



УДК 621.391.1: 629.7.05  
ГРНТИ 47.49.02

## НАВЕДЕНИЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА НАЗЕМНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ БОРТОВОГО ПЕЛЕНГОВАНИЯ

*В.А. УФАЕВ, доктор технических наук, старший научный сотрудник  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
М.П. БЕЛЯЕВ, кандидат технических наук  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Рассмотрены способы самонаведения по азимуту в горизонтальной плоскости и высоте полёта в вертикальной, а также по результатам двухмерного пеленгования с пикированием на цель. Приведены формулы расчёта параметров соответствующих глиссад, оценок пеленга по результатам текущего пеленгования и по оценочным координатам цели с применением критериев максимального правдоподобия и минимума расстояния до линий пеленга. Приведены формулы преобразования результатов и расчёта погрешностей двухмерного пеленгования с помощью объёмной решётки для произвольного пространственного положения носителя. Моделированием исследованы ошибки, вызванные отражением радиоволн от земной поверхности при полёте по глиссаде. Для контуров управления с заданной инерционностью и дискретностью измерений оценены вероятности наведения по результатам определения координат цели и текущих измерений, получены зависимости вероятности наведения от дальности до цели, темпа, ошибок пеленгования и скорости манёвра летательного аппарата.

*Ключевые слова:* двухмерное пеленгование, объёмная решётка, глиссада, отражение радиоволн, контур управления, ошибки измерений, вероятность наведения.

## THE UNMANNED AERIAL VEHICLE GUIDANCE AT A GROUND RADIATOR ON THE ON-BOARD DIRECTION FINDING RESULTS

*V. A. UFAEV, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
M.P. BELYAEV, Candidate of Technical Sciences  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The methods of guidance in azimuth in the horizontal plane and altitude in the vertical, as well as the results of two-dimensional direction finding with a dive at the target are considered. The formulas for calculating the parameters of the corresponding glideways, bearing estimates based on the results of the current bearing and the estimated coordinates of the target using the criteria of maximum likelihood and minimum distance to the bearing lines. Formula conversion results and calculate the errors of the two-dimensional direction finding by the three-dimensional lattice of arbitrary spatial position of the carrier. The errors caused by the reflection of radio waves from the earth's surface during the flight are investigated by simulation on the final approach. For control circuits with a given inertia and discreteness of measurements, the probabilities of guidance are estimated based on the results of determining the coordinates of the target and current measurements, the dependences of the guidance probability from the range to the target, pace, bearing errors and maneuver speed of the aircraft are obtained.

*Keywords:* two-dimensional direction finding, volume grid, glide path, radio waves reflection, control loop, measurement errors, targeting probability.



**Введение.** Потребность наведения беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на наземный излучатель возникает при автоматической посадке в улавливающее устройство, оборудованное приводным передатчиком [1], доразведке или уничтожении цели по её радиоизлучению.

**Актуальность.** Движением управляют по бортовым измерениям двухмерного пеленга цели (азимута и угла места), а также навигационно-пилотажных параметров летательного аппарата (углы ориентации в пространстве, координаты, скорость). Общие способы управления приведены, например, в [1–3], пеленгования в [4]. В настоящей работе сосредоточим внимание на мало исследованном заключительном этапе полёта по глиссаде, со снижением высоты по мере приближения к цели-излучателю. При этом учтём совокупность следующих факторов: отклонение плоскости носителя и бортового пеленгатора от горизонтального положения; отражение радиоволн от земной поверхности; относительно небольшие углы скольжения; дискретность измерений; инерционность отработки команд управления.

**Цель статьи** – исследование способов наведения на наземную цель с применением бортового пеленгатора при полёте по глиссаде.

Полагаем, что выполнено предварительное маневрирование с выходом в исходное горизонтальное положение курсом на цель на высоте и дальности, достаточной для завершения наведения. Задача состоит в завершении наведения при неизвестной дальности и направлении на цель.

Будем рассматривать вариант траекторного управления полётом с описанием движения в отсутствие аэродинамических возмущающих воздействий, как материальной точки в пространстве.

Взаимное положение БПЛА и цели определим [1] в земной системе координат (ЗСК) с центром в точке проекции цели на земную поверхность и опорным направлением в точку проекции БПЛА в начальный момент времени.

Пеленгование осуществляют в связанной системе координат (ССК), её начало в фазовом центре антенной системы пеленгатора, не усложняя – в центре летательного аппарата. Отсчёт положительных значений азимута  $\theta'$  осуществляют в плоскости крыла от оси, направленной к носовой части БПЛА, по часовой стрелке, углов места  $\beta'$  от этой плоскости вверх.

Пространственное положение БПЛА характеризуется координатами его центра в ЗСК и тремя углами, которые определяют положение ССК относительно промежуточной системы координат (ПСК): курс  $\psi$ , отсчёт положительных углов в горизонтальной плоскости от опорного направления против часовой стрелки, тангаж  $\Phi$ , от горизонта вверх, и крен  $\Gamma$ , по часовой стрелке вокруг оси летательного аппарата. ПСК образуют сдвигом ЗСК в центр летательного аппарата.

Для совместного использования информации о текущем пространственном положении БПЛА и результатов пеленгования переопределим последние в промежуточную систему координат. Азимут  $\theta$  здесь отсчитывают в горизонтальной плоскости от опорного направления, а угла места  $\beta$  относительно этой плоскости.

Определим вектор пеленга как единичный направляющий вектор из пункта пеленгования на излучатель. Применительно к такому определению, правило перехода получим на основе известных в аэродинамике преобразований путём определения исходного направляющего вектора, его преобразования в ПСК и перерасчёта двухмерного пеленга согласно его определению на заключительной стадии

$$w'_0 = \cos \beta' \cdot \cos \theta', \quad w'_1 = \sin \beta', \quad w'_2 = \cos \beta' \cdot \sin \theta', \quad (1)$$

$$w = A^T \times w', \quad (2)$$

$$\theta = \arg(w_0 + i \cdot w_2), \quad (3)$$



$$\beta = \arg\left(\sqrt{w_0^2 + w_2^2} + i \cdot w_1\right), \quad (4)$$

где  $w'$  – исходный вектор пеленга в ССК,  $w$  – преобразованный вектор пеленга в ПСК,  $A$  – матрица перехода. Индексами отмечены следующие составляющие векторов по осям систем координат: 0 – ордината, 1 – аппликата, 2 – абсцисса.

Матрица перехода [1, формула (1.10)] имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} \cos \Phi \times \cos \psi & \sin \Phi & -\cos \Phi \times \sin \psi \\ -\cos \Gamma \times \sin \Phi \times \cos \psi + \sin \Gamma \times \sin \psi & \cos \Gamma \times \cos \Phi & \cos \Gamma \times \sin \Phi \times \sin \psi + \sin \Gamma \times \cos \psi \\ \sin \Gamma \times \sin \Phi \times \cos \psi + \cos \Gamma \times \sin \psi & -\sin \Gamma \times \cos \Phi & -\sin \Gamma \times \sin \Phi \times \sin \psi + \cos \Gamma \times \cos \psi \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Обратное преобразование заданного в ПСК двухмерного пеленга  $(\theta, \beta)$ , в связанную систему осуществляют аналогично, взаимной заменой  $\theta' \leftrightarrow \theta$ ,  $\beta' \leftrightarrow \beta$ ,  $w' \leftrightarrow w$  и исключением в (2) операции Т транспонирования матрицы  $A$ .

