

ОЦЕНКА ЗОНЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РАДИООТРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С КАРТОЙ МЕСТНОСТИ

*Новиков А.И., к.э.н., доцент Рязанского государственного радиотехнического университета,
e-mail: novikovanatoly@yandex.ru;*

*Юкин С.А., к.т.н., доцент Рязанского государственного радиотехнического университета,
e-mail: yukin-s@yandex.ru.*

Ключевые слова: совмещение, радиолокационные изображения подстилающей поверхности, зона неопределенности.

Введение

Современные летательные аппараты (ЛА) оснащены разнообразными бортовыми системами технического зрения (СТЗ), работающими не только в различных спектральных диапазонах (тепло- и телекамеры), но и на различных принципах (лидар, телекамера, радиолокатор). В связи с многообразием сенсоров стоит задача объединения формируемой информации – приведение ее к сравнимому виду для дальнейшего совмещения. Подобные задачи совмещения возникают в различных областях техники [1]. При этом возникают трудности, обусловленные различием в системах координат, относительно которых формируются изображения от различных СТЗ, а также отсутствие возможности распознавать объекты на этих изображениях по прямым признакам.

Невозможность совмещения разнородных изображений по прямым признакам (например, по форме), приводит к поиску косвенных методов, основанных на привязке изображений от различных СТЗ к цифровой карте местности (ЦКМ). Для этого необходимо синхронизировать получаемые изображения по пространственному положению, т.е. провести пространственное совмещение всех обрабатываемых изображений, причем совмещение должно выполняться автоматически и в режиме реального времени. Подобные подходы применяются при выявлении изменений на однородных изображениях (в задачах взаимной компенсации с целью выявления расхождений – обнаружения новых объектов) [2].

Формируемые по маршруту движения ЛА изображения невозможно сразу совмещать с картой, это связано с ошибками как навигационной системы ЛА так и с ошибками датчиков, определяющих пространственное положение СТЗ (например, ракурс). В этом случае для автоматического совмещения, помимо прочего, необходимо провести коррекцию возникающих геометрических искажений, вызванных неточностью измерений навигационной системы. При совмещении изображений необходимо учитывать жесткие требования к точности совмещения разнородных изображений, изложенные в [3].

Один из наиболее надежных и апробированных способов совмещения радиолокационных изображений

Предложена математическая модель зоны неопределенности на подстилающей поверхности, соответствующей зоне обзора бортовой радиолокационной станции, работающей в передней полусфере. Приведены результаты исследования модели для различных вариантов ошибок датчиков навигационных параметров. Показано, что для задач совмещения картографической информации с формируемым радиолокационным изображением необходимо расширить зону поиска с учетом зоны неопределенности в зависимости от ракурса обзора, приводящего к несимметричным искажениям (расширениям предполагаемой зоны обзора) относительно центра сектора сканирования.

(РЛИ) и изображений, синтезированных по ЦКМ, заключается в переборе всех возможных положений РЛИ относительно ЦКМ. Для решения этой задачи необходимо иметь оценки возможного пространственного положения сектора обзора РЛС на подстилающей поверхности. Теоретически таких положений – неограниченное множество, но фактически диапазон этих положений определяется точностью навигационной системы и датчиков СТЗ (для РЛС – точностью ориентации диаграммы направленности антенны в пространстве).

В [4] выполнены исследования зоны обзора в плоскости Земли для видеоизображений, получаемых на борту ЛА. Принципы формирования видеоизображения и РЛИ имеют существенные отличия, что, в конечном итоге, проявляется как в форме, так и в параметрах зон обзора в плоскости Земли для этих видов сенсоров СТЗ. Вместе с тем, некоторые элементы математических моделей процессов формирования изображений этими способами имеют общие основания. В частности, это относится к учету углов позиционирования ЛА в пространстве и ошибок по ним навигационной системы.

Цель работы – нахождение возможной (предельной) зоны обзора РЛС на подстилающей поверхности и ее геометрических искажений, обусловленных ошибками навигационной системы ЛА и датчиков СТЗ.

Постановка задачи

Необходимо построить и исследовать математические модели РЛИ для различных условий работы БРЛС, а именно:

- при отсутствии ошибок навигационной системы;
- при наличии угловых ошибок навигационной системы:
 - а) без учета стробирования по дальности;
 - б) с учетом стробирования;
- с учетом всех видов ошибок.

Для построения и исследования математической модели зоны обзора радиолокационного изображения в плоскости Земли необходимо определить набор параметров БРЛС и их модельные значения.

Параметры носителя РЛС:

h – высота носителя БРЛС, м, (в модельных расчетах $h = 1000$ м).

Сектор обзора подстилающей поверхности:

β_v – угол наклона верхней части ДНА по углу места (вверх (+), вниз (-)), град, (в модельных расчетах $\beta_v = 5^\circ$);

β_n – угол наклона нижней части ДНА по углу места (вверх (+), вниз (-)), град, (в модельных расчетах $\beta_n = 35^\circ$);

α – ширина сектора сканирования по азимуту, град, (в модельных расчетах $\alpha = 40^\circ$);

α_0 – угол поворота сектора сканирования по азимуту относительно оси летательного аппарата (ЛА), град.

Во введенных обозначениях β_v и β_n определяют сектор обзора РЛС в угломестной плоскости, если обзор ведется одной строкой, то соответствующие величины находятся исходя из ширины ДНА и ее наклона относительно строительной оси ЛА.

