



ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕЛИ С БОРТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ УГЛОВЫХ ЗАСЕЧЕК

М. Б. Алесов

АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»

Рассмотрена задача расчёта кинематических параметров подвижной цели по последовательным измерениям угловых пространственных засечек, получаемых с помощью аппаратуры визирования, установленной на борту движущегося летательного аппарата (ЛА). В качестве дополнительных неизвестных используются вспомогательные переменные – наклонные дальности до цели, что позволяет свести задачу к решению системы линейных алгебраических уравнений невысокого порядка, полученной методом взвешенных наименьших квадратов. Представленный численный пример демонстрирует работоспособность разработанного алгоритма.

Ключевые слова: пространственные угловые засечки, метод последовательных засечек, метод взвешенных наименьших квадратов, регуляризация систем уравнений.

Для цитирования:

Алесов, М. Б. Определение кинематических параметров цели с борта летательного аппарата методом последовательных угловых засечек / М. Б. Алесов // Системный анализ и логистика. – 2024. – № 1(39). – с. 66 – 75. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-1-66-75.

CALCULATION OF THE KINEMATIC PARAMETERS OF A TARGET FROM THE AIRCRAFT WITH THE METHOD OF SEQUENTIAL ANGULAR INTERSECTIONS

M. B. Alesov

«Ramenskoye Instrument-Building Design Bureau» Corp

The problem of calculating the kinematic parameters of a moving target using sequential angular spatial intersections obtained with of survey and search system equipment installed on board of moving aircraft is considered. As intermediate parameters, auxiliary variables are used – slant ranges, which made it possible to reduce the problem to solving a system of linear algebraic equations of low order obtained by the weighted least squares method. The presented numerical example demonstrates the efficiency of the developed algorithm.

Keywords: spatial angular intersections, sequential intersections method, weighted least squares method, equations system regularization.

For citation:

Alesov M. B. Calculation of the kinematic parameters of a target from the aircraft with the method of sequential angular intersections / M. B. Alesov // System analysis and logistics. – 2024. – № 1(39). – p. 66 – 75. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-1-66-75.

Введение

Задача определения параметров подвижной наземной цели с помощью оптических и радиолокационных средств визирования является важной функцией бортового оборудования летательных аппаратов (ЛА), используемых, в частности, при поисковых и мониторинговых операциях. В большинстве случаев при определении кинематических параметров цели (текущих координат и составляющих скорости) в качестве первичных измерений используются значения сферических координат из точки наблюдения (параметры сферической засечки): два угла визирования цели (направление на цель) и наклонная дальность (расстояние до цели), измеренная с помощью лазерного дальномера.

Однако при отсутствии дальномерных измерений имеется возможность определять параметры движения цели с борта ЛА методом последовательных пространственных угловых засечек, выполняемых с нескольких направлений. Такой способ применяется в геодезии, в частности, при выполнении привязочных работ [1] и уравнивании геодезических сетей [2]. При этом алгоритм решения полученной системы нелинейных уравнений сводится к



последовательному уточнению искоемых координат геодезической точки с требуемой точностью.

При решении задач определения источников излучения в процессе выполнения радиотехнической разведки также используется многократная пеленгация цели [3]. В этом случае расчёт параметров цели выполняется по методу наименьших квадратов относительно поправок углов [4, 5, 6].

Данная статья описывает алгоритм расчёта кинематических параметров подвижной цели по многократным последовательным измерениям углов направления на цель, полученным с помощью, установленной на борту движущегося ЛА аппаратуры визирования.

1. Постановка задачи и общая схема расчётов

Первичные измерения, выполненные из разных точек воздушного пространства (центров измерения), представляют собой пары углов визирования цели ($\zeta_{к,i}$, $\zeta_{т,i}$) относительно связанной системы координат ЛА, как показано на рисунке 1, где $\zeta_{к,i}$ – угол по курсу, или азимут (положительное направление – вправо от носа ЛА), $\zeta_{т,i}$ – угол по тангажу, или угол места (положительное направление – вверх от носа ЛА), нумерация измерений $i = 1, 2, \dots, k$; k – число измерений. На рисунке 1 показаны отрицательные направления углов визирования.