Заменой координат вектора пеленга координатами антенн пеленгатора в связанной системе координат их пересчитывают посредством (1), (2), (5) в промежуточную систему (а дополнительным сдвигом и в ЗСК). Такое преобразование потребуется при последующем моделировании.

Оценим погрешности пеленгования после преобразований (1)–(5) применительно к объёмной решётке [4], состоящей из  $N$  антенн в горизонтальной плоскости с эквидистантным расположением на окружности радиусом  $r$  и дополнительной антенной на высоте  $h$  от её центра. Для однозначности пеленгования должно выполняться условие однозначности фазовых измерений:  $r / \lambda \leq N / (4 \cdot \pi)$ , где  $\lambda$  – длина волны излучения.

Координаты антенн в ССК определяются соотношениями:

$$z'_{0,n} = \operatorname{Re}(r \cdot e^{i\alpha n}), \quad z'_{1,n} = 0, \quad z'_{2,n} = \operatorname{Im}(r \cdot e^{i\alpha n}), \quad z'_{0,N} = 0, \quad z'_{1,N} = -h, \quad z'_{2,N} = 0, \quad (6)$$

где  $\alpha = 2 \cdot \pi / N$  – квант углового положения антенн с номерами  $n = \overline{0, N-1}$ .

Применительно к (6) вектор пеленга в связанной системе координат определяется соотношениями [4]:

$$\widehat{w}'_0 = \operatorname{Re}(\widehat{W}), \quad \widehat{w}'_1 = \widehat{V}, \quad \widehat{w}'_2 = \operatorname{Im}(\widehat{W}), \quad (7)$$

где  $\widehat{W} = \frac{e^{i(\alpha+\pi)/2} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \arg(\widehat{S}_{n \oplus 1} \cdot \widehat{S}_n^*) \cdot e^{i\alpha n}}{N \cdot (2 \cdot \pi \cdot r / \lambda) \cdot \sin(\alpha / 2)}$ ,  $\widehat{V} = \frac{-\arg\left(\widehat{S}_N \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \widehat{S}_n^* \cdot e^{\frac{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \operatorname{Re}(\widehat{W} \cdot e^{-i\alpha n})}\right)}{(2 \cdot \pi \cdot h / \lambda)}$ ,  $\widehat{S}_n$  – комплексная амплитуда сигнала антенны,  $\oplus$  – операция по модулю  $N$ ,  $\arg(\cdot)$  – аргумент (фаза) комплексной величины.

Составляющие измеренного (7) вектора пеленга есть [4] нормальные независимые случайные величины с дисперсией:



$$\sigma_{\hat{w}_0}^2 = \sigma_{\hat{w}_2}^2 = \frac{2}{N} \cdot \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot r / \lambda)^2 \cdot q^2}, \quad \sigma_{\hat{w}_1}^2 = \frac{N+1}{N} \cdot \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot h / \lambda)^2 \cdot q^2}. \quad (8)$$

Отношение сигнал/шум  $q$  (амплитуды сигнала к среднему квадратическому значению шума) определено для всенаправленных антенн. В общем случае излучения-приёма с помощью вертикальных вибраторов следует учитывать диаграмму направленности передающей антенны  $\cos \beta$  и косинус угла между вектором напряжённости поля и векторами ориентации пеленгаторных антенн с составляющими в ПСК и ССК равными  $(-\sin \beta \cdot \cos \theta, \cos \beta, -\sin \beta \cdot \sin \theta)^T$  и  $(0, 1, 0)^T$ , где  $T$  – операция транспонирования. Вектор ориентации антенн следует предварительно преобразовать с применением (1), (2) из ССК в ПСК с учётом углов ориентации БПЛА. При небольших углах  $\Phi, \Gamma$  косинус угла между вектором напряжённости поля и векторами ориентации пеленгаторных антенн примерно равен  $\cos \beta$ .

Взаимосвязь измерений двухмерного пеленга в ССК и ПСК определяется не простыми преобразованиями (1)–(5), затруднён и соответствующий статистический анализ. Поступим следующим образом. Зададим в ПСК азимут и угол места  $\theta, \beta$ , соответственно направляющий вектор пеленга  $\mathbf{w}$ , а также углы ориентации  $\psi, \Phi, \Gamma$ . Перейдём в ССК с расчётом направляющего вектора в ней и добавлением аддитивного гауссовского шума  $\psi$  с дисперсией (8). Затем выполним обратный переход в ПСК с расчётом измеренного вектора пеленга:

$$\hat{\mathbf{w}} = A^T \times (A \times \mathbf{w} + \psi) = \mathbf{w} + A^T \times \psi. \quad (9)$$

В соответствии с (9) оценка вектора в ПСК несмещённая, а дисперсия его составляющих определяется соотношением:

$$\sigma_{w_j}^2 = \sum_{k=0}^2 A_{k,j}^2 \times \sigma_{\hat{w}_k}^2, \quad (10)$$

где  $j = 0, 1, 2$  – номер составляющей вектора пеленга.

Дисперсия (10) зависит от всех исходных угловых величин и параметров антенной системы. Для системы минимального состава  $N = 3$  и  $h = r\sqrt{2}$  все дисперсии в (8) равны,  $\sum_{k=0}^2 A_{k,j}^2 = 1$ , статистические свойства вектора  $\mathbf{w}$  не изменяются относительно первично измеренного  $\mathbf{w}'$ , а средние квадратические ошибки (СКО) измерений азимута и угла места с учётом взаимосвязей (3), (4) определяются соотношениями:

$$\sigma_{\theta} = \frac{0,13}{q \cdot (r / \lambda) \cdot \cos \beta}, \quad \sigma_{\beta} = \frac{0,13}{q \cdot (r / \lambda)}. \quad (11)$$

Согласно (11) ошибки пеленгования в ПСК не зависят от углового положения ЛА, а для угла места и от его истинного значения. Далее продолжим рассмотрение применительно к данному варианту.

Оценим влияние отражения радиоволн от земной поверхности на точность пеленгования для варианта движения по глиссаде в виде прямой линии с постоянной скоростью  $V$ , начальной высотой  $H_0$  при угле скольжения  $\beta_m$ :

$$H_t = H_0 - V \cdot \Delta t \cdot t \cdot \sin \beta_m, \quad Y_t = Y_0 - V \cdot \Delta t \cdot t \cdot \cos \beta_m, \quad (12)$$



где  $Y_0 = H_0 / \text{tg}(\beta_m)$  – начальная дальность,  $t = \overline{0, T}$  – номер отсчёта,  $T = \langle H_0 / (\sin \beta_m \cdot V \cdot \Delta t) \rangle$  – число отсчётов,  $\langle \cdot \rangle$  – целая часть числа,  $\Delta t$  – период отсчёта и измерений.

Воспользуемся методикой [4] при следующих исходных данных: высота поднятия антенны передатчика 1,5 м, поляризация вертикальная, мощность излучения 0,1 Вт; пеленгаторные антенны – вертикальные вибраторы, расположение согласно (6), предельная чувствительность пеленгования 5 мкВ/м; параметры движения носителя:  $V = 30$  м/с,  $H_0 = 330$  м,  $\beta_m = 15^\circ$ .

