



УДК 621.396.1  
ГРНТИ 47.49.02

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ НАЗЕМНЫХ ЦЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПЕЛЕНГОВАНИЯ С ЛЁТНО-ПОДЪЁМНЫХ СРЕДСТВ

*В.А. УФАЕВ, доктор технических наук  
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)*

В статье приведены формулы преобразования результатов и расчёта погрешностей двухмерного пеленгования с помощью объёмной решётки для произвольного пространственного положения носителя. Уточнена формула расчёта смещения оценок координат по критерию минимума расстояния до линии пеленга. Предложен способ компенсации смещения. Моделированием исследованы статистические свойства оценок координат по результатам бортового пеленгования.

*Ключевые слова:* двухмерное пеленгование, объёмная решётка, погрешности пеленгования, оценки координат, смещение, компенсация смещения.

## THE GROUND TARGET COORDINATES DETERMINATION ACCURACY IMPROVING ACCORDING TO THE DIRECTION FINDING FROM THE FLIGHT-HOISTING MEANS

*V.A. UFAEV, Doctor of Technical Sciences, Senior Research Officer  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)  
M.P. BELJAEV, Candidate of Technical Sciences  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*

The results conversion and the error calculation formulae of the two-dimensional direction finding are given using the volume lattice for the carrier arbitrary spatial position. The coordinates estimates drift calculation formula is updated according to the criterion of the minimum distance to the line of bearing. The compensation method for the drift is proposed. The coordinates estimates statistic properties according to the results of the on – Board direction finding are investigated by simulation.

*Keywords:* two-dimensional, direction finding volume lattice, direction finding errors, coordinates estimates, drift, drift compensation.

**Введение.** Одной из задач авиационных комплексов является определение координат наземных целей по результатам бортового пеленгования. Целью может быть, например, излучающий объект подлежащий уничтожению или система посадки летательных аппаратов (ЛА), оборудованная приводными передатчиками. Для решения задачи привлекают также навигационно-пилотажные параметры ЛА (координаты, скорость, углы ориентации в пространстве).

Общие способы пеленгования приведены, например, в [1], а определения координат в [2]. В настоящей работе учтём специфические факторы: отклонение плоскости носителя и бортового пеленгатора от горизонтального положения, вызывающее при не



учёте соответствующие погрешности пеленгования, а также смещение оценок координат при ускоренном расчёте по критерию минимума расстояния до линии пеленга, отмеченное в [2] по результатам моделирования. Последний недостаток принципиально устранен переходом к критерию максимального правдоподобия, однако реализация алгоритма оценки численными методами требует привлечения значительных вычислительных ресурсов.

**Цель статьи** – разработка алгоритмов с повышенной точностью определения координат наземных целей по результатам пеленгования с лётно-подъёмных средств.

Взаимное положение ЛА и цели будем определять [3] в земной системе координат (ЗСК) с центром в точке проекции цели на земную поверхность и опорным направлением в точку проекции ЛА в начальный момент времени. Пеленгование осуществляют в связанной системе координат (ССК), её начало в фазовом центре антенной системы пеленгатора, не усложняя – в центре ЛА. Отсчёт положительных значений пеленга  $\theta'$  осуществляют в плоскости крыла от оси, направленной к носовой части ЛА, по часовой стрелке, углов места  $\beta'$  от этой плоскости вверх.

Пространственное положение ЛА 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 ЛА и результатов пеленгования переопределим последние в промежуточную систему координат. Пеленг  $\theta$  здесь отсчитывают в горизонтальной плоскости от опорного направления, а угол места  $\beta$  относительно этой плоскости. 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

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

$$\mathbf{w} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{w}', \quad (2)$$

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

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

где  $\mathbf{w}'$  – исходный направляющий вектор в ССК,  $\mathbf{w}$  – преобразованный направляющий вектор в ПСК,  $\mathbf{A}$  – матрица перехода.