Параметры подстилающей поверхности: в первом приближении считаем, что поверхность ровная.

Параметры навигационной системы (рис. 1):

$\Delta\theta = 0,1^\circ$ – точность датчиков по тангажу, град;

$\Delta\gamma = 0,1^\circ$ – точность датчиков по крену, град;

$\Delta\psi = 0,1^\circ$ – точность датчиков по углу рысканья, град;

$\Delta h = 20$ – точность датчиков высоты, м;

$\Delta x = 50$ – точность определения координат ЛА по оси Ox ;

$\Delta y = 50$ – точность определения координат ЛА по оси Oy ;

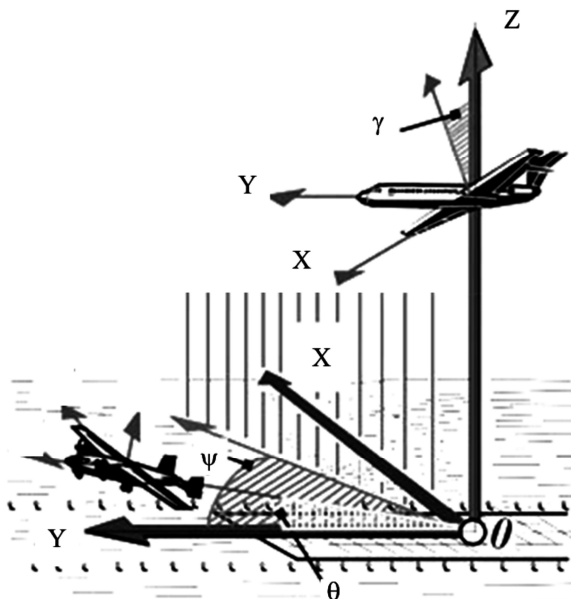


Рис. 1. Пояснения к введенным обозначениям

Параметры антенной системы:

$\Delta\alpha_{datch} = 0,02^\circ$ – точность электронного позиционирования ДНА, град;

$\Delta pr = 0,2^\circ$ – точность позиционирования антенной системы за счет приводов, град.

1. Модель РЛИ при отсутствии ошибок навигационной системы

Примем следующие допущения:

– дальность действия РЛС не больше максимальной наклонной дальности, которую определим как расстояние от носителя РЛС (ЛА) до подстилающей поверхности при угле наклона верхней части луча ДНА $\beta_v = 5^\circ$; обозначим эту величину R_{max} (рис. 2);

– минимально анализируемая дальность – расстояние от носителя РЛС (ЛА) до подстилающей поверхности при угле наклона нижней части луча ДНА $\beta_n = 35^\circ$; обозначим эту величину R_{min} .

Используя отношения между элементами на рис. 2, получаем:

$$R_{max} = h / \sin \beta_v, \quad R_{min} = h / \sin \beta_n; \tag{1}$$

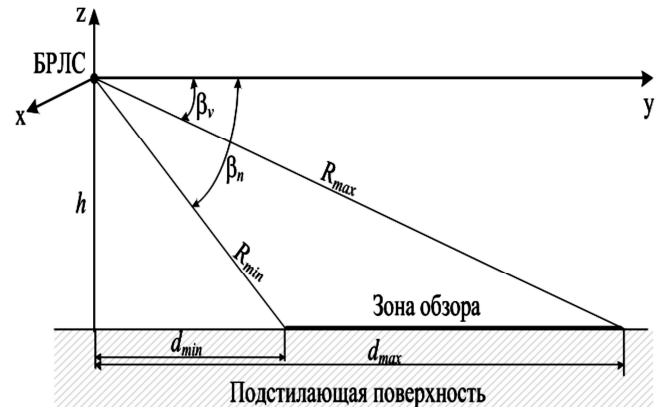


Рис. 2. Формируемая зона обзора относительно ЛА

Расстояния d_{max} , d_{min} – соответственно до переднего и заднего фронтов зоны обзора в плоскости Земли и ширину d этой зоны найдем по формулам:

$$\begin{aligned} d_{max} &= R_{max} \cdot \cos \beta_v, \\ d_{min} &= R_{min} \cdot \cos \beta_n, \\ d &= d_{max} - d_{min} \end{aligned} \tag{2}$$

Зона обзора в плоскости Земли при $\alpha_0 = 0$, т.е. при условии, что центр сектора обзора совпадает с осью ЛА, и при отсутствии ошибок в определении параметров навигационной системы имеет вид усеченного кругового сектора $A_1 B_1 B_2 A_2$ (рис. 3).

Координаты угловых точек сектора обзора в плоскости Земли при названных ограничениях найдем по формулам:

– точек A_1 и A_2 :

$$x_{A1} = d_{min} \sin \frac{\alpha}{2}, \quad y_{A1} = d_{min} \cos \frac{\alpha}{2}; \tag{3}$$

$$x_{A2} = -x_{A1}, \quad y_{A2} = y_{A1};$$

– точек B_1 и B_2 :

$$x_{B1} = d_{\max} \sin \frac{\alpha}{2}, \quad y_{B1} = d_{\max} \cos \frac{\alpha}{2}; \quad (4)$$

$$x_{B2} = -x_{B1}, \quad y_{B2} = y_{B1}.$$

Сформируем из них матрицу

$$X = \begin{pmatrix} x_{A1} & y_{A1} \\ x_{B1} & y_{B1} \\ x_{B2} & y_{B2} \\ x_{A2} & y_{A2} \end{pmatrix}.$$

Повернем теперь полученное изображение усеченного сектора на угол α_0

$$X_1 = X \cdot P \quad (5)$$

где $P = \begin{pmatrix} \cos \alpha_0 & \sin \alpha_0 \\ -\sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 \end{pmatrix}$ – матрица преобразования.