На рисунке 1 показаны результаты моделирования при полёте над заснеженной поверхностью, частота излучения 1 ГГц. Пунктиром указаны расчётные по (8) значения удвоенной СКО измерений. Амплитуда сигнала определялась по сумме прямой и отражённой волны в центре антенной решётки.

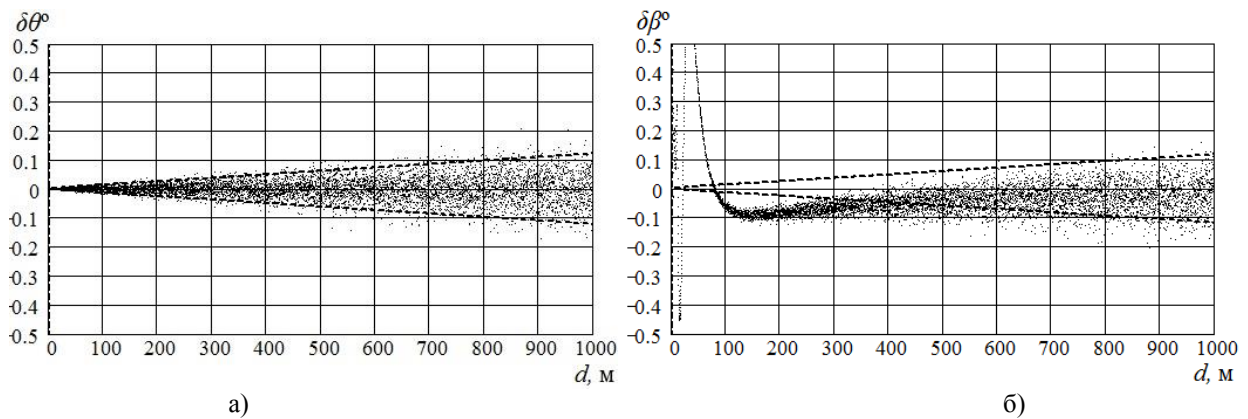


Рисунок 1 – Ошибки пеленгования: а – по азимуту; б – по углу места

Погрешности измерения азимута рисунка 1а всегда соответствуют расчётным. Угол места рисунка 1б соответствуют расчётным в дальней зоне. Результаты более детального обследования ближней зоны показаны на рисунке 2 следующими линиями: сплошной толстой и тонкой; пунктирной толстой и тонкой, соответственно, при отражении радиоволн от: морской поверхности и влажной почвы; сухой почвы и снега.

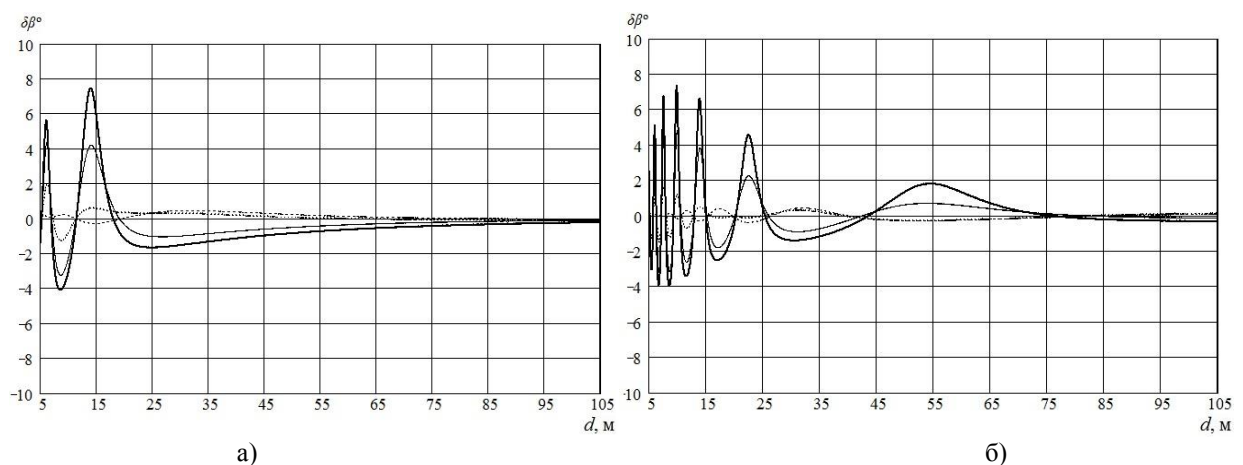


Рисунок 2 – Ошибки измерения угла места: а – частота 1 ГГц; б – частота 3 ГГц

Вблизи цели на расстоянии менее 30–60 м наблюдается интерференционное смещение измерений угла места, не выявленное в [4] при крупномасштабной дискретизации. Эта зона сокращается при уменьшении частоты излучения и при распространении радиоволн над сухой



почвой и снегом с относительно небольшими значениями диэлектрической проницаемости и удельной электрической проводимости, когда отражённый сигнал ослабляется в большей степени. Указанные закономерности можно использовать, когда имеется возможность выбора или оборудования района цели. Смещение принципиально устранимо переходом от варианта одно-сигнального пеленгования (7) к двулучевому пеленгованию [4].

Перейдём непосредственно к способам наведения на цель. Направление движения зададим углами ориентации вектора полной путевой скорости относительно горизонтальной поверхности в виде угла наклона траектории  $\Phi$  (далее для краткости тангаж) и угла пути  $\psi$  (курс) с отсчётом положительных значений соответственно от горизонта вверх и от опорного направления по часовой стрелке [2].

Из условия обеспечения управляемости полётом, возможности маневрирования ограничены фиксированной скоростью изменения курса  $\delta\psi$  и тангажа  $\delta\Phi$  с типичным значением 1 град/с, а также максимальным значением угла наклона траектории  $\Phi_m$  порядка  $15^\circ$  [7].

Рассмотрим два способа наведения, первый, по результатам двухмерного пеленгования с пикированием на цель, второй, по азимуту в горизонтальной плоскости и по высоте полёта в вертикальной с плавным снижением на уровень цели и горизонтальным полетом до встречи с ней.

В свою очередь возможны два варианта определения направления на излучатель: непосредственное пеленгование в текущий момент времени и определение пеленга по оценочным координатам цели, исходя из совокупности всех предшествующих измерений. При наведении по текущим измерениям достаточно информации об относительном рассогласовании направления полёта и направления на излучатель. В другом варианте дополнительно необходимы данные о координатах летательного аппарата в моменты пеленгования и абсолютном значении вектора направления движения.

Каждому из способов наведения соответствует свой тип глиссады, которые определим исходя из следующего.

При полёте с постоянной скоростью  $V$  маневрирование происходит по окружности с радиусом разворота:

$$R_h = V / \delta\Phi. \quad (13)$$

Тогда при исходном горизонтальном полёте БПЛА на источник излучения глиссада типа 1 включает два участка движения (рисунок 3): по дуге АВ и касательной к ней прямой пикирования ВЕ, глиссада типа 2: по дуге АВ, отрезку прямой ВС, дуге плавного снижения CD и далее горизонтально до места посадки. На рисунке 3 горизонтальная ось – время, вертикальная – высота полёта. Расчёты выполнены для следующих параметров: допустимый угол наклона траектории  $\Phi_m = 15^\circ$ , начальная высота  $H_0 = 300$  м, скорость полёта  $V = 30$  м/с, скорость изменения угла наклона траектории  $\delta\Phi = 1$  град/с.

