

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Калашникова А. С., Камышников А. Н.,  
научный руководитель канд. техн. наук Сухотин В. В.  
Институт инженерной физики и радиоэлектроники СФУ

В спутниковых технологиях актуальной является задача определения координат источника радиоизлучения (ИРИ), который может располагаться как на поверхности Земли, так и на аэрокосмическом носителе [1].

Для измерения координат ИРИ (углов  $\alpha$  и  $\beta$  в топоцентрической системе координат, рис. 1), расположенного в точке  $B_g$ , фазовый радиопеленгатор, установленный на борту коммуникационного ИСЗ, должен иметь две пары антенн 1–2 и 3–4 с взаимно перпендикулярными базами.

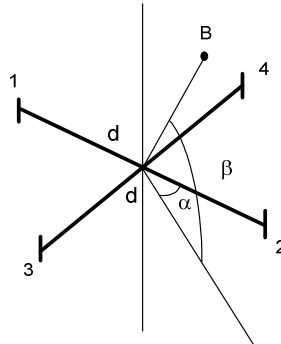


Рисунок 1 – Антенная решетка

Сдвиг фаз между Э.Д.С., наведенными в антеннах 1–2 и 3–4 [2]:

$$\Delta\psi_{1-2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\nu} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta, \quad \Delta\psi_{3-4} = \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\nu} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta, \quad (1)$$

где  $d$  – база антенн 1–2 и 3–4;

$\nu$  – длина волны принимаемого сигнала.

Углы  $\alpha$  и  $\beta$  из (1):

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta\psi_{1-2}}{\Delta\psi_{3-4}}, \quad \beta = \arccos \frac{\nu}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot \sqrt{\Delta\psi_{1-2}^2 + \Delta\psi_{3-4}^2}. \quad (2)$$

Поместив антенную решётку на геостационарном ИСЗ можно определить направление на ИРИ относительно ИСЗ [3]. Для определения координат ИРИ необходимо вычислить его координаты в геоцентрической системе координат с учетом эллиптичности Земли.

Для расчета искомой широты и долготы источника сигнала обратимся к рисунку 2 [4]. Переход от топоцентрической системы координат к геоцентрической требует модификации выражений (2), поэтому углы  $\alpha$  и  $\beta$  рассчитываются по формулам:

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta\psi_{3-4}}{\Delta\psi_{1-2}}, \quad \beta = \arcsin \frac{\nu}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot \sqrt{\Delta\psi_{1-2}^2 + \Delta\psi_{3-4}^2}. \quad (3)$$

где  $\alpha = 90 - \alpha_1$ ;  $\beta = 90 - \beta_1$ .