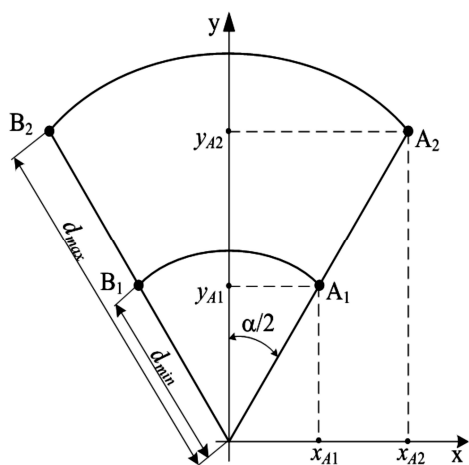


Рис. 3. Форма зоны обзора в плоскости Земли

Выполним вычисления в соответствии с формулами (1) – (5) и с исходными данными, приведенными в постановке задачи. В результате получим зону обзора, приведенную на рис. 4.

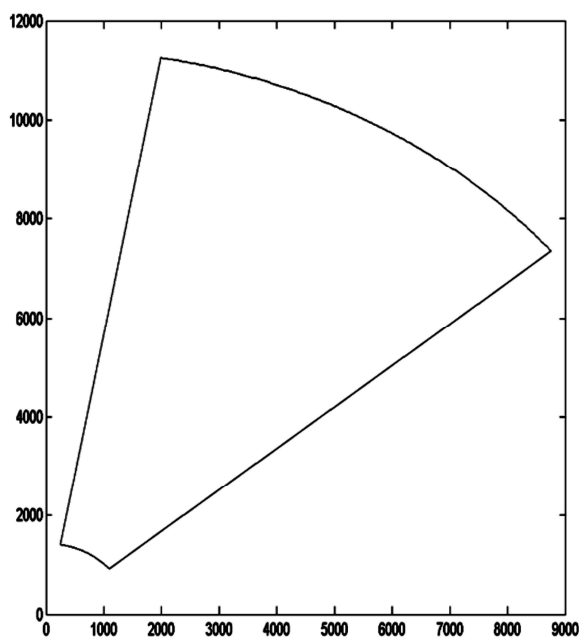


Рис. 4. Зона обзора при отсутствии ошибок

Параметры зоны обзора, приведенной на рис. 4:

– максимальная и минимальная наклонные дальности $R_{\max} = 11470 \text{ м}$, $R_{\min} = 1743,4 \text{ м}$;

– расстояния от точки O' – начала плоской системы координат в плоскости Земли – до переднего и заднего фронтов зоны обзора соответственно $d_{\max} = 11430 \text{ м}$, $d_{\min} = 1428,1 \text{ м}$;

– глубина зоны обзора $d = d_{\max} - d_{\min} = 10002 \text{ м}$;

– координаты угловых точек A_1, B_1, B_2, A_2 :

$$A_1(1094,0; 918,0), \quad B_1(8756,0; 7347,1),$$

$$B_2(1984,8; 11256,0), \quad A_2(248,0; 1406,5).$$

2. Модель РЛИ с учетом угловых ошибок навигационной системы

а) Без учета стробирования по дальности. Для построения зоны обзора в плоскости Земли с учетом ошибок в определении положения ЛА в пространстве реализуем следующий алгоритм:

– найдем орты векторов $\overline{OA_1}, \overline{OB_1}, \overline{OB_2}, \overline{OA_2}$;

– осуществим поворот этой системы векторов в плоскостях тангажа, крена и курса (рысканья) на заданные углы; в результате получим новые единичные векторы $\overline{OA'_1}, \overline{OB'_1}, \overline{OB'_2}, \overline{OA'_2}$;

– составим уравнения прямых, проходящих через точку – начало подвижной системы координат (в ней находится ЛА), – и найдем координаты точек A'_1, B'_1, B'_2, A'_2 пересечения этих прямых с плоскостью Земли, т.е координаты угловых точек зоны обзора, построенной с учетом угловых ошибок.

Орты векторов $\overline{OA_1}, \overline{OB_1}, \overline{OB_2}, \overline{OA_2}$ найдем по стандартной формуле

$$\bar{q}_i = \left(\frac{x_i}{|\bar{q}_i|}, \frac{y_i}{|\bar{q}_i|}, \frac{-h}{|\bar{q}_i|} \right) \quad i = \overline{1,4}.$$

Здесь $(x_i; y_i; -h)$ – координаты векторов $\overline{OA_1}, \overline{OB_1}, \overline{OB_2}, \overline{OA_2}$ соответственно в трехмерном пространстве.