Исходя из геометрических построений, получим формулы расчёта параметров точек глиссады: высоты, удаления по горизонтали от исходной позиции, длины пути.

Точка В выхода из первого разворота:

$$H_{m1} = H_0 - 2 \cdot R_h \cdot \sin^2(\Phi_m / 2), \quad D_{m1} = R_h \cdot \sin \Phi_m, \quad L_{m1} = R_h \cdot \Phi_m. \quad (14)$$

Точка С начала второго разворота, прямая ВЕ касательная к дуге CD:

$$H_{m2} = 2 \cdot R_h \cdot \sin^2(\Phi_m / 2) + h_c, \quad D_{m2} = D_{m1} + \frac{H_{m1} - H_{m2}}{\operatorname{tg}(\Phi_m)}, \quad L_{m2} = L_{m1} + \frac{H_{m1} - H_{m2}}{\sin(\Phi_m)}. \quad (15)$$



Точка D посадки по глиссаде 2 типа или окончания второго разворота с выходом на горизонтальный полет, где горизонтальная прямая на высоте цели касается дуги CD:

$$H_{m3} = h_c, D_{m3} = D_{m2} + D_{m1}, L_{m3} = L_{m2} + L_{m1}. \tag{16}$$

Точка E посадки по глиссаде первого типа:

$$H_{m4} = h_c, D_{m4} = D_{m1} + \frac{H_{m1} - h_c}{\operatorname{tg}(\Phi_m)}, L_{m4} = L_{m1} + \frac{H_{m1} - h_c}{\sin(\Phi_m)}. \tag{17}$$

При движении по глиссаде в направлении источника линии пеленгов (визирования) из различных точек траектории практически параллельны друг другу, что в значительной степени затрудняет определение местоположения цели. Распространённые методы, основанные на поиске точек пересечения линий пеленгов, не применимы. Исследуем возможности статистически оптимальной оценки максимального правдоподобия и ускоренного расчёта по критерию минимума расстояния до линий пеленга [8].

Определим вектор пеленга в виде его проекций в горизонтальной и вертикальной плоскости:

$$\dot{W}(\dot{z}) = \frac{\dot{z} - \dot{Z}}{\sqrt{(h_c - H)^2 + |\dot{z} - \dot{Z}|^2}}, V(\dot{z}) = \frac{h_c - H}{\sqrt{(h_c - H)^2 + |\dot{z} - \dot{Z}|^2}}, \tag{18}$$

где  $\dot{z} = y + i \cdot x$ ,  $\dot{Z} = Y + i \cdot X$  – координаты цели и БПЛА в горизонтальной плоскости,  $x$ ,  $X$  – абсцисса,  $y$ ,  $Y$  – ордината,  $h_c$ ,  $H$  – высоты подъёма.

При равноточных независимых измерениях в моменты времени  $t$  оценка максимального правдоподобия координат цели определяется соотношением:

$$\hat{z}_t = \arg \max_{\dot{z}} \left( \sum_{t'=0}^t \left| \hat{W}_{t'} - \dot{W}_{t'}(\dot{z}) \right|^2 + \left| \hat{V}_{t'} - V_{t'}(\dot{z}) \right|^2 \right). \tag{19}$$

Скобка над величиной означает результат её оценки или измерения.



Рисунок 3 – Типы глиссад

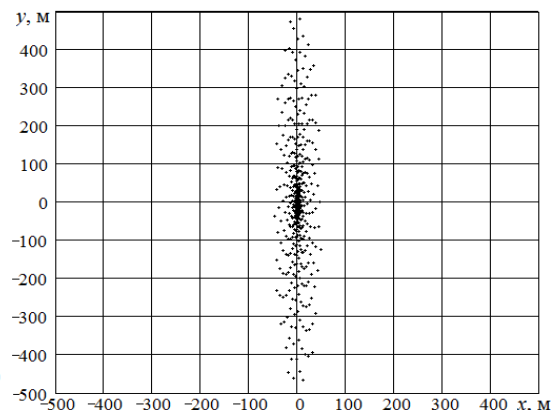


Рисунок 4 – Кванты координат



Условие независимости и равноточности измерений строго выполнимо при приёме сигналов на фоне аддитивного белого шума, с некоторым приближением на фоне контактных помех двигателя и ионизации воздуха винтами БПЛА.

Максимизация в (19) выполняется численными методами. Для снижения вычислительных затрат используем неравномерное квантование по закону спирали Архимеда с указанным на рисунке 4 ограничением области поиска максимума. Общее число квантов равно 500. Сжатие по абсциссе обусловлено соответствующим характером рассеивания засечек координат.

Алгоритм оценки по критерию минимума расстояния до линий пеленга описывается алгебраическими расчётными формулами:

$$\hat{z}_t = \frac{(c_{1,t} \cdot c_{5,t} - c_{2,t} \cdot c_{3,t}) + i \cdot (c_{3,t} \cdot c_{4,t} - c_{2,t} \cdot c_{5,t})}{c_{1,t} \cdot c_{4,t} - c_{2,t}^2}, \quad (20)$$

где  $c_{1,t} = \sum_{t'=0}^t (\hat{R}_{t'}^2 + \hat{V}_{t'}^2 - 2\sigma^2) \cdot w_{t'}$ ,  $c_{2,t} = -\sum_{t'=0}^t \hat{R}_{t'} \cdot \hat{I}_{t'}$ ,  $c_{4,t} = \sum_{t'=0}^t (\hat{I}_{t'}^2 + \hat{V}_{t'}^2 - 2\sigma^2) \cdot w_{t'}$ ,

$$c_{3,t} = \sum_{t'=0}^t (\text{Im}(\dot{Z}_{t'}) \cdot (\hat{R}_{t'}^2 + \hat{V}_{t'}^2) - (\text{Re}(\dot{Z}_{t'}) \cdot \hat{R}_{t'} + (H_{t'} - h_c) \cdot \hat{V}_{t'}) \cdot \hat{I}_{t'} - 2\sigma^2 \cdot \text{Im}(\dot{Z}_{t'})) \cdot w_{t'}$$

$$c_{5,t} = \sum_{t'=0}^t (\text{Re}(\dot{Z}_{t'}) \cdot (\hat{I}_{t'}^2 + \hat{V}_{t'}^2) - (\text{Im}(\dot{Z}_{t'}) \cdot \hat{I}_{t'} + (H_{t'} - h_c) \cdot \hat{V}_{t'}) \cdot \hat{R}_{t'} - 2\sigma^2 \cdot \text{Re}(\dot{Z}_{t'})) \cdot w_{t'}$$

$\hat{R}_t = \text{Re}(\hat{W}_t)$ ,  $\hat{I}_t = \text{Im}(\hat{W}_t)$ ,  $\hat{V}_t$  – составляющие оценочного вектора пеленга,  $\sigma^2$  – их дисперсия.

Методом линеаризации функции случайных аргументов можно показать, что математическое ожидание квадрата расстояния до линии пеленга пропорционально квадрату наклонной дальности до цели. Исходя из этого, весовые коэффициенты целесообразно определить обратно пропорционально. Для глissады 1 с высокой степенью точности  $w_t = 1/H_t^2$ . В случае глissады 2, особенно при продолжительном горизонтальном полёте в заключительной фазе, такое не выполняется. Воспользуемся результатами предшествующей оценки горизонтальных координат:

$$w_t = 1 / \left( \left| \hat{z}_{t-1} - \dot{Z}_t \right|^2 + (h_c - H_t)^2 \right).$$

Для одномерного по азимуту пеленгования  $\hat{I}_t = 0$ , а коэффициент 2 при  $\sigma^2$  следует установить равным 1.