Матрица перехода [3, формула (1.10)] имеет вид:

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



Обратное преобразование заданного в ПСК двухмерного пеленга  $(\theta, \beta)$  в связанную систему осуществляют аналогично, взаимной заменой  $\theta' \leftrightarrow \theta$ ,  $\beta' \leftrightarrow \beta$ ,  $\mathbf{w}' \leftrightarrow \mathbf{w}$  и исключением в (2) операции  $\Gamma$  транспонирования матрицы  $\mathbf{A}$ . Заменой координат направляющего вектора координатами антенн пеленгатора в связанной системе координат их пересчитывают посредством (1), (2), (5) в промежуточную систему, а дополнительным сдвигом и в ЗСК.

Оценим погрешности пеленгования после преобразований (1)-(5) применительно к объёмной решётке [1], состоящей из  $K$  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  $r/\lambda \leq K/(4 \cdot \pi)$ , где  $\lambda$  – длина волны излучения.

Координаты антенн в ССК определяются соотношениями

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

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

Применительно к (6) измеренный направляющий вектор в связанной системе координат определяется соотношениями [1]

$$\hat{\mathbf{w}}'_0 = \text{Re}(\hat{W}), \quad \hat{w}'_1 = \hat{V}, \quad \hat{w}'_2 = \text{Im}(\hat{W}), \quad (7)$$

$$\text{где } \hat{W} = \frac{e^{i \cdot (\alpha + \pi) / 2} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} \arg(\dot{S}_{\{k+1\}} \cdot S_k^*) \cdot e^{i \cdot \alpha \cdot k}}{K \cdot (2 \cdot \pi \cdot r / \lambda) \cdot \sin(\alpha / 2)}, \quad \hat{V} = \frac{-\arg\left(\dot{S}_K \cdot \sum_{k=0}^{K-1} \dot{S}_n^* \cdot e^{i \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \cdot \text{Re}(\hat{W} \cdot e^{-i \cdot \alpha \cdot k})}\right)}{(2 \cdot \pi \cdot h / \lambda)}, \quad \dot{S}_k$$

– комплексная амплитуда сигнала антенны,  $\{\cdot\}$  – операция по модулю  $K$ ,  $\arg(\cdot)$  – аргумент (фаза) комплексной величины.

Здесь и далее круглая скобка над величиной означает её оценочное, измеряемое значение.

Составляющие направляющего вектора (7) есть [1] нормальные независимые случайные величины с дисперсией

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

Отношение сигнал/шум  $q$  (амплитуды сигнала к среднему квадратическому значению шума) определено для всенаправленных антенн. Когда принимают радиоволны передатчика вертикальной поляризации с помощью вибраторных антенн, уровень принимаемого сигнала пропорционален произведению косинусов углов ориентации  $\Phi$ ,  $\Gamma$  и угла места  $\beta$ .

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 пеленг и угол места  $\theta, \beta$ , соответственно направляющий вектор  $\mathbf{W}$ , 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 направляющего вектора

$$\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{A}^T \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{w}' + \Psi) = \mathbf{w} + \mathbf{A}^T \cdot \Psi. \quad (9)$$



В силу линейности преобразований оценка вектора в ПСК не смещённая, а дисперсия его составляющих определяется соотношением

$$\sigma_{w_j}^2 = \sum_{l=0}^2 A_{l,j}^2 \cdot \sigma_{w_l}^2, \quad (10)$$

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

Дисперсия (10) зависит от всех исходных угловых величин и параметров антенной системы. Но для системы минимального состава  $K = 3$  и  $h = r\sqrt{2}$  все дисперсии в (8) равны, причём  $\sum_{l=0}^2 A_{l,j}^2 = 1$ , статистические свойства вектора  $\widehat{\mathbf{W}}$  не изменяются относительно первично измеренного вектора  $\widehat{\mathbf{W}}'$ , а средние квадратические ошибки (СКО) измерений пеленга 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.