Одновременно с углами визирования в момент измерения фиксируются геодезические координаты ЛА на выбранном эллипсоиде: широта φ_i , долгота λ_i , высота h_i и отсчёт времени измерения t_i . Кроме того, запоминаются «угловые» параметры расположения ЛА (самолётные углы) относительно топоцентрической системы координат: тангаж θ_i , крен γ_i , истинный курс ЛА ψ_i .

В результате решения поставленной задачи требуется вычислить параметры движения цели – её геодезические координаты на эллипсоиде: широта $\varphi_{ц}$, долгота $\lambda_{ц}$, высота $h_{ц}$ в некоторый (начальный) момент времени и составляющие вектора скорости цели $\vec{v}_{ц}$ относительно локальной топоцентрической системы координат. Предполагается, что цель движется с постоянной скоростью за время измерений.

Дадим определения систем координат, которые используются при решении задачи.

Связанная (строительная) система координат ЛА (ССК ЛА) располагается в центре масс ЛА, ось x направлена вдоль строительной оси фюзеляжа к носу, ось y перпендикулярна продольной оси, лежит в плоскости симметрии ЛА и направлена к верхней его части, ось z направлена вправо от носовой части, дополняя систему координат до правой. Оси x , y , z ССК ЛА показаны на рисунке 1.

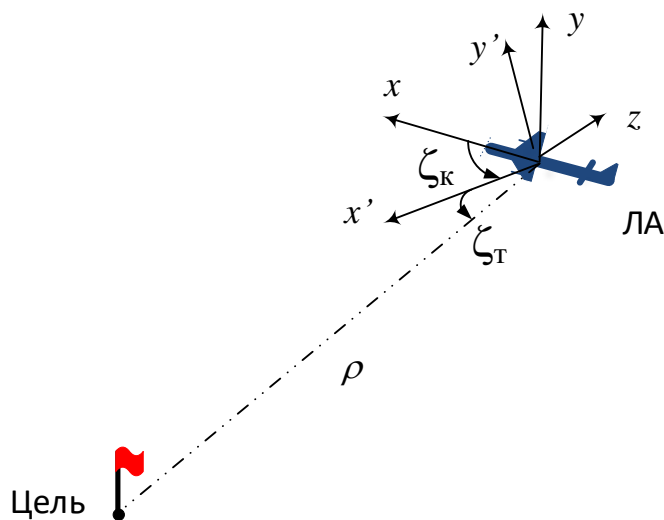


Рис. 1. Углы визирования цели с борта ЛА



Локальная топоцентрическая (нормальная) система ЛА (NUE) располагается в центре масс ЛА, в точке с геодезическими координатами (φ, λ, h) , ось X направлена по меридиану на север (*Nord*), ось Y – нормально к эллипсоиду вверх (*Up*), ось Z – дополняя систему до правой, на восток (*East*).

Непосредственный расчёт кинематических параметров цели выполняется в единой опорной прямоугольной системе координат. В качестве такой системы примем топоцентрическую систему координат точки первого измерения с геодезическими координатами $(\varphi_0, \lambda_0, h_0) = (\varphi_1, \lambda_1, h_1)$.

При наличии всего набора измерений $i = 1, 2, \dots, k$ алгоритм расчёта параметров движения цели заключается в выполнении следующих этапов (шагов):

- 1) расчёт радиус-вектора прямоугольных координат каждой точки отсчёта \vec{r}_i и каждого орта направления на цель (орта визирования цели) \vec{n}_i в опорной системе координат;
- 2) расчёт радиус-вектора прямоугольных координат $\vec{r}_Ц$ и путевой скорости цели $\vec{v}_Ц$ в опорной системе координат, а также наклонных дальностей до цели от каждой точки измерений (при необходимости);
- 3) расчёт кинематических параметров цели (геодезических координат и проекций скорости) цели на выбранном эллипсоиде.

Способ определения кинематических параметров цели (этап 2 алгоритма) методом последовательных пространственных угловых засечек рассмотрен непосредственно в следующем п. 2 статьи. Пересчёт координат точек отсчёта измерений и ортов направления в опорную систему координат, а также преобразование прямоугольных координат цели в геодезические координаты на выбранном эллипсоиде (этапы 1, 3 алгоритма) обсуждаются в п. 3.

В отличие от большинства работ, где используется прямой способ расчёта параметров цели [4, 5], здесь применяется способ введения дополнительных неизвестных – наклонных дальностей, имеющих интуитивно понятный геометрический смысл.