Истинные углы прихода радиоволн определяются по формулам:

$$\theta = \arg(\dot{z}_c - \dot{Z}), \quad \beta = \text{arctg} \left( \frac{h_c - H}{\left| \dot{z}_c - \dot{Z} \right|} \right). \quad (21)$$

Свойства приведенных алгоритмов пеленгования и оценки координат иллюстрируются рисунками 5–7. Установлена дальность до цели 2950 м, что примерно в 2 раза больше минимальных согласно (16–17) значений, ошибка пеленгования 2 град, дискретность измерений 1 с.

Поле рассеивания (рисунок 5) показано применительно к глissаде 1 для её середины пути в точке  $t=50$  с минимума СКО пеленгования (рисунок 6). Оно значительно вытянуто в направлении движения, что согласуется с рисунком 4. Рассеивание по алгоритму ускоренного расчёта (рисунок 5а) заметно выше, чем по методу максимального правдоподобия (рисунок 5б). Основной фактор при этом – увеличение СКО пеленгования в вертикальной плоскости (рисунок 6б), чего не наблюдается по азимуту (рисунок 6а). Точками отмечены результаты по алгоритму ускоренного расчёта, кружками – максимального правдоподобия.



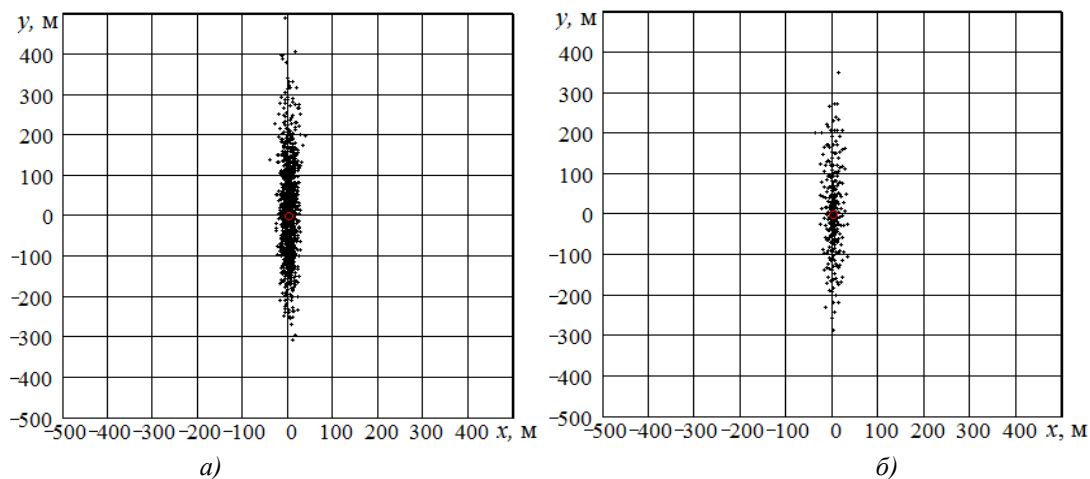


Рисунок 5 – Поле рассеивания засечек координат: а – алгоритм ускоренного расчёта, б – алгоритм максимального правдоподобия

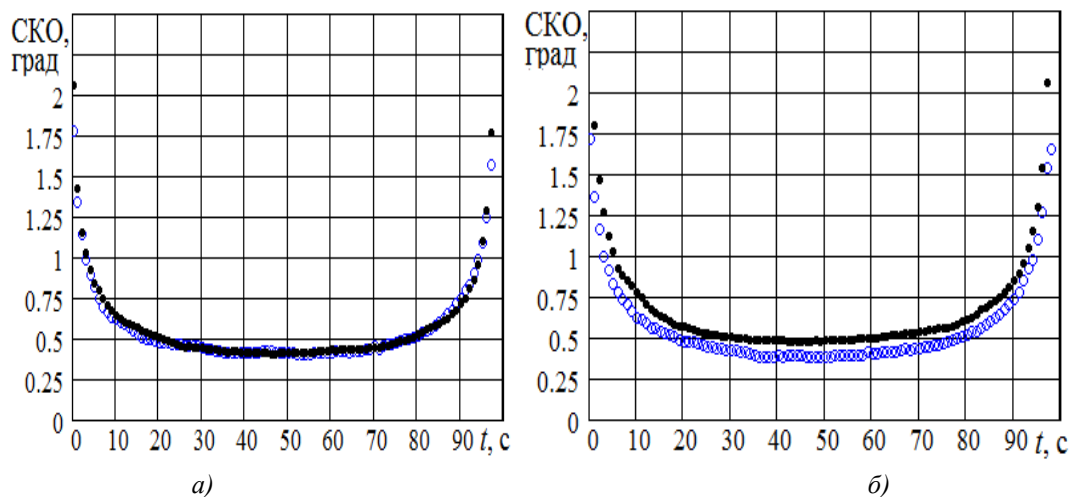


Рисунок 6 – Погрешности пеленгования для глissады 1: а – азимут, б – угол места

Для глissады 2 различия заметнее, с увеличением СКО оценок ускоренного расчёта как по углу места (рисунок 7б), так и по азимуту (рисунок 7а). Это обусловлено, прежде всего, ошибками определения дальности и весовых коэффициентов.

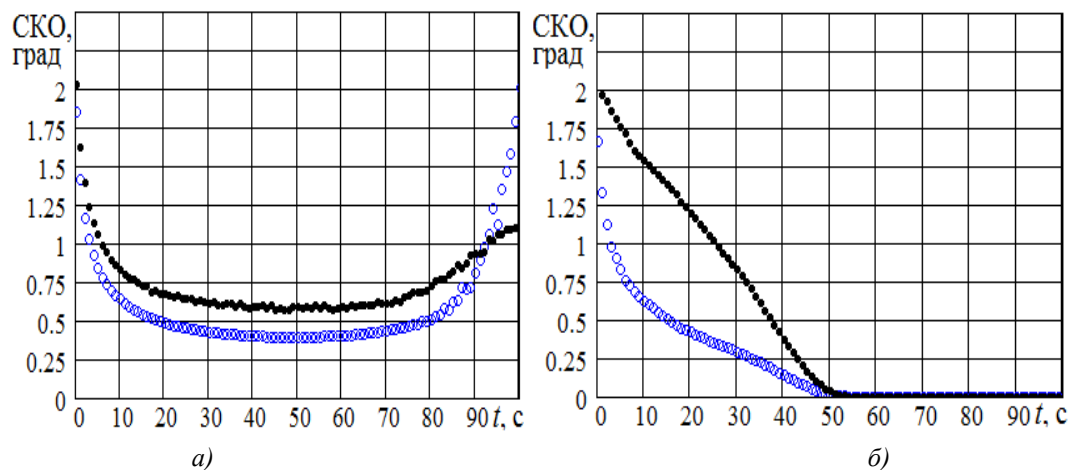


Рисунок 7 – Погрешности пеленгования для глissады 2: а – азимут, б – угол места



Отмеченные особенности, очевидно, отражаются и на эффективности наведения на цель. Численные оценки получены моделированием в соответствии со схемой [8] (рисунок 8).