Введем обозначения $l_i = \frac{x_i}{|\bar{q}_i|}$, $m_i = \frac{y_i}{|\bar{q}_i|}$, $n_i = \frac{-h}{|\bar{q}_i|}$ и сформируем из векторов \bar{q}_i матрицу

$$Q = \begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \\ l_4 & m_4 & n_4 \end{pmatrix}.$$

Для нахождения ортов векторов $\overline{OA'_1}, \overline{OB'_1}, \overline{OB'_2}, \overline{OA'_2}$ необходимо умножить матрицу Q на матрицу

$$T(\tilde{\Delta}\gamma, \tilde{\Delta}\theta, \tilde{\Delta}\psi) = T_{\tilde{\Delta}\gamma} \cdot T_{\tilde{\Delta}\theta} \cdot T_{\tilde{\Delta}\psi} \quad (6)$$

реализующую поворот единичных векторов $\bar{q}_i, i = \overline{1,4}$ на углы $\tilde{\Delta}\psi, \tilde{\Delta}\theta, \tilde{\Delta}\gamma$ в плоскостях курса, тангажа и крена

соответственно. Величины $\tilde{\Delta}\psi, \tilde{\Delta}\theta, \tilde{\Delta}\gamma$ являются суммарными угловыми ошибками, а именно:

$$\begin{aligned} \tilde{\Delta}\psi &= \Delta\psi + \mu_1 \cdot \Delta\alpha_{datch} + \mu_2 \cdot \Delta pr, \\ \tilde{\Delta}\theta &= \Delta\theta + \nu_1 \cdot \Delta\alpha_{datch} + \nu_2 \cdot \Delta pr, \\ \tilde{\Delta}\gamma &= \Delta\gamma + \lambda_1 \cdot \Delta\alpha_{datch} + \lambda_2 \cdot \Delta pr. \end{aligned} \quad (7)$$

В формулах (7) $\mu_i, \nu_i, \lambda_i, i = \overline{1,2}$ – весовые коэффициенты, принимающие значения из отрезка $[0,1]$. Они призваны учитывать вклад угловых ошибок $\Delta\alpha_{datch}$ и Δpr позиционирования ДНА по азимуту и позиционирования антенной системы за счет приводов соответственно.

Матрицы $T_{\tilde{\Delta}\psi}, T_{\tilde{\Delta}\theta}, T_{\tilde{\Delta}\gamma}$ в составе формулы (7) имеют следующий вид

$$\begin{aligned} T_{\tilde{\Delta}\psi} &= \begin{pmatrix} \cos \tilde{\Delta}\psi & -\sin \tilde{\Delta}\psi & 0 \\ \sin \tilde{\Delta}\psi & \cos \tilde{\Delta}\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ T_{\tilde{\Delta}\theta} &= \begin{pmatrix} \cos \tilde{\Delta}\theta & 0 & \sin \tilde{\Delta}\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \tilde{\Delta}\theta & 0 & \cos \tilde{\Delta}\theta \end{pmatrix}, \\ T_{\tilde{\Delta}\gamma} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \tilde{\Delta}\gamma & -\sin \tilde{\Delta}\gamma \\ 0 & \sin \tilde{\Delta}\gamma & \cos \tilde{\Delta}\gamma \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

Пусть матрица $T(\tilde{\Delta}\gamma, \tilde{\Delta}\theta, \tilde{\Delta}\psi)$ найдена. Тогда скорректированные единичные векторы $\overline{q'_1} = \overline{OA'_1}$, $\overline{q'_2} = \overline{OB'_1}$, $\overline{q'_3} = \overline{OB'_2}$, $\overline{q'_4} = \overline{OA'_2}$ будут элементами соответственно первой, второй, третьей и четвертой строк матрицы

$$Q' = Q \cdot T(\tilde{\Delta}\gamma, \tilde{\Delta}\theta, \tilde{\Delta}\psi) \quad (8)$$

Осталось реализовать последний шаг алгоритма – найти координаты угловых точек зоны обзора в плоскости Земли с учетом угловых ошибок.

Из уравнений прямых $OA'_1, OB'_1, OB'_2, OA'_2$, проходящих через точку O , в которой находится ЛА, с заданными направляющими векторами $\overline{q'_i} = (l'_i; m'_i; n'_i)$, $i = \overline{1,4}$:

$$L_i: \frac{x'_i}{l'_i} = \frac{y'_i}{m'_i} = \frac{z'_i}{n'_i}, \quad i = \overline{1,4}$$

и уравнения плоскости земли: $z = -h$ находим координаты i -й точки в плоскости Земли

$$\begin{cases} x'_i = -h \frac{l'_i}{n'_i}, \\ y'_i = -h \frac{m'_i}{n'_i}. \end{cases} \quad (9)$$

Выполним расчеты параметров зоны обзора в плоскости Земли с учетом только угловых ошибок навигаци-

онной системы.

Рассмотрим случай наиболее неблагоприятного сочетания угловых ошибок, а именно примем в формулах (7) значения всех весовых коэффициентов, равными 1: $\mu_1 = \mu_2 = \nu_1 = \nu_2 = \lambda_1 = \lambda_2 = 1$.

