

Исследование различных детерминированных подходов в угломерной радиопеленгации

Виноградов А.Д., Минин Л.А., Морозов Е.Ю., Ушаков С.Н.

1 Случай автономной системы

Автономная угломерная радионавигационная система (АУНС) предназначена для определения координат и угловой ориентации в пространстве двух воздушных объектов, оснащенных высотомерами и бортовыми радиоориентирами с наземного пункта управления (НПУ), оснащенного радиоориентиром.

Пусть радиоориентир НПУ расположен в точке M_0 с заранее известными координатами $M_0(x_0, y_0, z_0)$ в Балтийской системе координат (БСК), а воздушные объекты – в точках M_1 и M_2 с координатами $M_i(x_i, y_i, z_i)$, при этом z_i совпадает с измерениями высотомера h_i . НПУ M_0 способен измерять радиопеленг θ_i и угол возвышения β_i i -го воздушного объекта в БСК. Воздушный объект M_n способен измерять азимут α_{ni} и угол места ε_{ni} i -го радиоориентира (наземного или воздушного) в связанной системе координат БПА [1]. Схема размещения с указанными величинами указана на рис. 1. Пространственное положение радиоориентиров в БСК также можно охарактеризовать радиус-векторами $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$, где $i = 1, 2, 3$.

При детерминированном подходе для такой системы возможно однозначно определить координаты и угловую ориентацию воздушных объектов. Для этого нужно выполнить следующие ключевые шаги:

1. Определить координаты воздушных объектов в БСК.
2. Определить координаты радиоориентиров в связанной системе координат воздушного объекта M_1 ($\Sigma_{св1}$).
3. Составить матрицу поворота системы координат $\Sigma_{св1}$ по алгоритму, представленному ниже.
4. Определить углы поворота $\Sigma_{св1}$ по алгоритму, представленному в [1].
5. Повторить предыдущие шаги для воздушного ориентира M_2 .

Первая часть алгоритма реализуется явно — совокупность данных с высотомеров воздушных объектов и углов θ_i , β_i позволяют определить координаты летательных аппаратов однозначно. Таким образом, координаты радиоориентира M_1 и M_2 определяются следующим соотношением:

$$\begin{cases} x_1 = \rho_1 \cos \theta_1 \cos \beta_1 \\ y_1 = \rho_1 \sin \theta_1 \cos \beta_1 \\ z_1 = h_1 = \rho_1 \sin \beta_1 \\ \rho_1 = z_1 / \sin \beta_1 \end{cases}, \begin{cases} x_2 = \rho_2 \cos \theta_2 \cos \beta_2 \\ y_2 = \rho_2 \sin \theta_2 \cos \beta_2 \\ z_2 = h_2 = \rho_2 \sin \beta_2 \\ \rho_2 = z_2 / \sin \beta_2 \end{cases}. \quad (1)$$

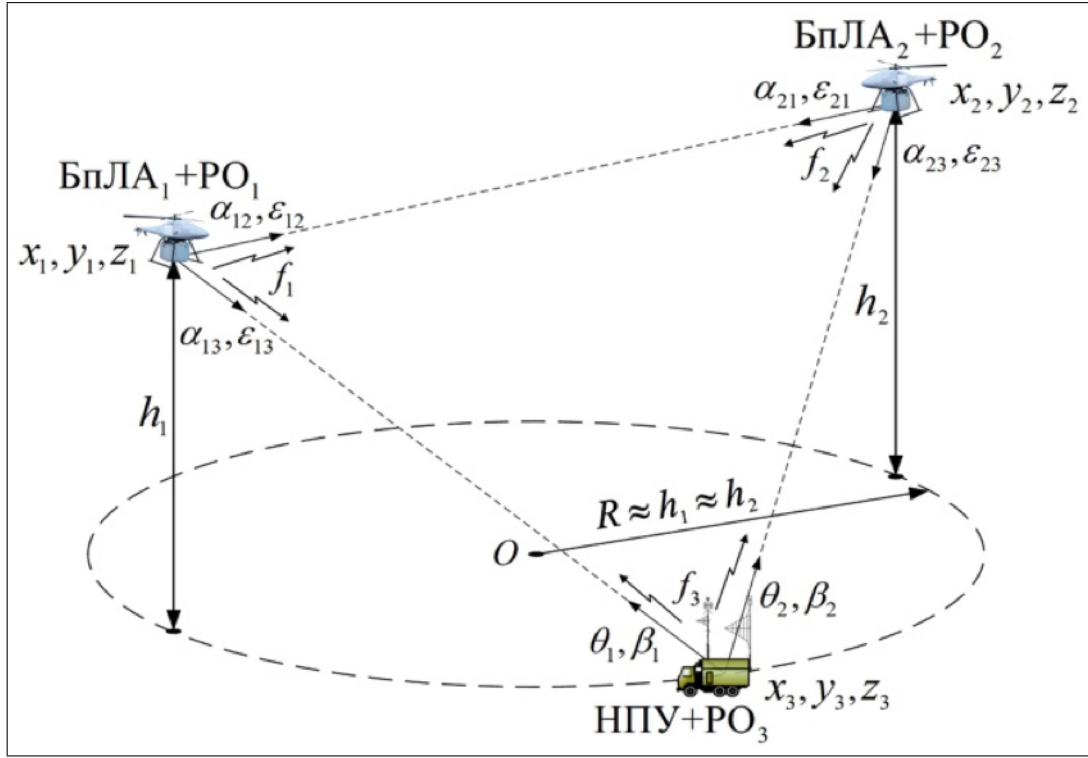


Рис. 1: Схемы размещения на местности БПЛА, НПУ и РО для реализации АУНС

Далее необходимо определить координаты радиоориентиров M_0 и M_2 в связанной системе координат воздушного объекта M_1 :