Определение горизонтальных координат цели  $\dot{z}(x, y) = y + i \cdot x$ , где  $y$  – ордината,  $x$  – абсцисса, выполняют по совокупности  $n = 0, \dots, N - 1$  циклов пеленгования в пунктах с координатами носителя в горизонтальной плоскости  $\dot{Z}_n = Y_n + i \cdot X_n$  и высотой  $H_n$ . Направляющий вектор при этом есть функция неизвестных координат

$$\dot{W}_n(x, y) = \frac{\dot{z}(x, y) - \dot{Z}_n}{\sqrt{H_n^2 + |\dot{z}(x, y) - \dot{Z}_n|^2}}, \quad (12)$$

$$V_n(x, y) = \frac{H_n}{\sqrt{H_n^2 + |\dot{z}(x, y) - \dot{Z}_n|^2}}. \quad (13)$$

При равноточных измерениях оценка максимального правдоподобия определяется как положение минимума функции пространственной неопределённости вида [2]

$$(\widehat{x}, \widehat{y}) = \arg \min_{(x,y)} \left( \sum_n \left| \widehat{W}_n - \dot{W}_n(x, y) \right|^2 \cdot D_W^{-1} + \left( \widehat{V}_n - V_n(x, y) \right)^2 \cdot D_V^{-1} \right). \quad (14)$$

Минимизация функции (14) в алгебраической форме не удаётся, но достигается [2] с применением критерия минимума расстояний до линии пеленга

$$\widehat{z} = \frac{(\widehat{c}_1 \cdot \widehat{c}_5 - \widehat{c}_2 \cdot \widehat{c}_3) + i \cdot (\widehat{c}_3 \cdot \widehat{c}_4 - \widehat{c}_2 \cdot \widehat{c}_5)}{\widehat{c}_1 \cdot \widehat{c}_4 - \widehat{c}_2^2}, \quad (15)$$

где  $\widehat{c}_1 = \sum_n \widehat{R}_n^2 + \widehat{V}_n^2$ ,  $\widehat{R}_n = \text{Re}(\widehat{W}_n)$ ,  $\widehat{c}_2 = -\sum_n \widehat{R}_n \cdot \widehat{I}_n$ ,  $\widehat{I}_n = \text{Im}(\widehat{W}_n)$ ,

$\widehat{c}_3 = \sum_n \text{Im}(\dot{Z}_n) \cdot (\widehat{R}_n^2 + \widehat{V}_n^2) - (\text{Re}(\dot{Z}_n) \cdot \widehat{R}_n + H_n \cdot \widehat{V}_n) \cdot \widehat{I}_n$ ,  $\widehat{c}_4 = \sum_n \widehat{I}_n^2 + \widehat{V}_n^2$ ,

$\widehat{c}_5 = \sum_n \text{Re}(\dot{Z}_n) \cdot (\widehat{I}_n^2 + \widehat{V}_n^2) - (\text{Im}(\dot{Z}_n) \cdot \widehat{I}_n + H_n \cdot \widehat{V}_n) \cdot \widehat{R}_n$ .

В первом приближении оценка (15) не смещённая



$$m[\hat{z}] = \frac{(c_1 \cdot c_5 - c_2 \cdot c_3) + i \cdot (c_3 \cdot c_4 - c_2 \cdot c_5)}{c_1 \cdot c_4 - c_2^2} = \dot{z}. \quad (16)$$

Квадратная скобка означает операцию определения математического ожидания случайной величины.

Проверим этот вывод путём уточнения [4] результатов линеаризации функции случайных аргументов. Для функции  $\hat{z}$  такими аргументами являются измерения  $\hat{W}_n, \hat{V}_n$

$$m[\hat{z}] = \dot{z} + \Delta \dot{z} = \dot{z} + \frac{1}{2} \sum_n \left( \left( \frac{\partial^2 \dot{z}}{\partial R_n \partial R_n} + \frac{\partial^2 \dot{z}}{\partial I_n \partial I_n} \right) \cdot D_w + \frac{\partial^2 \dot{z}}{\partial V_n \partial V_n} \cdot D_v \right). \quad (17)$$