1. Находим орты векторов $\overline{OA_1}, \overline{OB_1}, \overline{OB_2}, \overline{OA_2}$. Они записаны построчно в указанном порядке в матрице Q

$$Q = \begin{pmatrix} 0,6275 & 0,5265 & -0,5736 \\ 0,7631 & 0,6403 & -0,0872 \\ 0,1730 & 0,9811 & -0,0872 \\ 0,1422 & 0,8067 & -0,5736 \end{pmatrix}.$$

2. Находим скорректированные с учетом угловых ошибок по формуле (8) орты векторов $\overline{OA'_1}, \overline{OB'_1}, \overline{OB'_2}, \overline{OA'_2}$. Результаты такого преобразования представлены в матрице Q'

$$Q' = \begin{pmatrix} 0,6277 & 0,5333 & -0,5671 \\ 0,7600 & 0,6451 & -0,0793 \\ 0,1680 & 0,9825 & -0,0807 \\ 0,1409 & 0,8107 & -0,5683 \end{pmatrix}.$$

3. Находим координаты угловых точек A'_1, B'_1, B'_2, A'_2 зоны обзора, найденной с учетом угловых ошибок (рис. 5):

$$\begin{aligned} A'_1(1107,0; 940,3), \quad B'_1(9582,0; 8133,1), \\ B'_2(2081,0; 12173,0), \quad A'_2(248,0; 1426,5) \end{aligned}$$

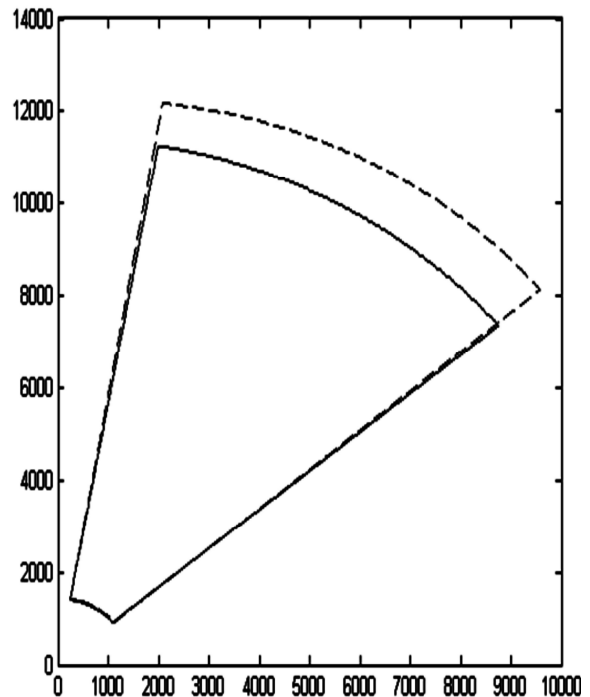


Рис. 5. Зоны обзора в плоскости Земли: сплошная линия - без учета ошибок; пунктирная линия - с учетом угловых ошибок:

$$\tilde{\Delta}\psi = \tilde{\Delta}\theta = \tilde{\Delta}\gamma = 0,32^\circ.$$

Для сравнения приведем повторно координаты угловых точек A_1, B_1, B_2, A_2 , найденные в пункте 1 без учета

ошибок и расстояния между соответствующими точками $A_1(1094, 0; 918, 0)$, $B_1(8756, 0; 7347, 1)$, $B_2(1984, 8; 11256, 0)$, $A_2(248, 0; 1406, 5)$

$\rho(A_1, A'_1) = 25,8 \text{ м}$; $\rho(A_2, A'_2) = 20,0 \text{ м}$;
 $\rho(B_1, B'_1) = 1140,2 \text{ м}$; $\rho(B_2, B'_2) = 922,0 \text{ м}$.

б) С учетом стробирования по дальности. Зона обзора в плоскости Земли, полученная в пункте 2 а с учетом угловых ошибок навигационной системы (изображена пунктирной линией на рис. 5) в режиме стробирования по дальности будет существенно скорректирована. Режим стробирования означает, что наклонная и соответственно горизонтальная дальности РЛИ будут ограничены величинами R_{\max} и d_{\max} соответственно. В общем виде схема получения скорректированной зоны обзора в плоскости Земли в режиме стробирования по дальности такова.

1. Находятся точки пересечения прямых OB'_1 , OB'_2 с поверхностью сферы

$$S_{\max} : x^2 + y^2 + z^2 = R_{\max}^2,$$

а прямых OA'_1 , OA'_2 с поверхностью сферы

$$S_{\min} : x^2 + y^2 + z^2 = R_{\min}^2.$$

2. Полученные точки «проецируются» на плоскость Земли: $z = -h$ по дуге окружности, получающейся в результате пересечения поверхности сферы S_{\max} или S_{\min} с плоскостью, перпендикулярной плоскости Земли и содержащей соответствующую прямую (OB'_1 или OB'_2 для S_{\max} и OA'_1 или OA'_2 для S_{\min}).

Искомый результат можно получить и по другой схеме: сначала найти точки A'_1, B'_1, B'_2, A'_2 пересечения прямых $OA'_1, OB'_1, OB'_2, OA'_2$ с плоскостью Земли, а затем – точки $A''_1, B''_1, B''_2, A''_2$ пересечения ортогональных проекций этих прямых в плоскости Земли с окружностями $x^2 + y^2 = R_{\max}^2 - h^2$ и $x^2 + y^2 = R_{\min}^2 - h^2$.