2. Метод последовательных пространственных угловых засечек

Направления визирования цели задаются пространственными единичными ортами \vec{n}_i , рассчитываемыми по измеренным углам $(\zeta_{К,i}, \zeta_{Т,i})$, $\|\vec{n}_i\| = 1$. Они располагаются в точках отсчёта измерений, определяемых положением ЛА в моменты измерений и задаваемых радиус-векторами \vec{r}_i . Все векторы заданы своими компонентами в опорной системе координат.

Уравнения измерений с учётом введения дополнительных переменных – наклонных дальностей записываются в векторном виде как

$$\vec{q}_i = \vec{r}_i + \rho_i \vec{n}_i - \vec{r}_Ц - \vec{v}_Ц t_i = \vec{0} \quad (i = 1, 2, \dots, k), \quad (1)$$

где ρ_i – наклонные дальности от точки измерения до цели (вспомогательные переменные), $\rho_i > 0$; \vec{q}_i – трёхмерный вектор невязок измерений; $\vec{0}$ – трёхмерный нулевой вектор.

Будем полагать, что полный вектор невязок измерений распределён нормально с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей Ω .

Система уравнений (1) является линейной относительно неизвестных (наклонных дальностей, координат и компонент скорости цели) и может быть записана в матричном виде как

$$A \hat{p} = \hat{s} + \hat{q}, \quad (2)$$



где A – матрица коэффициентов размером $3k \times (k+6)$; \hat{p} – вектор-столбец неизвестных высотой $k+6$, $\hat{p}^T = [\rho_1 \ \rho_2 \ \dots \ \rho_k \ \bar{r}_{Ц}^T \ \bar{v}_{Ц}^T] = [\hat{\rho}^T \ \hat{\kappa}_{Ц}^T]$; $\hat{\rho}$ – вектор-столбец наклонных дальностей до цели высотой k ; $\hat{\kappa}_{Ц}$ – вектор-столбец координат и проекций скорости цели высотой 6 ; \hat{s} – вектор-столбец свободных членов высотой $3k$; \hat{q} – полный вектор-столбец невязок высотой $3k$.

Система уравнений наблюдения (2) может быть решена методом наименьших квадратов. При этом необходимое соотношение между числом неизвестных и числом определяющих уравнений запишется как $(k+6) \leq 3k$ и, следовательно, минимально требуемое число угловых измерений для расчёта параметров цели равно $k = 3$.

В соответствии с методом взвешенных наименьших квадратов и с учётом линейности определяющих уравнений (2) система уравнений для расчёта неизвестных запишется как

$$B \hat{p} = \hat{f}, \quad (3)$$

где $B = A^T W A$ – квадратная матрица коэффициентов размером $k+6$; $\hat{f} = A^T W \hat{s}$ – вектор-столбец свободных членов высотой $k+6$; W – квадратная матрица «весов» размером $3k$, $W = \Omega^{-1}$.

Матричное уравнение (3) можно представить как систему двух блочных уравнений

$$\begin{cases} B_{11} \hat{\rho} + B_{12} \hat{\kappa}_{Ц} = \hat{f}_1, \\ B_{12}^T \hat{\rho} + B_{22} \hat{\kappa}_{Ц} = \hat{f}_2, \end{cases} \quad (4)$$

где B_{11} – квадратная матрица размером k ; B_{12} – матрица коэффициентов размером $k \times 6$; \hat{f}_1 – вектор-столбец свободных членов высотой k ; B_{22} – квадратная матрица размером 6 ; \hat{f}_2 – вектор-столбец свободных членов высотой 6 .

Решение системы (4) может быть явно записано:

$$\begin{aligned} \hat{\kappa}_{Ц} &= (B_{22} - B_{12}^T B_{11}^{-1} B_{12})^{-1} (\hat{f}_2 - B_{12}^T B_{11}^{-1} \hat{f}_1), \\ \hat{\rho} &= -B_{11}^{-1} B_{12} \hat{\kappa}_{Ц} + B_{11}^{-1} \hat{f}_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Для расчёта кинематических параметров цели $\hat{\kappa}_{Ц}$ потребуется найти обратную матрицу общего вида B_{11}^{-1} размером k и обратную матрицу $(B_{22} - B_{12}^T B_{11}^{-1} B_{12})^{-1}$ размером 6 . В общем случае коррелированных измерений блочная матрица коэффициентов B_{11} системы уравнений (4) имеет элементы:

$$b_{i,j} = \bar{n}_i^T w_{i,j} \bar{n}_j \quad (i, j = 1, \dots, k), \quad (6)$$

где $w_{i,j}$ – блочные элементы размером 3×3 весовой матрицы.