Определение вторых производных в (17) сопровождается весьма громоздкими преобразованиями. Применим следующую методику. Определим указанным методом математические ожидания промежуточных величин

$$\begin{cases} m[\hat{c}_1] = c_1 + \Delta c_1 = c_1 + (D_w + D_v) \cdot N, \\ m[\hat{c}_2] = c_2 + \Delta c_2 = c_2 + (D_w + D_v) \cdot 0, \\ m[\hat{c}_3] = c_3 + \Delta c_3 = c_3 + (D_w + D_v) \cdot \sum_n \text{Im}(\dot{Z}_n), \\ m[\hat{c}_4] = c_4 + \Delta c_4 = c_4 + (D_w + D_v) \cdot N, \\ m[\hat{c}_5] = c_5 + \Delta c_5 = c_5 + (D_w + D_v) \cdot \sum_n \text{Re}(\dot{Z}_n). \end{cases} \quad (18)$$

Заменяя ими оценочные параметры в (15), получим уточнённую формулу расчёта математического ожидания координат цели по критерию минимума расстояния до линии пеленга

$$m[\hat{z}] = \frac{(m[\hat{c}_1] \cdot m[\hat{c}_5] - m[\hat{c}_2] \cdot m[\hat{c}_3]) + i \cdot (m[\hat{c}_3] \cdot m[\hat{c}_4] - m[\hat{c}_2] \cdot m[\hat{c}_5])}{m[\hat{c}_1] \cdot m[\hat{c}_4] - m^2[\hat{c}_2]}. \quad (19)$$

На рисунке 1 показаны результаты расчёта относительного смещения  $\delta$  от дальности до цели  $L$  в горизонтальной плоскости от центра базы пеленгования. Смещение определено в виде отношения модуля разности координат и их математического ожидания (19) к дальности до цели. Принят эпизод прямолинейного движения ЛА на высоте 1000 м со скоростью 50 м/с в течение 40 с. СКО пеленгования  $2^\circ$ , темп 1 отсчёт/с, таким образом, общее число пеленгов  $N = 40$ , расстояние между крайними позициями (база пеленгования) 2 км. Движение осуществлялось по линии цели (пунктир) и перпендикулярно ей (сплошная линия). Центр базы в основании перпендикуляра на неё из местоположения цели.

Контрольное моделирование показало высокую точность расчётной формулы с отклонениями до 1%. Смещение происходит по направлению к центру базы и уже на расстоянии 10 км достигает величины 15-20%, увеличиваясь далее почти до 1. В связи с чем, необходимы меры по его снижению.

Анализ формулы (18) показывает, что причиной смещения являются дополнительные компоненты  $\Delta c$ , но они обладают важным свойством, не зависят от координат источников. Это позволяет скомпенсировать их в измерениях промежуточных величин, выполнив переопределение