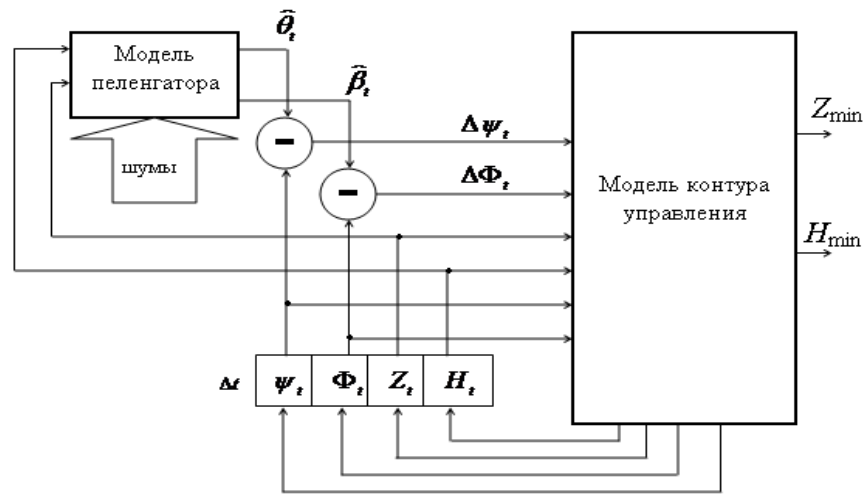


Рисунок 8 – Структурная схема модели наведения по результатам двухмерного пеленгования

Приняты следующие принципы и условия. Управляющие воздействия формируют по разности потребного и текущего состояния регулируемых параметров в дискретные моменты времени  $t = 0, 1, \dots, T$  с интервалом  $\Delta t$ . В исходном состоянии задают начальные значения параметров движения: угла пути, угла наклона траектории, координат на плоскости и по высоте  $\psi_0, \Phi_0, \dot{Z}_0 = Y_0 + i \cdot X_0, H_0$ . Для заданных координат ЛА, координат цели генерируют сигналы на входе пеленгаторных антенн с примесью шумов приёма, измеряют текущий двухмерный пеленг  $\hat{\theta}_t, \hat{\beta}_t$ , определяют сигналы рассогласования угла пути и угла наклона траектории  $\Delta\psi_t, \Delta\Phi_t$ . По этим сигналам и текущим параметрам в контуре управления определяют и регистрируют параметры движения на очередной момент времени, отстоящий от текущего на интервал  $\Delta t$ . Процесс циклически повторяют до завершения наведения, о результатах судят по минимуму расстояния до цели в момент её пролёта (стрелки с выхода контура управления на внешний выход модели наведения).

Обработку команд управления выполняют итерационно с интервалом  $\delta t$ . Принято, что на этих интервалах параметры движения неизменны, равномерное прямолинейное движение, исходя из этого, расчёт высоты и горизонтальных координат носителя выполняют по итерационным формулам:

$$H_{k+1} = H_k + V \cdot \delta t \cdot \sin \Phi_{k+1}, \quad Z_{k+1} = Z_k + V \cdot \delta t \cdot \cos \Phi_{k+1} \cdot e^{i \cdot \psi_{k+1}}, \quad (22)$$

где  $k = 0, 1, \dots, K - 1$  – номер итерации при общем количестве  $K$ .

Для снижения методических ошибок, обусловленных линеаризацией закона движения между дискретными точками и заменой дуг хордами, временной интервал между последовательными итерациями компенсации рассогласования уменьшают:  $\delta t = \Delta t / K$ , далее  $K = 24$ .

Итерационные значения угла наклона траектории и угла пути  $\Phi_{k+1}, \psi_{k+1}$  формируют как сумму предыдущего значения и скомпенсированного в итерации рассогласования, в соответствии с рисунком 9. Фигурными стрелками отмечены входные данные, используемые в начальный момент. Далее они заменяются через интервал  $\delta t$  вновь формируемыми значениями. Блок 1 с характерной характеристикой ограничителя обеспечивает фиксированную скорость измене-



ния тангажа, а логический элемент 3, ограничение его максимального значения. В канале управления курсом в отсутствии ограничения на выходе аналогичного элемента устанавливают единичное значение. Элементы  $\delta t$  обеспечивают задержку входных данных на эту величину. Расчёт текущих координат БПЛА в блоке 5 выполняют по итерационным формулам (22). После выполнения заданного количества итерационных циклов выводят параметры движения в очередной, через  $\Delta t$ , момент времени, а в конце пути, с блока 7, координаты летательного аппарата в момент наибольшего сближения с целью.

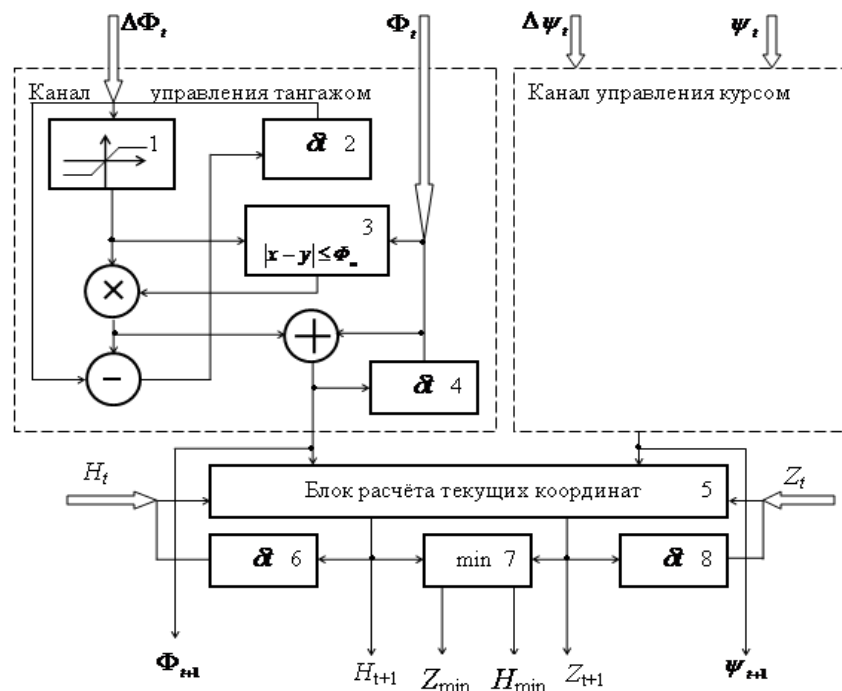


Рисунок 9 – Модель контура управления

Иной принцип наведения в вертикальной плоскости принят при движении по глиссаде 2, где управление осуществляют исходя из высоты полёта следующим образом. Первоначально в процессе движения тангаж уменьшают до допустимого предела и поддерживают его, снижаясь до высоты  $H_{m2}$ . В этой точке тангаж увеличивают и при достижении его нулевого значения продолжают горизонтальный полёт на высоте цели.

В качестве цели рассматривался цилиндрический объект (улавливающая сеть) радиусом основания и высотой 3 м. Факт попадания в него оценивался по минимуму удаления в горизонтальной плоскости, которое должно быть не более радиуса, и, в этот момент, по высоте пролёта, которая должна не превышать высоту объекта и быть положительной. Как основной показатель эффективности принята вероятность наведения (попадания) в улавливающую сеть.