Элементы блочных матриц коэффициентов B_{12} , B_{22} рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \hat{b}_{i,k+1} &= -\bar{n}_i^T \sum_{j=1}^k w_{i,j} \quad (i = 1, \dots, k); \quad \hat{b}_{i,k+2} = -\bar{n}_i^T \sum_{j=1}^k w_{i,j} t_j \quad (i = 1, \dots, k); \\ \hat{b}_{k+1,k+1} &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k w_{i,j}; \quad \hat{b}_{k+1,k+2} = \hat{b}_{k+2,k+1} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k w_{i,j} t_j; \quad \hat{b}_{k+2,k+2} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k w_{i,j} t_i t_j, \end{aligned} \quad (7)$$



где $\hat{b}_{i,k+1}$, $\hat{b}_{i,k+2}$ – векторы-строки длиной 3 ($i = 1, \dots, k$); $\hat{b}_{k+1,k+1}$, $\hat{b}_{k+1,k+2}$, $\hat{b}_{k+2,k+1}$, $\hat{b}_{k+2,k+2}$ – квадратные матрицы-блоки размером 3.

Вектор-столбец свободных членов \hat{f} содержит следующие элементы:

$$f_i = -\bar{n}_i^T \sum_{j=1}^k w_{i,j} \bar{r}_j \quad (i = 1, \dots, k); \quad \hat{f}_{k+1} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k w_{i,j} \bar{r}_j; \quad \hat{f}_{k+2} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k w_{i,j} \bar{r}_j t_j, \quad (8)$$

где \hat{f}_{k+1} , \hat{f}_{k+2} – векторы-столбцы высотой 3.

Рассмотрим случай некоррелированности измерений, когда матрица «весов» W является блочно диагональной с блоками:

$$w_{i,j} = \delta_{i,j} w'_i, \quad (9)$$

где $\delta_{i,j}$ – символ Кронекера; w'_i – блочная матрица размером 3×3 , определяющая «вес» измерения с номером i .

В этом случае блочная матрица коэффициентов B_{11} системы уравнений (4) диагональная с элементами:

$$b_{i,i} = \bar{n}_i^T w'_i \bar{n}_i \quad (i = 1, \dots, k); \quad b_{i,j} = 0 \quad (i, j = 1, \dots, k; i \neq j). \quad (10)$$

Элементы блочных матриц коэффициентов B_{12} , B_{22} равны

$$\begin{aligned} \hat{b}_{i,k+1} &= -\bar{n}_i^T w'_i \quad (i = 1, \dots, k); \quad \hat{b}_{i,k+2} = -\bar{n}_i^T w'_i t_i \quad (i = 1, \dots, k); \\ \hat{b}_{k+1,k+1} &= \sum_{i=1}^k w'_i; \quad \hat{b}_{k+1,k+2} = \hat{b}_{k+2,k+1} = \sum_{i=1}^k w'_i t_i, \quad \hat{b}_{k+2,k+2} = \sum_{i=1}^k w'_i t_i^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Вектор-столбец свободных членов \hat{f} имеет следующие элементы:

$$f_i = -\bar{n}_i^T w'_i \bar{r}_i \quad (i = 1, \dots, k); \quad \hat{f}_{k+1} = \sum_{j=1}^k w'_j \bar{r}_j; \quad \hat{f}_{k+2} = \sum_{j=1}^k w'_j \bar{r}_j t_j. \quad (12)$$

Поскольку блочная матрица B_{11} является диагональной, то легко может быть рассчитана её обратная B_{11}^{-1} , и тогда расчётные формулы блочных матриц, используемых для определения неизвестных в формулах (5), имеют вид