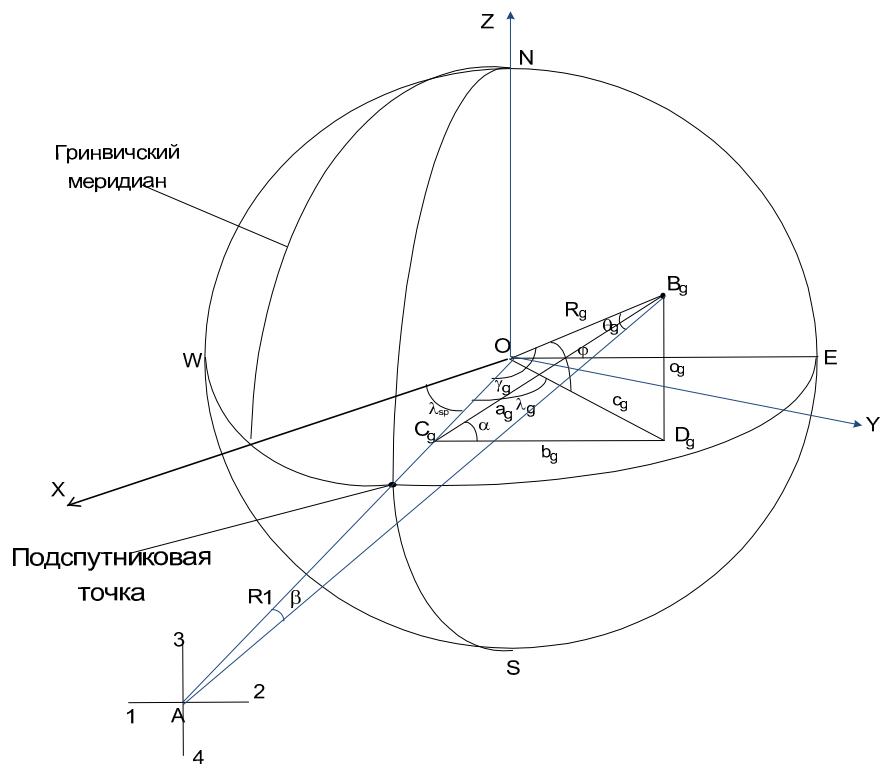


Рисунок 2 – Геометрические построения к расчету координат ИРИ

Точка  $D_g$  лежит в плоскости экватора и является проекцией точки  $B_g$ . Угол  $\phi$  в треугольнике  $B_gOD_g$  является широтой источника сигнала. Долгота  $\lambda$  источника сигнала равна  $\lambda = \lambda_{sp} + \lambda_g$ , ( $\lambda_g$  – угол треугольника  $C_gOD_g$ ;  $\lambda_{sp}$  – долгота ИСЗ). Если ИСЗ расположен на Гринвичском меридиане, то  $\lambda_{sp} = 0$ . Точка  $C_g$  на прямой R1 является проекцией точки  $D_g$  на меридиональную плоскость. Отметим, что  $R1 = 42253,135$  км. [5]

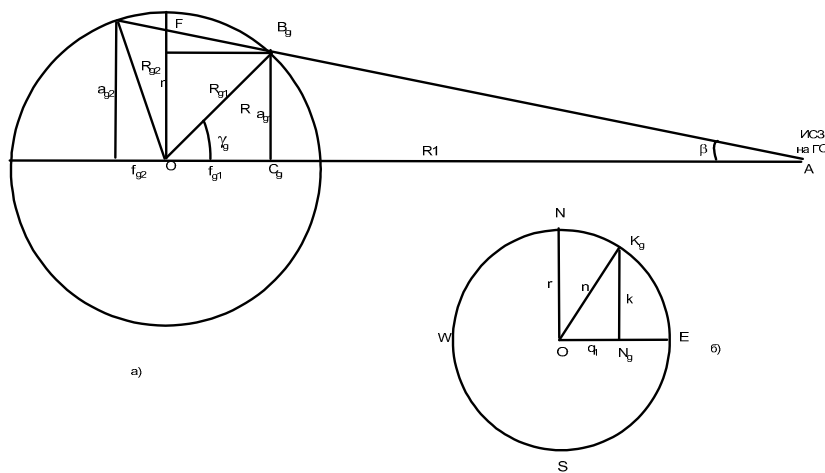


Рисунок 3 – Дополнительные геометрические построения к расчету координат ИРИ с учетом эллиптичности Земли

Для определения  $\lambda_g$  обратимся к сечению Земли меридиональной плоскостью (рисунок 3б). В треугольнике  $K_g ON_g$  угол  $\alpha$  вычисляется по формуле (3). Отрезок  $K_g N_g$  – перпендикуляр к плоскости экватора. Искомой в данном треугольнике является сторона  $n$ . На рисунке 3а изображена плоскость сфероиды с малой полуосью  $n$ , расположенной под углом  $\alpha$  к плоскости экватора. Малая полуось  $n$  пересекается с плоскостью треугольника  $B_g AO$ , расположенного под тем же углом  $\alpha$  к плоскости экватора. В треугольнике  $B_g AO$  угол  $\beta$  рассчитывается по формуле (3). Искомой на рисунке 3а является сторона  $R_g$  в треугольнике  $B_g AO$ .

Расчет широты  $\phi$  и долготы  $\lambda$  включает семь этапов:

1. Находится точка пересечения (Рис. 3б) малой полуоси  $n$  и дуги сфероиды, в результате решения системы двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} k &= q \cdot \operatorname{tg} \alpha \\ k &= r \cdot \sqrt{1 - \frac{q^2}{R^2}} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где первое уравнение описывает малую полуось, а второе – дугу сфероиды.

Решение (4) имеет два корня:

$$q_1 = r \cdot R \cdot \sqrt{\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha \cdot R^2 + r^2}}, \quad q_2 = -r \cdot R \cdot \sqrt{\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha \cdot R^2 + r^2}}. \quad (5)$$

В дальнейшем используется только положительный корень, поскольку отрицательное значение принадлежит противоположной части сфероиды.