Получим формулы для нахождения координат точек $A''_1, B''_1, B''_2, A''_2$ согласно описанной схеме. Решив последовательно четыре системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{x'_i}{l'_i} = \frac{y'_i}{m'_i} = \frac{z'_i}{n'_i}, & i = 1, 4, \\ z'_i = -h \end{cases}$$

в составе которых первое уравнение является уравнением одной из прямых $OA'_1, OB'_1, OB'_2, OA'_2$, а второе уравнение – уравнением плоскости земли, найдем координаты точек A'_1, B'_1, B'_2, A'_2 (формула (9)):

$$\begin{cases} x'_i = -h \frac{l'_i}{n'_i}, \\ y'_i = -h \frac{m'_i}{n'_i}. \end{cases}$$

Выразим из этих формул y'_i через x'_i :

$$y'_i = \frac{m'_i}{l'_i} x'_i \quad (10)$$

В результате пересечения поверхностей сфер S_{\max} и

S_{\min} с плоскостью Земли получают окружности $x^2 + y^2 = R_{\max}^2 - h^2$ и $x^2 + y^2 = R_{\min}^2 - h^2$ соответственно. Заменяя в этих уравнениях y правой частью выражения (10), после несложных преобразований, получим формулы для нахождения абсцисс точек B''_1, B''_2 в плоскости Земли

$$x''_i = \frac{l'_i}{\sqrt{(l'_i)^2 + (m'_i)^2}} \sqrt{R_{\max}^2 - h^2} \quad (11)$$

и

$$x''_i = \frac{l'_i}{\sqrt{(l'_i)^2 + (m'_i)^2}} \sqrt{R_{\min}^2 - h^2} \quad (12)$$

– абсцисс точек A''_1, A''_2 . Ординаты точек найдем по формулам (10).

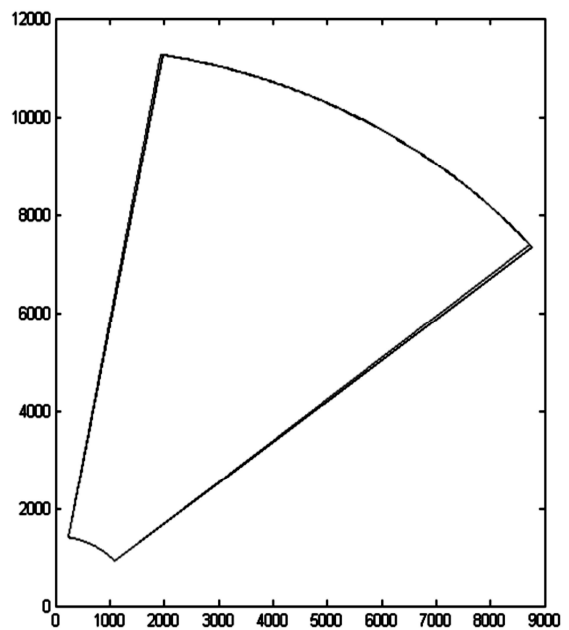


Рис. 6. Зоны обзора в плоскости Земли (рис. 5) в режиме стробирования по дальности

На рис. 6 приведены зоны обзора в плоскости Земли без учета угловых ошибок (черным цветом) и с учетом угловых ошибок, но в режиме стробирования по дальности (серым цветом).

Сравним координаты угловых точек зоны обзора без учета ошибок

$$A_1(1094, 0; 918, 0), \quad B_1(8756, 0; 7347, 1), \\ B_2(1984, 8; 11256, 0), \quad A_2(248, 0; 1406, 5)$$

и отвечающих им угловых точек зоны обзора, найденных в режиме стробирования по дальности с учетом угловых ошибок $\tilde{\Delta}\psi = \tilde{\Delta}\theta = \tilde{\Delta}\gamma = 0,32^\circ$:

$$A''_1(1188, 4; 924, 6), \quad B''_1(8714, 2; 7396, 5), \\ B''_2(1926, 0; 11267, 0), \quad A''_2(244, 5; 1407, 1)$$

Найденные ранее расстояния между соответствующими угловыми точками зон обзора без учета ошибок и с учетом угловых ошибок в режиме стробирования по дальности значительно меньше:

$$\rho(A_1, A_1'') = 8,7 \text{ м}; \quad \rho(A_2, A_2'') = 3,6 \text{ м};$$

$$\rho(B_1, B_1'') = 64,8 \text{ м}; \quad \rho(B_2, B_2'') = 59,8 \text{ м}.$$

Таким образом, влияние угловых ошибок в режиме стробирования по дальности существенно уменьшается.

3. Модель РЛИ с учетом всех видов ошибок навигационной системы.

Дополним множество ошибок навигационной системы ошибками в определении координат ЛА в пространстве, а именно – ошибками Δx , Δy определения координат ЛА по осям Ox и Oy соответственно и ошибкой Δh определения высоты ЛА. В этом случае ЛА будет находиться уже не в начале – точке O – подвижной системы координат $Oxyz$, а в точке O' с координатами $O'(\Delta x; \Delta y; \Delta h)$. Процесс формирования зоны обзора в плоскости Земли в режиме стробирования по дальности в данной ситуации в целом совпадает с процессом, описанным в пункте 2 б). Определенным образом изменяются лишь уравнения прямых $O'A_1'$, $O'B_1'$, $O'B_2'$, $O'A_2'$ и сфер S_{\max} и S_{\min} :

$$L_i: \frac{x_i' - \Delta x}{l_i'} = \frac{y_i' - \Delta y}{m_i'} = \frac{z_i' - \Delta h}{n_i'}, \quad i = \overline{1,4}$$

измененные уравнения прямых $O'A_1'$, $O'B_1'$, $O'B_2'$, $O'A_2'$; $O'A_2''$;

$$S_{\max}: (x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2 + (z - \Delta z)^2 = R_{\max}^2$$

$$S_{\min}: (x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2 + (z - \Delta z)^2 = R_{\min}^2$$

уравнения сфер переднего и заднего фронтов РЛИ.