$$B' = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k w'_i - \sum_{i=1}^k w'_i \bar{n}_i (\bar{n}_i^T w'_i \bar{n}_i)^{-1} \bar{n}_i^T w'_i & \sum_{i=1}^k w'_i t_i - \sum_{i=1}^k w'_i \bar{n}_i (\bar{n}_i^T w'_i \bar{n}_i)^{-1} \bar{n}_i^T w'_i t_i \\ \sum_{i=1}^k w'_i t_i - \sum_{i=1}^k w'_i \bar{n}_i (\bar{n}_i^T w'_i \bar{n}_i)^{-1} \bar{n}_i^T w'_i t_i & \sum_{i=1}^k w'_i t_i^2 - \sum_{i=1}^k w'_i \bar{n}_i (\bar{n}_i^T w'_i \bar{n}_i)^{-1} \bar{n}_i^T w'_i t_i^2 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\hat{f}_2 - B_{12}^T B_{11}^{-1} \hat{f}_1 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k w'_i \bar{r}_i - \sum_{i=1}^k w'_i \bar{n}_i (\bar{n}_i^T w'_i \bar{n}_i)^{-1} \bar{n}_i^T w'_i \bar{r}_i \\ \sum_{i=1}^k w'_i \bar{r}_i t_i - \sum_{i=1}^k w'_i \bar{n}_i (\bar{n}_i^T w'_i \bar{n}_i)^{-1} \bar{n}_i^T w'_i \bar{r}_i t_i \end{bmatrix},$$



где $B' = B_{22} - B_{12}^T B_{11}^{-1} B_{12}$.

Использование формул (5) в случае некоррелированных измерений потребует обращения матрицы коэффициентов B' порядка 6, который не зависит от числа используемых измерений. В силу симметричности матрицы B' для её обращения и решения первой подсистемы (5) рекомендуется применять метод квадратного корня.

Для равноточных измерений $w_{i,j} = \delta_{i,j} I_3$ матрица коэффициентов системы уравнений (3) имеет блочные элементы:

$$\begin{aligned} B_{11} &= I_k; \\ \hat{b}_{i,k+1} &= -\bar{n}_i^T \quad (i = 1, \dots, k); \quad \hat{b}_{i,k+2} = -\bar{n}_i^T t_i \quad (i = 1, \dots, k); \\ \hat{b}_{k+1,k+1} &= k I_3; \quad \hat{b}_{k+1,k+2} = \hat{b}_{k+2,k+1} = I_3 \sum_{i=1}^k t_i; \quad \hat{b}_{k+2,k+2} = I_3 \sum_{i=1}^k t_i^2, \end{aligned} \quad (14)$$

где I_3, I_k – единичные матрицы размерности 3 и k соответственно.

Вектор-столбец свободных членов \hat{f} образуют элементы:

$$f_i = -\bar{n}_i^T \bar{r}_i \quad (i = 1, \dots, k); \quad \hat{f}_{k+1} = \sum_{j=1}^k \bar{r}_j; \quad \hat{f}_{k+2} = \sum_{j=1}^k \bar{r}_j t_j. \quad (15)$$

Матрицы, входящие в расчётные формулы (5), имеют вид

$$\begin{aligned} B_{22} - B_{12}^T B_{11}^{-1} B_{12} &= \begin{bmatrix} k I_3 - \sum_{i=1}^k \bar{n}_i \bar{n}_i^T & I_3 \sum_{i=1}^k t_i - \sum_{i=1}^k \bar{n}_i \bar{n}_i^T t_i \\ I_3 \sum_{i=1}^k t_i - \sum_{i=1}^k \bar{n}_i \bar{n}_i^T t_i & I_3 \sum_{i=1}^k t_i^2 - \sum_{i=1}^k \bar{n}_i \bar{n}_i^T t_i^2 \end{bmatrix}, \\ \hat{f}_2 - B_{12}^T B_{11}^{-1} \hat{f}_1 &= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k \bar{r}_i - \sum_{i=1}^k \bar{n}_i \bar{n}_i^T \bar{r}_i \\ \sum_{i=1}^k \bar{r}_i t_i - \sum_{i=1}^k \bar{n}_i \bar{n}_i^T \bar{r}_i t_i \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (16)$$

В данном случае выражения (5) ещё больше упрощаются из-за того, что обратная матрица коэффициентов B_{11}^{-1} единичная.

3. Особенности реализации алгоритма расчёта

При близком расположении точек измерения, в частности, при автосопровождении цели, система уравнений (3) может быть плохо обусловленной. В этом случае выполняется регуляризация задачи, а именно, решается задача оптимизации с функционалом

$$J(\hat{p}) = \frac{1}{2} \hat{q}^T(\hat{p}) W \hat{q}(\hat{p}) + \frac{1}{2} \alpha (\hat{\kappa}_{\text{ц}} - \hat{\kappa}'_{\text{ц}})^T \tilde{W} (\hat{\kappa}_{\text{ц}} - \hat{\kappa}'_{\text{ц}}) \xrightarrow{\hat{p}} \min, \quad (17)$$

где $\hat{\kappa}'_{\text{ц}}$ – задаваемый вектор оценочных параметров цели; α – параметр регуляризации; \tilde{W} – квадратная положительно определённая матрица весов, характеризующая точность приближения неизвестных параметров цели, размером 6.