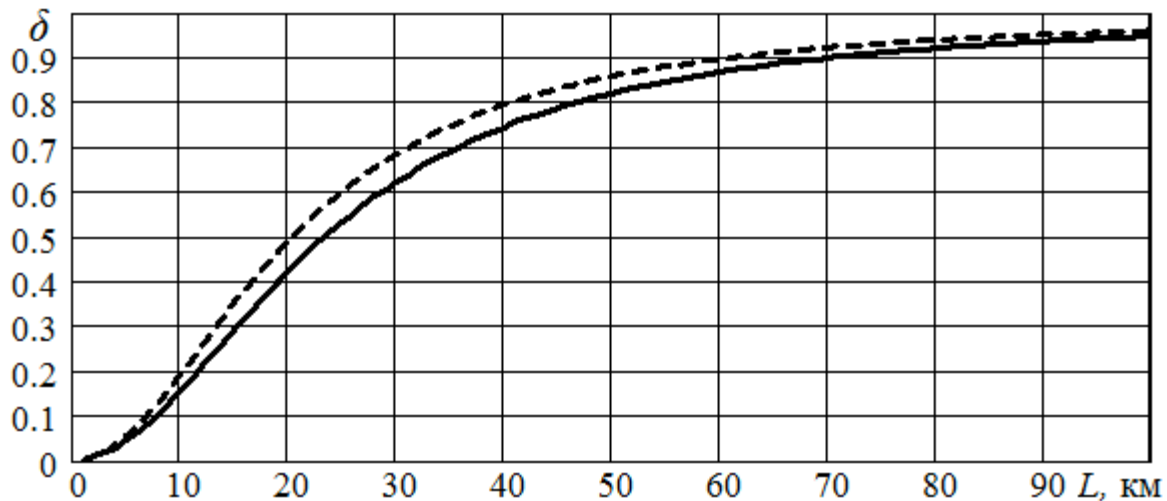


Рисунок 1 – Зависимости относительного смещения от дальности до цели

$$\begin{cases} \hat{c}'_1 = \hat{c}_1 - N \cdot (D_w + D_V), \\ \hat{c}'_2 = \hat{c}_2, \\ \hat{c}'_3 = \hat{c}_3 - \sum_n \text{Im}(\dot{Z}_n) \cdot (D_w + D_V), \\ \hat{c}'_4 = \hat{c}_4 - N \cdot (D_w + D_V), \\ \hat{c}'_5 = \hat{c}_5 - \sum_n \text{Re}(\dot{Z}_n) \cdot (D_w + D_V). \end{cases} \quad (20)$$

Тогда из (15), (20) следует уточнённая формула расчёта

$$\hat{z}' = \frac{(\hat{c}'_1 \cdot \hat{c}'_5 - \hat{c}'_2 \cdot \hat{c}'_3) + i \cdot (\hat{c}'_3 \cdot \hat{c}'_4 - \hat{c}'_2 \cdot \hat{c}'_5)}{\hat{c}'_1 \cdot \hat{c}'_4 - \hat{c}'_2'^2}. \quad (21)$$

Существенно, что применение компенсации практически не увеличивает объём расчётных операций относительно исходного, с входящими в него формулами, преобразования (15).

В завершение теоретической части статьи, обратимся к критическому режиму местоопределения, существенно удалённого от всех пунктов пеленгования источника. В этом случае принцип минимума расстояния до линии пеленга оказывается не конструктивным, минимум образуется как по линии на источник, так в противоположном направлении. И причина здесь в самой линии, её не направленности, в отличие от луча, вектора пеленга. Возможный вариант решения состоит в возврате к алгоритму максимального правдоподобия (14) в предположении, что расстояние до цели определяется исходя из оценочных координат (21). При таком допущении оценка получается в алгебраическом виде

$$\hat{z}'' = \frac{\sum_n (\dot{Z}_n + \hat{W}_n \cdot \hat{d}_n) \cdot \hat{d}_n^{-2}}{\sum_n \hat{d}_n^{-2}}, \quad (22)$$

где  $\hat{d}_n = \sqrt{H_n^2 + |\hat{z}' - \dot{Z}_n|^2}$  – оценочная наклонная дальность до цели.

На рисунках 2-5 показаны примеры расчёта координат цели приведенными алгоритмами. Моделирование проводилось для указанных ранее условий, но с движением по



окружности, пункты пеленгования указаны на выделенной дуге. Количество статистических экспериментов  $10^5$ . Эллипсы рассеивания строились применительно к оценкам максимального правдоподобия по методике [2].