Исследовались зависимости вероятности наведения от дальности до цели, темпа, СКО пеленгования и скорости манёвра. Приняты указанные ранее базовые значения параметров, при отклонении от некоторых из них под рисунками указаны соответствующие им. Дальности даны в относительных минимально возможных значений единицах, соответственно относительно  $D_{m4} = 1340$  м и  $D_{m3} = 1572$  м для глиссады 1 и 2. Число статистических экспериментов, циклов наведения – 103–104, в зависимости от уровня вероятности наведения.

Результаты представлены на рисунках 10–17. Толстая линия при расчёте координат методом максимального правдоподобия, пунктирная – по критерию минимума расстояния до линий пеленга, тонкая сплошная – при наведении по результатам текущего пеленгования.



В соответствии с рисунком 10а при полёте по глиссаде 1 до относительной дальности 1,1 наблюдается снижение вероятности наведения. Причина состоит в ограничении максимального значения тангажа, что препятствует полной компенсации рассогласования с возникновением на участке ВС (рисунок 2) асимметрии в сторону меньших по модулю значений углов скольжения. На рисунке 10б и далее это ограничение снято, поскольку при относительной дальности более 1 вероятность выхода за пределы ограничения мала.

Вероятности наведения  $P$  по глиссаде 1 с оценкой координат методом максимального правдоподобия и по критерию минимума расстояния до линий пеленга различаются мало, но эффективность последнего резко снижается с увеличением расстояния до цели по глиссаде 2 и переходом от двухмерного (рисунок 14а) к одномерному по азимуту пеленгованию (рисунок 14б). Снижение обусловлено несоответствием весовых коэффициентов наклонной дальности до цели и практически отсутствует применительно к методу максимального правдоподобия.

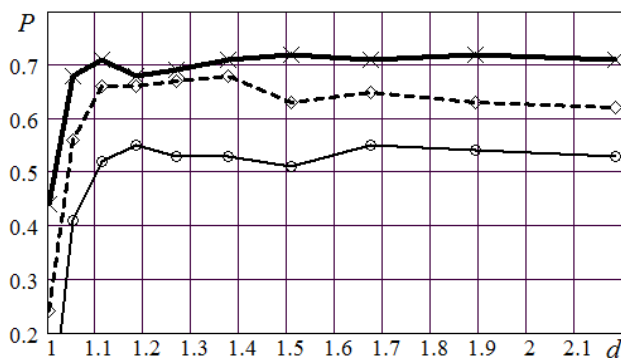


Рисунок 10а – Зависимости вероятности наведения от дальности, глиссада 1 – при ограничении тангажа

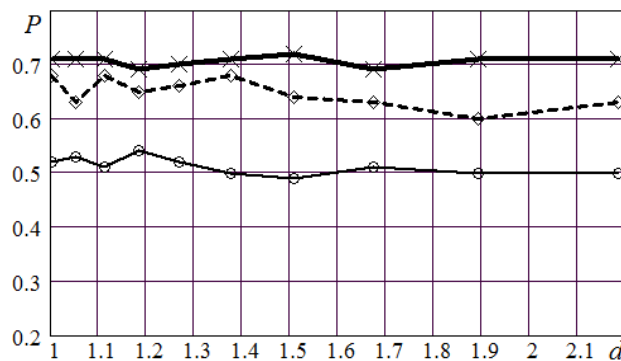


Рисунок 10б – Зависимости вероятности наведения от дальности, глиссада 1 – в отсутствии ограничения

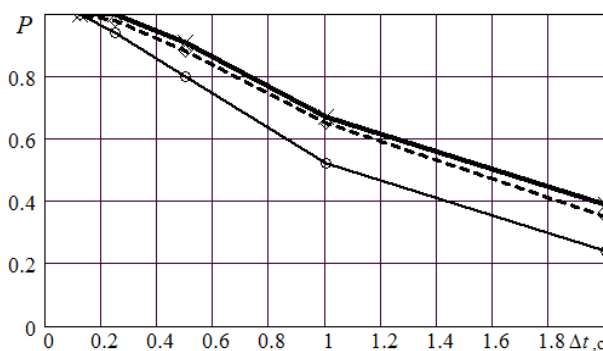


Рисунок 11 – Зависимости вероятности наведения от периода пеленгования. Глиссада 1

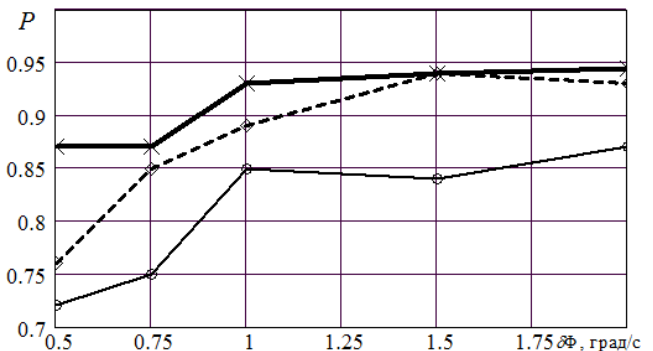


Рисунок 12 – Зависимости вероятности наведения от скорости манёвра. Глиссада 1,  $\Delta t = 0,5$

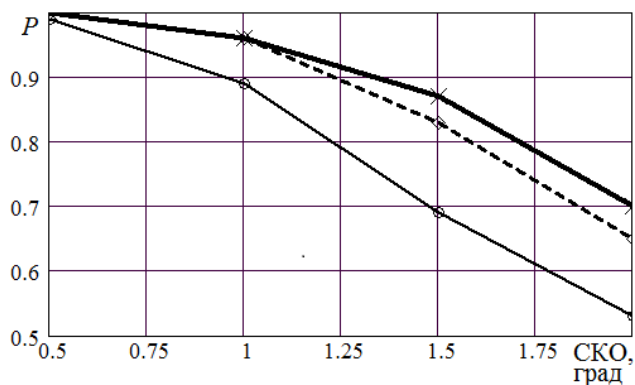


Рисунок 13 – Зависимости вероятности наведения от СКО пеленгования. Глиссада 1

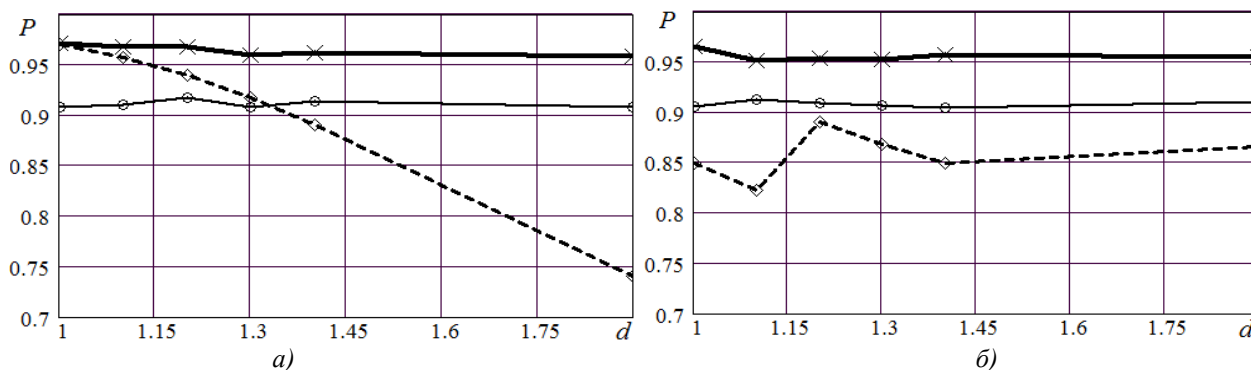


Рисунок 14 – Зависимости вероятности наведения от дальности. Глиссада 2:  
а – двухмерное пеленгование, б – пеленгование по азимуту