В результате получим систему уравнений (4) в виде



$$\begin{cases} B_{11} \hat{\rho} + B_{12} \hat{k}_{Ц} = \hat{f}_1, \\ B_{12}^T \hat{\rho} + (B_{22} + B'_{22}) \hat{k}_{Ц} = \hat{f}_2 + \hat{f}'_2, \end{cases} \quad (18)$$

где $B'_{22} = \alpha \tilde{W}$, $\hat{f}'_2 = \alpha \tilde{W} \hat{k}'_{Ц}$.

Решение системы (18) может быть записано как

$$\begin{aligned} \hat{k}_{Ц} &= (B_{22} + B'_{22} - B_{12}^T B_{11}^{-1} B_{12})^{-1} (\hat{f}_2 + \hat{f}'_2 - B_{12}^T B_{11}^{-1} \hat{f}_1), \\ \hat{\rho} &= -B_{11}^{-1} B_{12} \hat{k}_{Ц} + B_{11}^{-1} \hat{f}_1. \end{aligned} \quad (19)$$

Элементы вектора оценочных параметров $\hat{k}'_{Ц}$, используемого при регуляризации задачи (19), могут быть рассчитаны по известному значению высоты цели и двум пространственным засечкам. При этом высота наземной цели может быть получена по карте рельефа местности [6] или по значениям истинной (геометрической) высоты ЛА с помощью радиовысотомера при достаточно «ровной» подстилающей поверхности в районе наблюдения. Кроме того, может быть применён способ последовательных приближений: а именно, вначале в качестве оценочных параметров цели $\hat{k}'_{Ц}$ выбираются координаты первой точки измерений и нулевые скорости цели, а далее параметры цели уточняются итерационным решением первого уравнения системы (19).

Рассмотренный метод последовательных угловых засечек использует в качестве исходных данных векторы центров (точек) измерений \vec{r}_i и орты направления визирования \vec{n}_i в опорной системе координат. Однако в практике расчётов первичными данными задачи являются углы визирования цели в связанной системе координат ЛА и геодезические координаты ЛА на выбранном эллипсоиде в момент измерения, которые с учётом «угловых» параметров положения ЛА должны быть пересчитаны в опорную систему координат. Соответствующие формулы расчёта исходных данных задачи в опорной системе координат представлены в [7].

Полученные в результате применения метода последовательных засечек начальные и последующие координаты цели в опорной системе координат для практического применения обычно пересчитывают в геодезические координаты по формулам [7].

4. Пример расчёта кинематических параметров цели

Рассмотрим численный пример определения кинематических параметров движущейся цели по наблюдениям с борта ЛА. Для получения измерительных данных воспользуемся способом обращения задачи. А именно, зададим линию движения цели и траекторию полёта ЛА, затем рассчитаем углы визирования цели в ССК ЛА при пролёте ЛА рядом с целью. Рассчитанные по углам визирования орты направления \vec{n}_i и координаты точек отсчёта измерений \vec{r}_i будут пересчитаны в опорную систему и совместно с соответствующими моментами времени образуют последовательность многократных прямых угловых засечек цели.

Начальные геодезические координаты цели выбраны произвольно и на общеземном эллипсоиде ПЗ-90.11 равны: широта $\varphi_{Ц} = 50^\circ$, долгота $\lambda_{Ц} = 100^\circ$, высота $h_{Ц} = 300$ м. Цель движется горизонтально в юго-западном направлении со скоростью $V_{Ц} = 40$ км/час. ЛА облетает цель с постоянным креном влево $\gamma = -1,5^\circ$, нулевым углом тангажа и имеет воздушную скорость $V = 100$ км/час, как показано в плане на рисунке 2. Геодезические координаты цели и ЛА, а также значение истинного курса ЛА ψ_i для пяти моментов визирования цели даны в таблице 1. Превышение траектории ЛА над целью постоянно и равно



400 м, или 700 м над поверхностью эллипсоида.