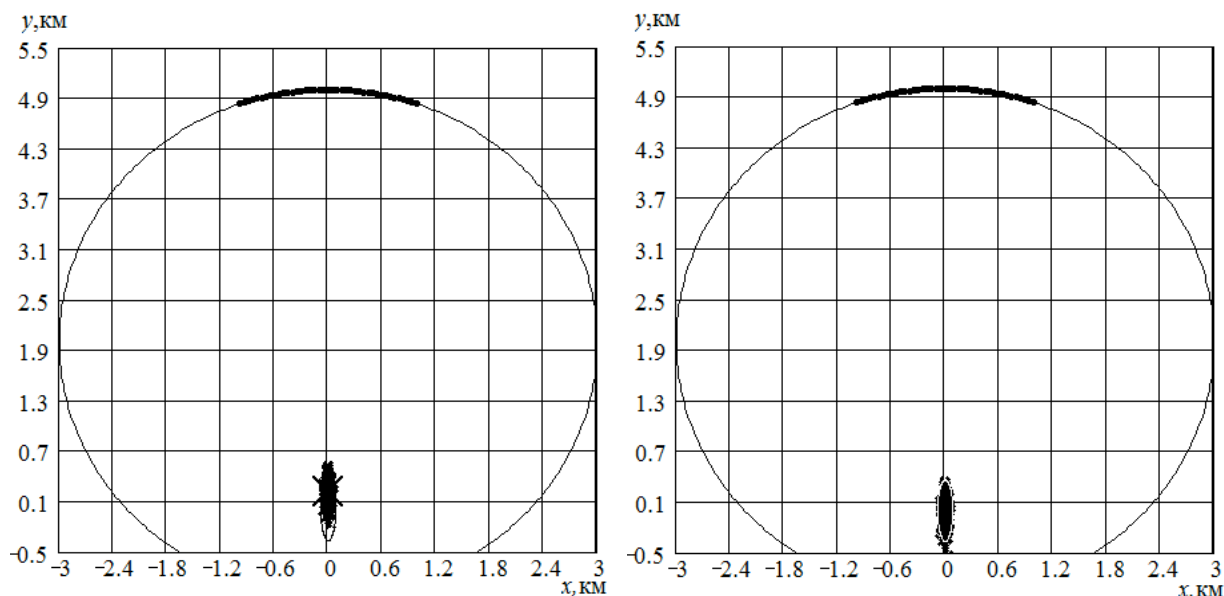


Рисунок.2 – Засечки координат и эллипсы рассеивания. Цель внутри зоны барражирования

Слева на рисунках 2-4 расчёты по алгоритму (15) по критерию минимума расстояния до линии пеленга, справа по его усовершенствованному варианту (21), для рисунка 5 слева расчёты по (21), а справа дополнительно по (22). Крестиком отмечены расчётные по (19) средние значения для алгоритма (15).

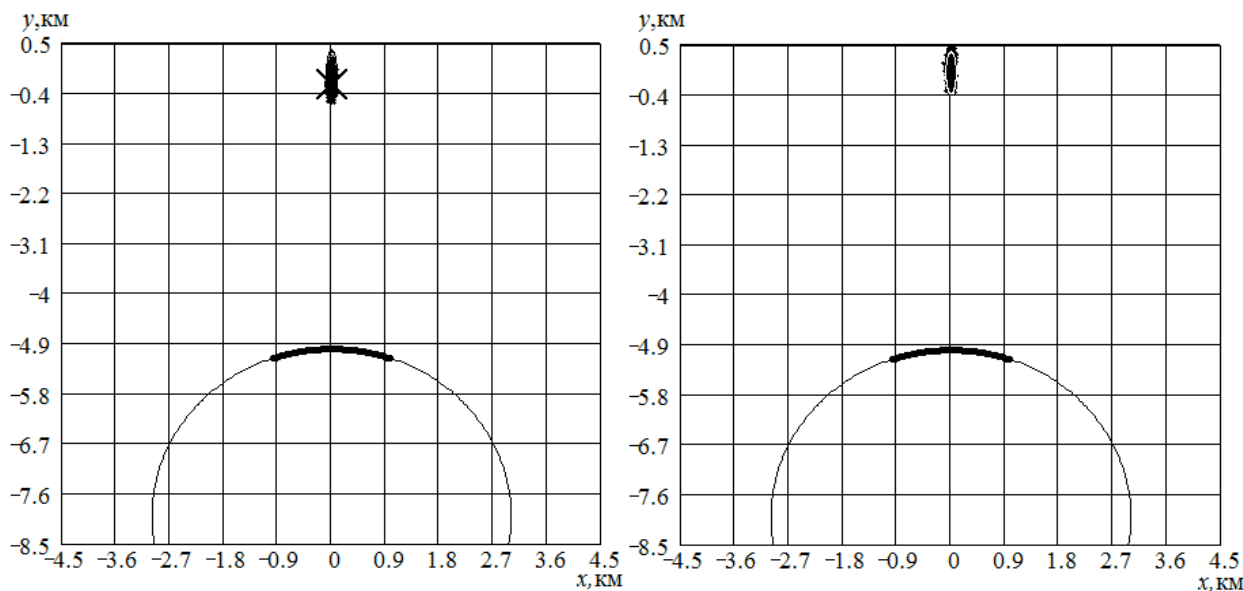


Рисунок 3 – Засечки координат и эллипсы рассеивания. Цель за зоной барражирования

