4. Горизонтальная проекция траектории полета ЛА по результатам моделирования.

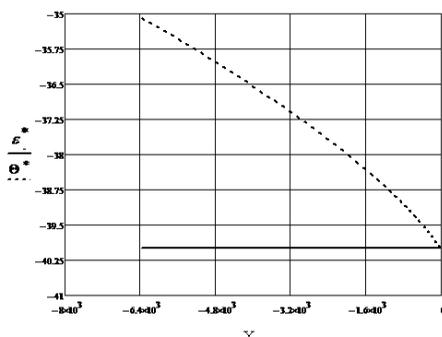


Рис. 5. График изменения угла наклона линии визирования НО и угла наклона вектора скорости ЛА.

Из зависимостей, приведенных (рис. 6, 7, 8) видно, что рассмотренный алгоритм траекторного управления летательными аппаратами при их самонаведении на наземные объекты с использованием БРЛС с синтезированием антенного раскрыва обеспечивает весьма малые значения отклонений величин  $\Phi_T^*$ ,  $\epsilon^*$ ,  $\Theta^*$  от их требуемых значений.

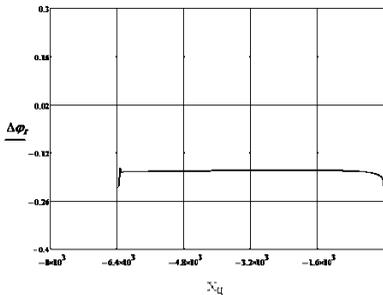


Рис. 6. Отклонение величины угла между линией визирования НО и вектором скорости ЛА от требуемого значения.

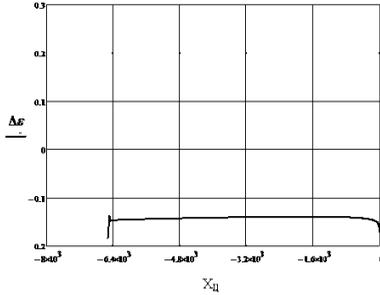


Рис. 7. Изменение «невязки» по углу наклона линии визирования НО.

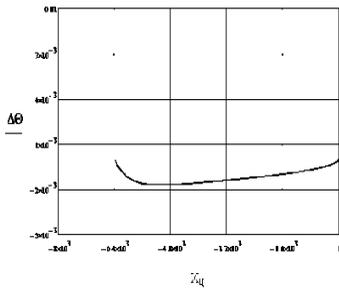


Рис. 8. Изменение «невязки» по углу наклона вектора скорости ЛА.

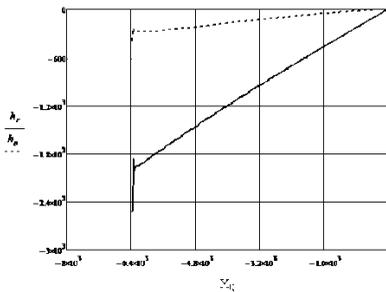


Рис. 9. Изменение оценок величин промахов ЛА в плоскостях наведения в процессе моделирования.

**4. Заключение.** Финальные значения расчетных промахов, изменение которых в процессе самонаведения ЛА показано на рис. 9, составили:  $h_B = -2,5$  м,  $h_H = -0,4$  м.

Таким образом, результаты проведенного математического моделирования подтверждают работоспособность рассмотренного способа наведения ЛА на наземный объект с использованием БРЛС с САР.

Использование этого способа не накладывает сколько-нибудь существенных дополнительных ограничений на элементную базу и воз-

можно при существующих характеристиках вычислителей БРЛС с САР по их быстродействию и объему памяти.

### **Литература:**

1. *Курилкин В.В., Меркулов В.И., Шуклин А.И.* Способ наведения летательных аппаратов на наземные объекты. Патент на изобретение № 2164654.
2. *Курилкин В.В., Меркулов В.И., Викулов О.В., Шуклин А.И.* Способ пропорционального наведения летательных аппаратов на наземные объекты. Патент на изобретение № 2148235.
3. *Меркулов В.И., Дрогалин В.В., Канащенков А.И.* и др. Авиационные системы радиоуправления. Т.2. Радиоэлектронные системы самонаведения / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2003. — 390с.
4. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. — М., Наука, 1974, с 146.
5. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника. Пер. с англ. (в четырех томах) Том 1. — М., Советское радио, 1976, с. 280, 281.
6. *Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю.* Теоретические основы построения радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2009, с. 143–152.
7. *Максимов М.В., Горюнов Г.И.* Радиоэлектронные системы самонаведения. — М.: Радио и связь. 1982. — 304с.

**Соловьев Геннадий Алексеевич** — к.т.н., директор НПК РЭС — Главный конструктор направления, ОАО «НПП «Радар-ммс». Область научных интересов: радиолокация, радионавигация, управление воздушным движением. Число научных публикаций — более 100. ОАО «НПП «Радар-ммс», ул. Новосельковская д.37, г. Санкт-Петербург, 197375, РФ, р.т. (8) (812) 600-04-52.

**Solovyev Gennadiy Alexeevich** — PhD in Technical Sciences, director of Research-and-Production Complex of Radio Electronic Systems — Chief Constructor of the Direction, Radar-mms. Province of scientific interests: radar-location, radio-navigation, air traffic control. The number of publications — over 100. Novoselkovskaya str., 37, St. Petersburg, 197375, Russia; Office phone: (8) (812) 600-04-52.

**Чугунова Вера Алексеевна** — ведущий инженер НПК РЭС, ОАО «НПП «Радар-ммс». Область научных интересов: радиолокация, математическое моделирование радиолокационных систем. Число научных публикаций — 8. ОАО «НПП «Радар-ммс», ул. Новосельковская д.37, г. Санкт-Петербург, 197375, РФ, р.т. (8) (812) 600-04-52.

**Chugunova Vera Alexeevna** — leading engineer of Research-and-Production Complex of Radio Electronic Systems, Radar-mms. Province of scientific interests: radar-location, mathematical modeling of radar systems. The number of publications — 8. Novoselkovskaya str., 37, St. Petersburg, 197375, Russia; Office phone: (8) (812) 600-04-52,

Рекомендовано лабораторией автоматизации научных исследований СПИИРАН.  
Статья поступила в редакцию 04.03.2013

## РЕФЕРАТ

*Соловьев Г.А., Чугунова В.А.* **Метод наведения летательных аппаратов на наземные объекты с использованием БРЛС с САР.**

В работе предложен алгоритм траекторного управления летательными аппаратами, наводимыми на наземные объекты с использованием бортовых радиолокационных средств с синтезированием антенного раскрыва. Предложенный алгоритм траекторного управления обеспечивает стабилизацию линейного разрешения радиолокационных изображений наземных объектов, формируемых бортовыми радиолокационными средствами с синтезированием антенного раскрыва, по азимуту при поддержании постоянства линейного разрешения этих изображений по дальности. Приведены результаты математического моделирования алгоритма траекторного управления.

## SUMMARY

*Solovyev G.A., Chugunova V.A.* **The method of aircraft guidance at the ground elements using airborne radar aids with SAR.**

An aircraft path control algorithm in solving a problem of ground elements guidance using airborne radar aids with synthetic aperture antenna (SAR) was suggested in the work. Proposed path control algorithm provides linear resolution stabilization of radar image of ground elements which are formed with airborne radar aids with synthetic aperture antenna in azimuth maintaining linear resolution constancy of these images in range. The results of mathematic simulation of path control algorithm have been provided.