Повторив вывод формул (11), (12) координат угловых точек зоны обзора в плоскости Земли в режиме стробирования по дальности, получим аналоги этих формул при наличии ошибок навигационной системы в определении координат ЛА в пространстве $x_i'' = \Delta x + \frac{l_i'}{\sqrt{(l_i')^2 + (m_i')^2}} \times$

$$\times \sqrt{R_{\max}^2 - (h + \Delta h)^2}, \quad - \text{ абсциссы точек } B_1'', B_2'',$$

$$x_i'' = \Delta x + \frac{l_i'}{\sqrt{(l_i')^2 + (m_i')^2}} \sqrt{R_{\min}^2 - (h + \Delta h)^2}, \quad - \text{ абсциссы}$$

точек A_1'', A_2'' . Ординаты точек найдем по формулам

$$y_i' = \Delta y + \frac{m_i'}{l_i'}(x_i' - \Delta x), \quad i = \overline{1,4}.$$

На рис. 7 приведены зоны обзора в плоскости Земли без учета ошибок (черным цветом) и с учетом всех видов ошибок в режиме стробирования по дальности (серым цветом).

По аналогии с предыдущим пунктом сравним координаты угловых точек зоны обзора без учета ошибок

$$A_1(1094,0; 918,0), \quad B_1(8756,0; 7347,1),$$

$$B_2(1984,8; 11256,0), \quad A_2(248,0; 1406,5)$$

и отвечающих им угловых точек зоны обзора,

$$A_1''(1127,6; 965,4), \quad B_1''(8765,5; 7447,6),$$

$$B_2''(1976,3; 11318,0), \quad A_2''(292,1; 1443,1),$$

найденных в режиме стробирования по дальности с учетом всех типов ошибок, а именно: $\tilde{\Delta}\psi = \tilde{\Delta}\theta = \tilde{\Delta}\gamma = 0,32^\circ$, $\Delta x = \Delta y = 50 \text{ м}$, $\Delta h = 20 \text{ м}$.

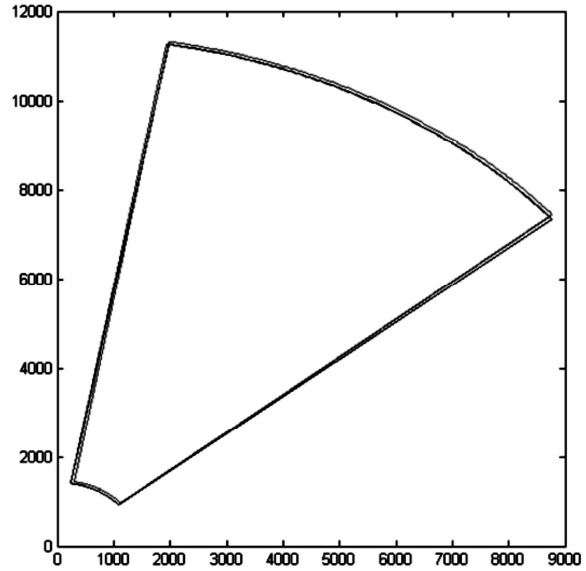


Рис. 7. Зоны обзора в плоскости Земли в режиме стробирования по дальности в условиях ошибок: $\tilde{\Delta}\psi = \tilde{\Delta}\theta = \tilde{\Delta}\gamma = 0,32^\circ$, $\Delta x = \Delta y = 50 \text{ м}$, $\Delta h = 20 \text{ м}$

Расстояния между соответствующими угловыми точками зон обзора без учета ошибок и с учетом ошибок в режиме стробирования по дальности таковы:

$$\rho(A_1, A_1'') = 58,1 \text{ м}; \quad \rho(A_2, A_2'') = 56,7 \text{ м};$$

$$\rho(B_1, B_1'') = 100,1 \text{ м}; \quad \rho(B_2, B_2'') = 56,7 \text{ м}.$$

Изменим теперь знак ошибки по координате x на противоположный ($\Delta x = -50 \text{ м}$), а значения остальных ошибок сохраним неизменными. В этом случае зона обзора в плоскости Земли в режиме стробирования по дальности будет иметь вид (рис. 8).

Координаты угловых точек зоны обзора без учета ошибок останутся неизменными, а координаты угловых точек зоны обзора, найденных в режиме стробирования по дальности с учетом всех типов ошибок ($\tilde{\Delta}\psi = \tilde{\Delta}\theta = \tilde{\Delta}\gamma = 0,32^\circ$, $\Delta x = -50 \text{ м}$, $\Delta y = 50 \text{ м}$, $\Delta h = 20 \text{ м}$) будут такими:

$$A_1''(1027,6; 965,4), \quad B_1''(8665,5; 7447,6),$$

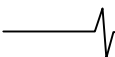
$$B_2''(1876,3; 11318,0), \quad A_2''(192,1; 1443,1)$$

Расстояния между соответствующими угловыми точками зон обзора без учета ошибок и с учетом ошибок в режиме стробирования по дальности в этом случае увеличатся:

$$\rho(A_1, A_1'') = 81,6 \text{ м}; \quad \rho(A_2, A_2'') = 66,8 \text{ м};$$

$$\rho(B_1, B_1'') = 135,2 \text{ м}; \quad \rho(B_2, B_2'') = 125,0 \text{ м}.$$

Изменим еще и знак ошибки по координате y на противоположный ($\Delta y = -50 \text{ м}$). В этом случае