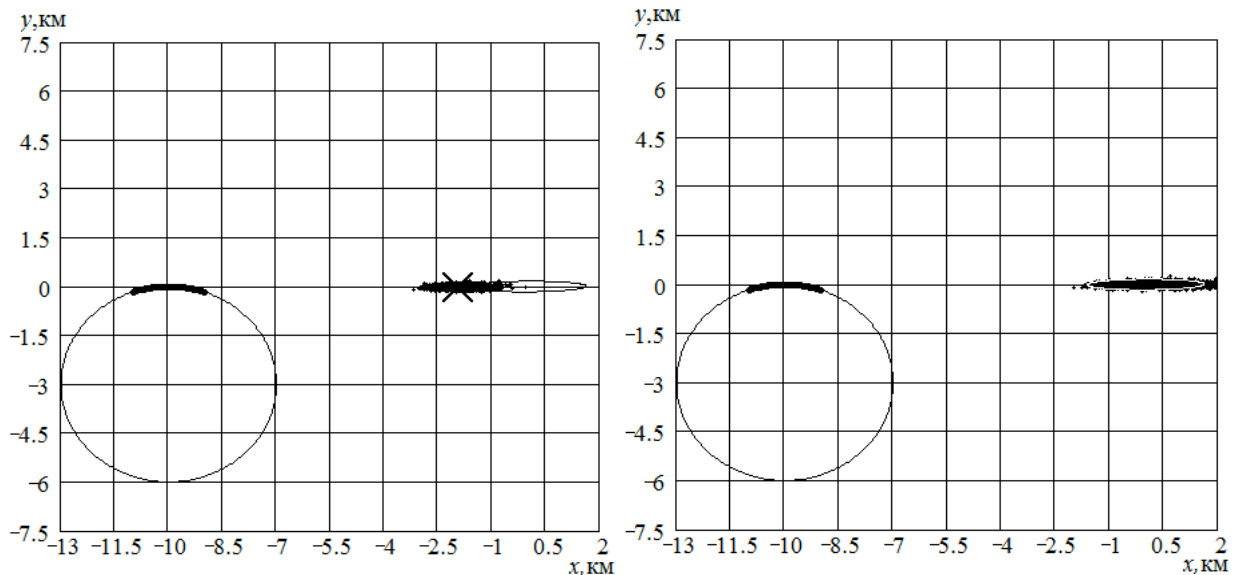


Рисунок 4 – Засечки координат и эллипсы рассеивания. Цель на продолжении базы

Применительно к рисункам 2, 3 исходная средняя квадратичная погрешность, составляющая 1,9 относительно потенциально возможного, с применением компенсации (21) снизилась до 1,1, а для цели на продолжении базы рис. 4 с 3,6 до 1,3 раз. Расчётные эллипсы рассеивания на правых рисунках соответствуют результатам моделирования. Видно, что при компенсации происходит не просто перемещение зоны засечек, но и распределение точек внутри эллипса, что приближает статистические свойства оценки (21) и максимального правдоподобия (14).

Рисунок 5 иллюстрирует эффект неоднозначности определения координат (21) удалённой цели и устранение такой неоднозначности с применением уточнения (22).