Подставляем  $q_1$  в любое из уравнений (4), получаем значение  $k$ . Малая полуось  $n$  из прямоугольного треугольника  $K_g ON_g$  равна:

$$n = \sqrt{k^2 + q_1^2}. \quad (6)$$

2. Находится точка пересечения (см. рисунок 3а) прямой  $R_1$ , которая задается уравнением  $a_g = \operatorname{tg}(R_1 - f_g)$ , и дуги сфероиды  $a_g = n \cdot \sqrt{1 - \frac{f_g^2}{R^2}}$  путем решения системы двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a_g &= \operatorname{tg}(R_1 - f_g) \\ a_g &= n \cdot \sqrt{1 - \frac{f_g^2}{R^2}} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Решением квадратного уравнения

$$\left( \operatorname{tg}^2 \beta + \frac{n^2}{R^2} \right) \cdot f_g^2 - 2 \cdot R_1 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta \cdot f_g + (\operatorname{tg}^2 \beta \cdot R_1^2 - n^2) = 0 \quad (8)$$

являются два корня  $f_{g1}$  и  $f_{g2}$ :

$$f_{g1} = \frac{2 \cdot R_1 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + \sqrt{D}}{2 \cdot (\operatorname{tg}^2 \beta + \frac{n^2}{R^2})}, \quad f_{g2} = \frac{2 \cdot R_1 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta - \sqrt{D}}{2 \cdot (\operatorname{tg}^2 \beta + \frac{n^2}{R^2})}, \quad (9)$$

где  $D = (2 \cdot R_1 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta)^2 - 4 \cdot (\operatorname{tg}^2 \beta + \frac{n^2}{R^2}) \cdot (\operatorname{tg}^2 \beta \cdot R_1^2 - n^2)$ .

Из рис. 3а и (9) следует, что в дальнейших расчетах потребуется значение корня  $f_{g1}$ , равное стороне  $OC_g$ . Подставляя  $f_{g1}$  в любое уравнение системы (7) получаем значение стороны  $a_{g1}$ , затем из прямоугольного треугольника  $B_g OC_g$  находим  $R_{g1}$ :

$$R_{g1} = \sqrt{a_{g1}^2 + f_{g1}^2}. \quad (10)$$

3. Из прямоугольного треугольника  $B_g C_g D_g$  (Рис. 2) определяется  $o_g$ :

$$o_g = a_{g1} \cdot \sin \alpha. \quad (11)$$

4. Из прямоугольного треугольника  $B_g OD_g$  искомая широта  $\phi$  ИРИ:

$$\phi = \arcsin \frac{o_g}{R_{g1}}. \quad (12)$$

5. Из прямоугольного треугольника  $B_g OD_g$   $c_g$  равен:

$$c_g = \sqrt{R_{g1}^2 - o_g^2}. \quad (13)$$

6. Из прямоугольного треугольника  $D_g OC_g$ , угол  $\lambda_g$ :

$$\lambda_g = \arccos \frac{f_{g1}}{c_g}. \quad (14)$$

7. Искомая долгота  $\lambda$  источника сигнала равна:

$$\lambda = \lambda_{sp} + \lambda_g. \quad (15)$$

В геоцентрической системе координат (Рис. 2)

$$x = c_g \cos \lambda, \quad y = c_g \sin \lambda, \quad z = o_g \quad (16)$$

Таким образом, описанная методика, опирающаяся на использование на борту космического аппарата антенной решетки, позволяет решить задачу определения координат ИРИ на поверхности Земли.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в Сибирском федеральном университете (Договор № 02.G25.31.0041).

#### Список литературы

1. Г. Верзунов, П. Корвяков, В. Могучев. Спутниковая связь: радиопеленгация земных станций. Технологии и средства связи, 2009.
2. Пестряков В.Б. Фазовые радиотехнические системы (Основы статистической теории) Советское радио, 1968.
3. Панько С. П., Сухотин В. В. Фазовая пеленгация в спутниковой связи. Электронный журнал "Исследовано в России", 35, 2003.
4. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Аналитическая геометрия. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1971.
5. Чернявский Г.М., Бартенев В.А. Орбиты спутников связи. – М.: Связь, 1978. – 240 с.