($\tilde{\Delta}\psi = \tilde{\Delta}\theta = \tilde{\Delta}\gamma = 0,32^\circ$, $\Delta x = \Delta y = -50$ м, $\Delta h = 20$ м) координаты угловых точек зоны обзора, найденные в режиме стробирования по дальности будут такими:

$$A_1''(1027,6; 865,4), \quad B_1''(8665,5; 7347,6),$$

$$B_2''(1876,3; 11218,0), \quad A_2''(192,1; 1343,1).$$

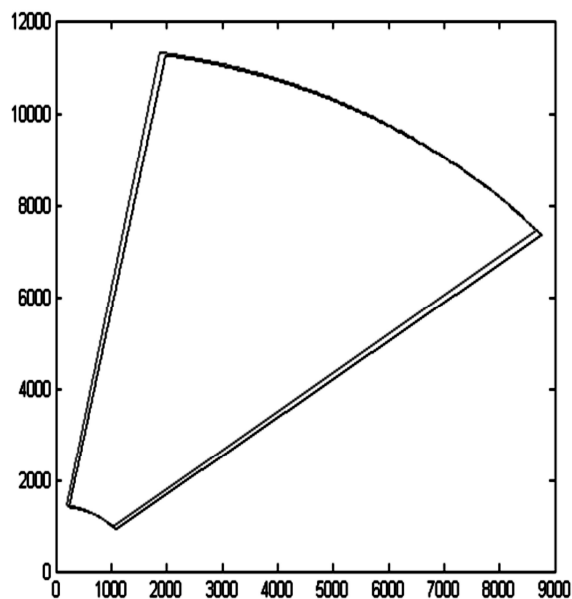


Рис. 8. Зоны обзора в плоскости Земли в режиме стробирования по дальности в условиях ошибок $\tilde{\Delta}\psi = \tilde{\Delta}\theta = \tilde{\Delta}\gamma = 0,32^\circ$, $\Delta x = -50$ м, $\Delta y = 50$ м, $\Delta h = 20$ м

Расстояния между соответствующими угловыми точками зон обзора без учета ошибок и с учетом ошибок в режиме стробирования по дальности изменятся следующим образом:

$$\rho(A_1, A_1'') = 120,0 \text{ м}; \quad \rho(A_2, A_2'') = 66,9 \text{ м};$$

$$\rho(B_1, B_1'') = 90,5 \text{ м}; \quad \rho(B_2, B_2'') = 115,0 \text{ м}.$$

Заключение

При неблагоприятном сочетании ошибок навигационных параметров по положению ЛА в пространстве – ошибки $\Delta x, \Delta y, \Delta h$ – и по ориентации ЛА в пространстве – ошибки $\Delta\psi, \Delta\theta, \Delta\gamma$ – искажения зоны обзора РЛИ в плоскости Земли, измеренные в отклонениях угловых точек относительно неискаженного изображения, могут достигать 100 – 135 м при заданных параметрах носителя РЛС и навигационной системы. Это соответствует приблизительно 1 % от максимальной горизонтальной дальности (расстояние до переднего фронта зоны обзора) и около 7 % от минимальной горизонтальной дальности (расстояние до заднего фронта зоны обзора).

Наибольшие искажения зоны обзора в плоскости Земли, как в области переднего фронта, так и заднего фронта обусловлены ошибками $\Delta x, \Delta y, \Delta h$ в определении координат ЛА в пространстве. Угловые ошибки $\Delta\psi, \Delta\theta, \Delta\gamma$ в наибольшей степени влияют на точки изображения в области переднего фронта.

Предложенная модель, разумеется, относится к простейшим (не учитывающим законы распределения ошибок и их изменения при сочетании ошибок), но в то же время является достаточной для оценки зоны неопределенности радиотражений от подстилающей поверхности для РЛС, работающей в режиме реального луча, и может использоваться в задачах, связанных с автоматическим совмещением радиолокационных изображений с картографической информацией

Литература

1. Аксенов О.Ю. Совмещение изображений // Цифровая обработка сигналов, 2005, №3.
2. R.G. White Change detection in SAR imagery // International Journal of Remote Sensing. vol.12, Issue 2, Feb. 1991.
3. Руководство Р-315 «По минимальным стандартам характеристик авиационных систем (MASPS) для систем улучшенного видения, систем искусственного видения, комбинированных систем искусственного видения и бортовых систем увеличения дальности видения» Авиационного Регистра Межгосударственного Авиационного Комитета (АР МАК), 2008. 86 с.
4. Герман Е.В., Муратов Е.Р., Новиков А.И. Математическая модель формирования зоны неопределенности в задаче совмещения изображений // Вестник РТРТУ №4 (выпуск 46, часть 2), 2013 г. – с. 11-16.

EVALUATION OF UNCERTAINTY OF RADIO REFLECTIONS IN COMBINING IMAGES WITH DIGITAL TERRAIN MAPS

Novikov A.I., Ukin S.A.

A mathematical model of the zone of uncertainty in the underlying surface, corresponding to onboard radar station field of view operating in the forward hemisphere, is proposed. The research results of the model for different sensor error of navigation parameters are presented. It is shown that for the problems of combining cartographic information with formed by the radar image it is necessary to expand the search area, taking into account areas of uncertainty depending on the angle of view, resulting in an asymmetric distortion (extensions of presumed field of view) relative to the center of scanning sector.