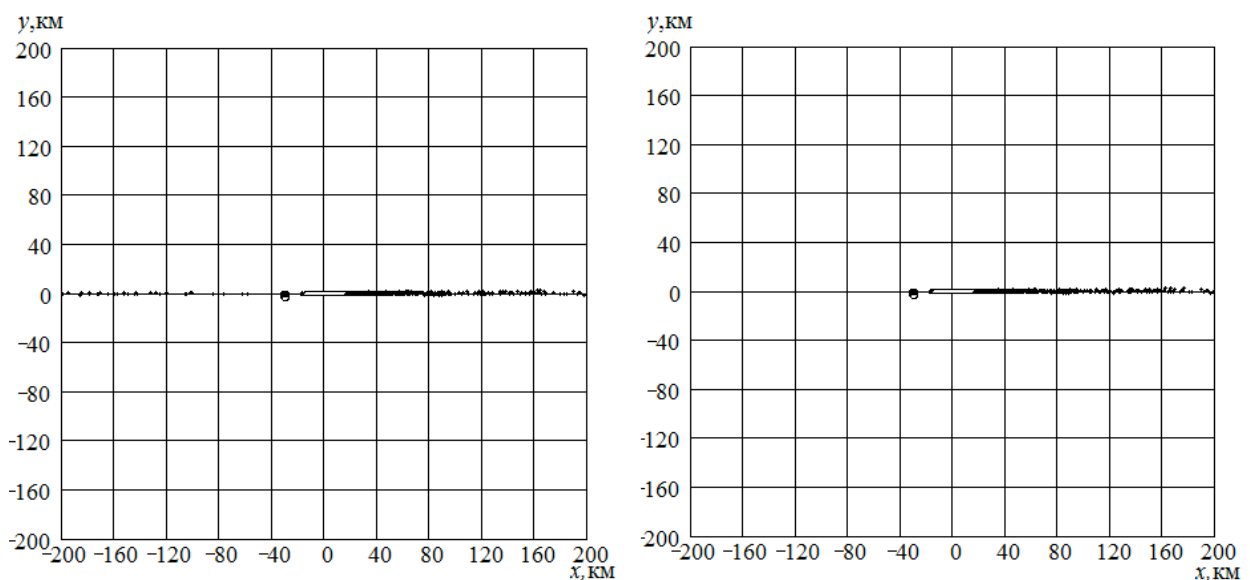


Рисунок 5 – Засечки координат и эллипсы рассеивания. Удалённая цель

В заключение отметим следующее:

1. Путём определения исходного направляющего вектора, его преобразования в промежуточную систему координат и перерасчёта двухмерного пеленга согласно его определению на заключительной стадии обеспечивается устранение ошибок пеленгования, обусловленных отклонением плоскости носителя и бортового пеленгатора от горизонтального положения.





2. Применение критерия минимума расстояния до линии пеленга сопровождается смещением оценок координат, что приводит к увеличению средней квадратичной погрешности до 3,6 раз относительно потенциально возможного. Компенсацией смещения достигается приближение статистических характеристик оценок к алгоритму максимального правдоподобия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уфаев А.В., Уфаев В.А. Двухмерное пеленгование при отражении радиоволн от земной поверхности. *Антенны*, 2013. № 6. С. 30–38.
2. Уфаев В.А. Определение местоположения наземных целей по результатам двухмерного пеленгования с лётно-подъёмных средств. *Антенны*, 2015. № 5. С. 58–64.
3. Асланян А.Э. Системы автоматического управления полётом летательных аппаратов. КВВАИУ, 1984.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2002.

#### REFERENCES

1. Ufaev A.V., Ufaev V.A. Dvukhmernoe pelengovanie pri otrazhenii radiovoln ot zemnoi poverkhnosti. *Antenny*, 2013. № 6. S. 30–38.
2. Ufaev V.A. Opredelenie mestopolozheniia nazemnykh tselei po rezul'tatam dvukhmernogo pelengovaniia s letno-pod"emnykh sredstv. *Antenny*, 2015. № 5. S. 58–64.
3. Aslanian A.E. Sistemy avtomaticheskogo upravleniia poletom letatel'nykh apparatov. KVVAIU, 1984.
4. Venttsel' E.S. Teoriia veroiatnostei. – M.: Vysshiaia shkola, 2002.

© Уфаев В.А., Беляев М.П., 2017

«Воздушно-космические силы. Теория и практика». Материал поступил в редколлегию 16.05.2017 г.

Уфаев Владимир Анатольевич, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела научно-исследовательского управления 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, vaiu@mil.ru

Беляев Максим Павлович, кандидат технических наук, заместитель начальника научно-исследовательского отдела научно-исследовательского управления 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, vaiu@mil.ru