Параметры пяти угловых измерений (углы визирования цели в ССК ЛА) составляют исходные данные задачи и приведены в последнем столбце таблицы 1.

Таблица 1 – Параметры угловых измерений цели

№ изм.	Отсчёт времени, с	Геокоординаты цели	Геокоординаты ЛА	Угол курса ЛА	Углы визирования цели
1	0	$\varphi_1 = 50^\circ$, $\lambda_1 = 100^\circ$	$\varphi_1 = 49^\circ 58' 22,91''$, $\lambda_1 = 100^\circ$	$\psi_1 = 90^\circ$	$\zeta_{К,1} = -90^\circ$; $\zeta_{Т,1} = -6,108^\circ$
2	84,93	$\varphi_2 = 49^\circ 59' 38,40''$, $\lambda_2 = 99^\circ 59' 26,50''$	$\varphi_2 = 49^\circ 58' 51,36''$, $\lambda_2 = 100^\circ 01' 46,59''$	$\psi_2 = 45^\circ$	$\zeta_{К,2} = -107,411^\circ$; $\zeta_{Т,2} = -5,828^\circ$
3	169,85	$\varphi_3 = 49^\circ 59' 16,80''$, $\lambda_3 = 99^\circ 58' 53,01''$	$\varphi_3 = 49^\circ 59' 59,96''$, $\lambda_3 = 100^\circ 02' 30,62''$	$\psi_3 = 0^\circ$	$\zeta_{К,3} = -107,044^\circ$; $\zeta_{Т,3} = -3,627^\circ$
4	254,78	$\varphi_4 = 49^\circ 58' 55,20''$, $\lambda_4 = 99^\circ 58' 19,53''$	$\varphi_4 = 50^\circ 01' 8,61''$, $\lambda_4 = 100^\circ 01' 46,67''$	$\psi_4 = -45^\circ$	$\zeta_{К,4} = -89,965^\circ$; $\zeta_{Т,4} = -2,450^\circ$
5	339,7	$\varphi_5 = 49^\circ 58' 33,60''$, $\lambda_5 = 99^\circ 57' 46,06''$	$\varphi_5 = 50^\circ 01' 37,09''$, $\lambda_5 = 100^\circ$	$\psi_5 = -90^\circ$	$\zeta_{К,5} = -64,830^\circ$; $\zeta_{Т,5} = -2,324^\circ$

Используемые в качестве исходных данных метода засечек координаты точек измерений и компоненты ортов направления на цель в опорной системе координат приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Координаты точек отсчёта и компоненты ортов визирования

№ изм.	Координаты точек отсчёта \vec{r}_i^T , м	Компоненты ортов ЛВ \vec{n}_i^T	Расчётные наклонные дальности ρ_i , м
1	(0; 0; 0)	(0,9912; -0,1324; 0)	3028,0
2	(879,5; -0,4; 2123,9)	(0,4583; -0,1261; -0,8798;)	3172,3
3	(2999,7; -1,4; 3000,0)	(-0,2931; -0,0876; -0,9521)	4552,7
4	(5120,6; -2,4; 2123,8)	(-0,7053; -0,0681; -0,7056)	5846,4
5	(6000,2; -2,8; 0)	(-0,9030; -0,0634; -0,4250)	6280,3