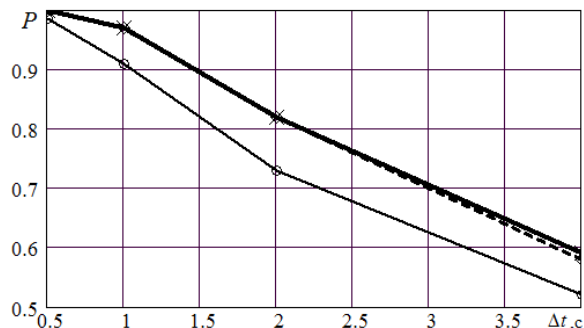


Рисунок 15 – Зависимости вероятности наведения от темпа пеленгования. Глиссада 2

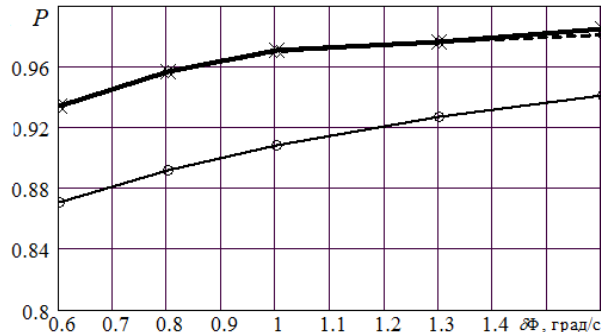


Рисунок 16 – Зависимости вероятности наведения от скорости манёвра. Глиссада 2

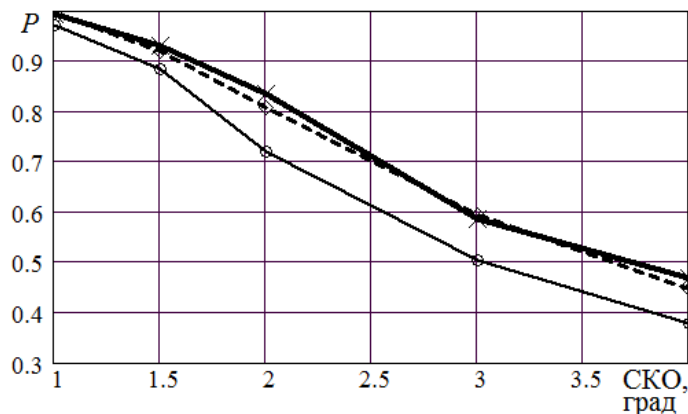


Рисунок 17 – Зависимости вероятности наведения от СКО пеленгования. Глиссада 2,  $\Delta t=2$  с



**Выводы.** Рассмотрены способы самонаведения по азимуту в горизонтальной плоскости и высоте полёта в вертикальной, а также по результатам двухмерного пеленгования с пикированием на цель. Приведены формулы расчёта параметров соответствующих глиссад, оценок пеленга по результатам текущего пеленгования и по оценочным координатам цели с применением критериев максимального правдоподобия и минимума расстояния до линий пеленга. Приведены формулы преобразования результатов и расчёта погрешностей двухмерного пеленгования с помощью объёмной решётки для произвольного пространственного положения носителя. Моделированием исследованы ошибки, вызванные отражением радиоволн от земной поверхности при полёте по глиссаде. Для контуров управления с заданной инерционностью и дискретностью измерений оценены вероятности наведения по результатам определения координат цели и текущих измерений, получены зависимости вероятности наведения от дальности до цели, темпа, ошибок пеленгования и скорости манёвра летательного аппарата.

Сравнительный анализ эффективности наведения по результатам текущего пеленгования и с применением оценок максимального правдоподобия позволяет сделать следующие общие выводы:

1. Наведение по оценкам максимального правдоподобия координат цели обеспечивает более высокие вероятности, чем по результатам только текущего пеленгования.
2. Вероятность наведения возрастает при уменьшении дискретности измерений, средней квадратической ошибки пеленгования и увеличении скорости маневрирования летательного аппарата.
3. При прочих равных условиях вероятность наведения по глиссаде 2 существенно выше, что обусловлено, прежде всего, исключением погрешностей наведения по вертикали. Но при этом необходимо обеспечить высокоточное измерение высоты полёта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асланян А.Э. Системы автоматического управления полетом летательных аппаратов. КВВАИУ, 1984.
2. Красовский А.А. Системы управления полетом и их аналитическое конструирование. М.: Наука, 1973.
3. Системы управления и бортовые вычислительные комплексы летательных аппаратов. Под ред. Н.М. Лысенко. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1990.
4. Уфаев А.В., Уфаев В.А. Двухмерное пеленгование при отражении радиоволн от земной поверхности. Антенны, 2013. № 6. С. 30–38.
5. Уфаев В.А. Определение местоположения наземных целей по результатам двухмерного пеленгования с лётно-подъёмных средств. Антенны, 2015, № 5 (216). С. 58–64.
6. Винницкий А.С. Автономные радиосистемы. М.: Радио и связь, 1986.
7. Новоселов А.С., Болнокин В.Е., Чинаев П.И., Юрьев А.Н. Системы адаптивного управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1987.
8. Уфаев В.А., Уфаев Д.В. Наведение на наземную цель по измерениям бортового пеленгатора. «Информационно-измерительные и управляющие системы». № 3, С. 8–15.

#### REFERENCES

1. Aslanyan A. E. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya poletom letatel'nyh apparatov. KVVAIU, 1984.
2. Krasovskij A. A. Sistemy upravleniya poletom i ih analiticheskoe konstruirovanie. M.: Nauka, 1973.
3. Sistemy upravleniya i bortovye vychislitel'nye komplekсы letatel'nyh apparatov. Pod red. N. M. Lysenko. VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo, 1990.



4. Ufaev A.V., Ufaev V.A. Dvuhmernoe pelengovanie pri otrazhenii radiovoln ot zemnoj poverhnosti. *Antenny*, 2013. № 6. pp. 30–38.
5. Ufaev V.A. Opredelenie mestopolozheniya nazemnyh celej po rezul'tatam dvuhmernogo pelengovaniya s letno-pod'emnyh sredstv. *Antenny*, 2015, № 5 (216). pp. 58–64.
6. Vinnickij A.S. *Avtonomnye radiosistemy*. M.: Radio i svyaz', 1986.
7. Novoselov A.S., Bolnokin V.E., Chinaev P.I., Yur'ev A.N. *Sistemy adaptivnogo upravleniya letatel'nymi apparatami*. M.: Mashinostroenie, 1987.
8. Ufaev V.A., Ufaev D.V. Navedenie na nazemnuyu cel' po izmereniyam bortovogo pelengatora. «Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayuschie sistemy». № 3, pp. 8–15.

© Уфаев В.А., Беляев М.П., 2019

Уфаев Владимир Анатольевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник 23 отдела научно-исследовательского 2 управления научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, andreyuff@mail.ru.

Беляев Максим Павлович, кандидат технических наук, начальник 23 отдела научно-исследовательского 2 управления научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, belyaev\_mp@mail.ru.