$$\begin{cases} x'_0 = \rho_{10} \cos \alpha_{10} \cos \varepsilon_{10} \\ y'_0 = \rho_{10} \sin \alpha_{10} \cos \varepsilon_{10} \\ z'_0 = z_1 - z_0 = \rho_{10} \sin \varepsilon_{10} \\ \rho_{10} = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0| \end{cases}, \begin{cases} x'_2 = \rho_{12} \cos \alpha_{12} \cos \varepsilon_{12} \\ y'_2 = \rho_{12} \sin \alpha_{12} \cos \varepsilon_{12} \\ z'_2 = z_1 - z_2 = \rho_{12} \sin \varepsilon_{12} \\ \rho_{12} = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| \end{cases}, \quad (2)$$

где $M'_0(x'_0, y'_0, z'_0)$ и $M'_2(x'_2, y'_2, z'_2)$ — координаты M_0 и M_2 в связанной СК M_1 .

Для определения матрицы поворота системы координат $\Sigma_{св1}$, необходимо сначала ввести радиус-вектора $\mathbf{r}'_0 = (x'_0, y'_0, z'_0)$ и $\mathbf{r}'_2 = (x'_2, y'_2, z'_2)$, которые определяют положения радиоориентиров M_0 и M_2 в связанной системе координат M_1 . Далее, зададим единичные векторы \mathbf{s}'_1 , \mathbf{s}'_2 и \mathbf{s}'_3 следующим образом:

$$\mathbf{s}'_1 = \frac{\mathbf{r}'_0}{|\mathbf{r}'_0|}, \quad \mathbf{s}'_2 = \frac{\mathbf{r}'_2}{|\mathbf{r}'_2|}, \quad \mathbf{s}'_3 = \mathbf{s}'_1 \times \mathbf{s}'_2. \quad (3)$$

Те же вектора в балтийской системе координат:

$$\mathbf{s}_{01} = \frac{\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1|}, \quad \mathbf{s}_{21} = \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|}, \quad \mathbf{n}_1 = \mathbf{s}_{01} \times \mathbf{s}_{21}. \quad (4)$$

Остюда получим следующее преобразование координат:

$$\mathbf{R}_1 \times \begin{pmatrix} \mathbf{s}_{01} \\ \mathbf{s}_{21} \\ \mathbf{n}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{s}'_1 \\ \mathbf{s}'_2 \\ \mathbf{s}'_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

В таком случае, матрицу поворота связанной системы координат $\Sigma_{\text{св1}}$ можно найти следующим образом:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} \mathbf{s}'_1 \\ \mathbf{s}'_2 \\ \mathbf{s}'_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathbf{s}_{01} \\ \mathbf{s}_{21} \\ \mathbf{n}_1 \end{pmatrix}^{-1} \quad (6)$$

По аналогии можно получить матрицу поворота \mathbf{R}_2 связанной системы координат M_2 . Вводятся радиус-вектора $\mathbf{r}''_0 = (x''_0, y''_0, z''_0)$, $\mathbf{r}''_1 = (x''_1, y''_1, z''_1)$, по ним же определяются единичные вектора \mathbf{s}''_1 , \mathbf{s}''_2 и \mathbf{s}''_3 :

$$\mathbf{s}''_1 = \frac{\mathbf{r}''_0}{|\mathbf{r}''_0|}, \quad \mathbf{s}''_2 = \frac{\mathbf{r}''_1}{|\mathbf{r}''_1|}, \quad \mathbf{s}''_3 = \mathbf{s}''_1 \times \mathbf{s}''_2. \quad (7)$$

В балтийской системе координат:

$$\mathbf{s}_{02} = \frac{\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_2|}, \quad \mathbf{s}_{12} = \frac{\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}, \quad \mathbf{n}_2 = \mathbf{s}_{02} \times \mathbf{s}_{12}. \quad (8)$$

Отсюда, матрица поворота определяется следующим образом:

$$\mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} \mathbf{s}''_1 \\ \mathbf{s}''_2 \\ \mathbf{s}''_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathbf{s}_{02} \\ \mathbf{s}_{12} \\ \mathbf{n}_2 \end{pmatrix}^{-1} \quad (9)$$

Углы курса ψ_1 , ψ_2 , крена μ_1 , μ_2 и тангажа ϑ_1 , ϑ_2 находятся из матриц \mathbf{R}_1 и \mathbf{R}_2 в соответствии с [1].

Список литературы

- [1] *Виноградов А.Д., Минин Л.А., Морозов Е.Ю., Ушаков С.Н.* Детерминированный подход к решению задачи определения координат и угловой ориентации бортовой пеленгаторной антенны по результатам радиопеленгования радиоориентиров // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2019, №1.