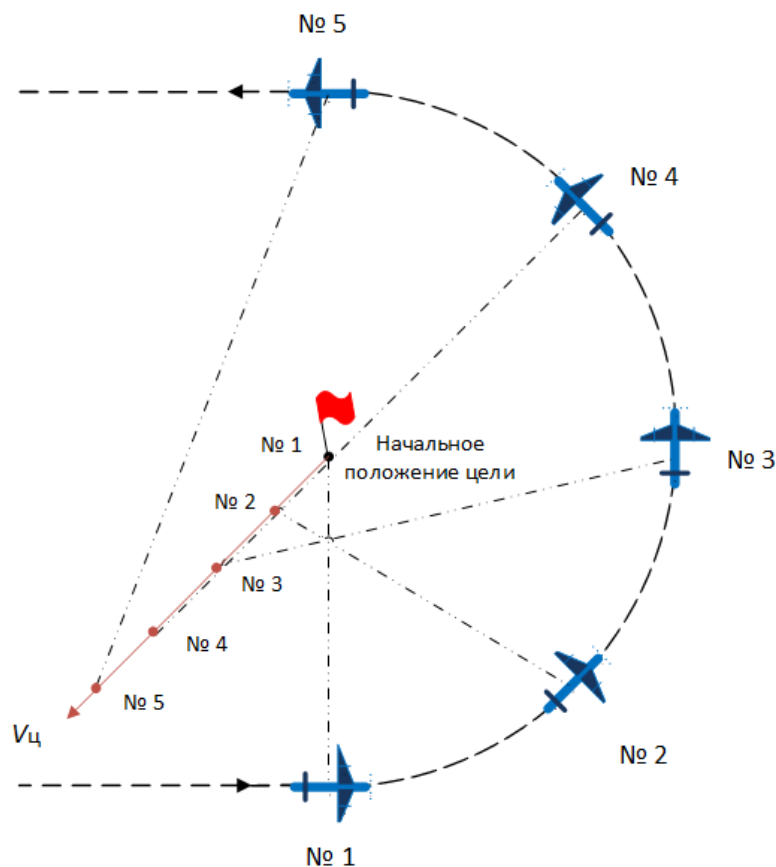


Рис. 2. Схема облёта цели

В последнем столбце таблицы 2 даны рассчитанные по формулам (5) наклонные дальности. Полученные в результате решения задачи начальные геодезические координаты цели равны: широта $\varphi_{Ц} = 50^{\circ} 0' 0,04''$, долгота $\lambda_{Ц} = 99^{\circ} 59' 59,99''$, высота $h_{Ц} = 300,04$ м, что совпадает с исходными данными обратной задачи с точностью до десятых угловых секунд геодезических координат и сантиметров для высоты. Вектор скорости цели $\vec{v}_{Ц}$ в опорной системе координат имеет модуль 40,02 км/час и азимут направления $-135,03^{\circ}$, что соответствует заданным значениям скорости с точностью до сотых соответствующих единиц измерения.

Представленные результаты расчётов демонстрируют работоспособность описанного алгоритма.

Заключение

Рассмотренный метод определения кинематических параметров цели по последовательным угловым измерениям визирования цели с борта движущегося ЛА, в основе которого лежит способ минимизации взвешенных ошибок измерений, приводит к решению системы линейных алгебраических уравнений невысокого порядка. При этом, некоррелированных для любого числа некоррелированных измерений задача сводится к обращению симметричной матрицы шестого порядка. Рассмотренный подход позволяет определить полный состав кинематических параметров цели, включая скорости и координаты. Метод допускает обобщение для расчёта не только скорости, но и ускорения движущейся цели.

Представленная методика может использоваться при разработке аппаратно-программных бортовых комплексов, применяемых при поисковых и мониторинговых операциях с использованием установленной на борту ЛА оптической и радиотехнической аппаратуры пространственно-углового визирования движущихся объектов.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селиханович В. Г. Геодезия / В. Г. Селиханович – М.: Альянс, 2018. – 544 с.
2. Поклад, Г. Г. Геодезия / Г. Г. Поклад, С. П. Гриднев. – М.: Академический Проект, 2007. – 592 с.
3. Мельников, Ю. П. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников излучения. / Ю. П. Мельников, С. В. Попов– М.: Радиотехника, 2008. – 432 с.
4. Шипко, В. В. Алгоритм определения координат и параметров движения наземных объектов / В. В. Шипко, В. И. Рубинов, И. Е. Шаронов, А. С. Ханов // Вест. Воронежского гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 14. № 1. – С. 43-48.
5. Грешилов, А. А. Определение координат источника радиоизлучения / А. А. Грешилов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 12. – 11 с.
6. Пат. № 2458360 РФ. МПК G 01S 13/46. Способ и устройство определения координат источника радиоизлучения / А. В. Наливаев и др. // Бюл. – 2012. – № 22. – 68 с.
7. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – М.: Стандартинформ, 2009. – 24 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Алесов Михаил Борисович –

ведущий инженер, канд. техн. наук, доцент

АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро», филиал в СПб
195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Михайлова, д. 21

E-mail: mbalesov@spb.rpkb.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alesov Mikhail Borisovich –

lead engineer, PhD. Tech. Sciences, associate Professor

Ramenskoye Instrument-Building Design Bureau Corp

21, Mikhailova str., Saint-Petersburg, 195009, Russia

E-mail: mbalesov@spb.rpkb.ru