

УДК 629.7

Расчет погрешностей определения координат точек тепловизионных изображений, получаемых при дистанционном обследовании технического состояния воздушных линий электропередачи

Г.К. Макаренко*, **А.М. Алешечкин**
*Сибирский федеральный университет,
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

Received 16.07.2013, received in revised form 27.08.2013, accepted 08.12.2013

В представленной статье разработан и исследован на основе численного моделирования метод расчета погрешностей определения координат точек тепловизионных изображений. Данные изображения могут быть использованы при дистанционном исследовании технического состояния ряда объектов электрических сетей, в первую очередь воздушных линий электропередачи. Детально описан разработанный аналитический метод оценки погрешностей определения координат заданных точек тепловизионных изображений. Основными источниками погрешностей определения координат точек тепловизионных снимков являются погрешности определения координат и угловой ориентации объектов – носителей диагностической аппаратуры. Разработанный метод позволяет на основе заданных числовых характеристик погрешностей измерения первичных параметров рассчитать значения среднеквадратических погрешностей определения координат заданных точек тепловизионных изображений. Проведено сравнение погрешностей, полученных аналитическим методом, с результатами оценок погрешностей, полученных методом статистического моделирования, подтвердившее правильность полученных расчетных соотношений.

Ключевые слова: радионавигация, погрешности, местоопределение, электроэнергетика, линии электропередачи, аэрофотосъемка.

Введение

В России общая протяженность магистральных воздушных линий (ВЛ) электропередачи составляет более 120 тыс. км [1]. На протяжении всего срока службы ВЛ подвергаются негативным воздействиям окружающей среды, приводящим к их износу и появлению риска повреждений. Поэтому в процессе эксплуатации ВЛ требуется диагностировать и своевременно устранять возникающие в них повреждения, что сопряжено с необходимостью точного определения координат мест таких повреждений.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: MakarenkoGK@gmail.com

В настоящее время диагностика состояния ВЛ осуществляется традиционной системой профилактического обслуживания, основанной на очередных и внеочередных обходах и визуальных осмотрах. Облеты на вертолетах типа Ми-2 или Ми-8 в значительной мере облегчают осмотр труднодоступных участков ВЛ, но они проводятся вручную, требуют значительных затрат, а также наличия авиационной инфраструктуры. Как правило, облеты ВЛ проводит бригада обслуживающего персонала. Каждый член бригады проводит осмотр «своих» элементов ВЛ при помощи бинокля с высоты бреющего полета (100–150 м от поверхности земли) и старается успевать заполнять дефектную ведомость. Выполнить это весьма непросто, поскольку крейсерская скорость полета вертолета составляет 100–120 км/ч.

Таким образом, недостатками традиционной системы профилактического обслуживания являются низкая оперативность, низкая точность координат мест выявленных аварийных и предаварийных состояний энергетических объектов, большая трудоемкость, повышенная опасность проведения работ.

Выполнять задачу диагностики состояния и определения места повреждения линий электропередач и других объектов электроэнергетики способны средства тепловизионного обследования [2] (рис. 1), позволяющие без вывода оборудования из работы выявлять дефекты на ранней стадии их развития и проводить соответствующие предупредительные ремонты. Это минимизирует возможность преждевременного выхода оборудования из строя, а также снижает вероятность аварийных отказов [3].

Вследствие труднодоступности и большой протяженности линий электропередач тепловизионные наблюдения целесообразно выполнять с воздуха, т.е. наблюдения должны выполняться с борта вертолетов и других пилотируемых летательных аппаратов (ЛА). Это позволит повысить производительность диагностических работ. Однако в силу высокой стоимости аренды и эксплуатации пилотируемых ЛА стоимость таких работ весьма высока.

Снизить стоимость проведения диагностики ВЛ можно на основе использования ЛА беспилотной авиации, как правило, не требующих развертывания авиационной инфраструктуры и позволяющих повысить безопасность такого рода работ. Авторами статьи в работах

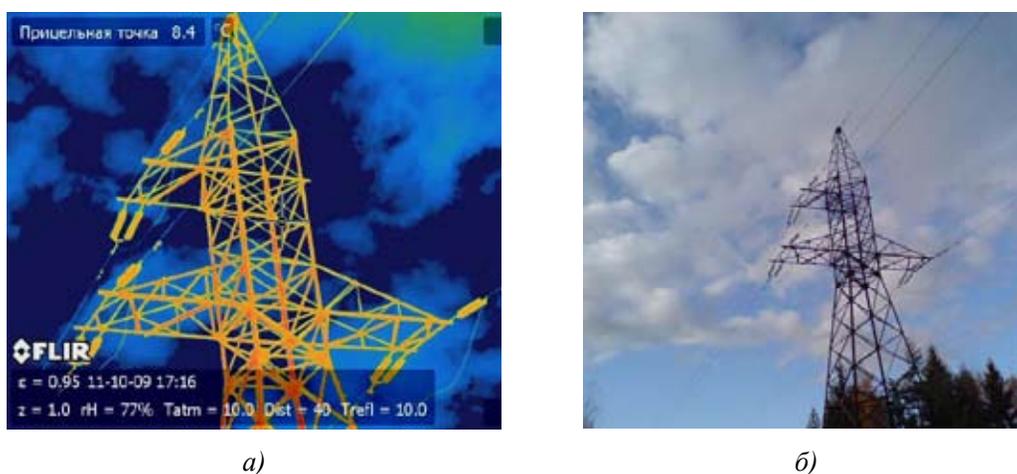


Рис. 1. Снимки опоры ВЛ: а) тепловизионный; б) фотографический

[4, 5] предложен комплекс диагностики ВЛ, объединяющий в себе беспилотные ЛА, аппаратуру спутниковых радионавигационных систем (СРНС) и средства получения фото- и тепловизионных изображений. Данный комплекс позволит решать задачи диагностики ВЛ в автоматическом режиме согласно сформированному полетному заданию. Далее полученные фото- и тепловизионные изображения обрабатываются с целью обеспечения их координатной привязки. Разработанный авторами алгоритм определения координат заданных точек тепловизионных и фотоизображений также приведен в источниках [4, 5].

Цель – оценка погрешностей координатной привязки изображений, получаемых при помощи диагностического комплекса, предложенного в [4, 5].

В настоящей статье решаются следующие задачи:

- разрабатывается алгоритм расчета значений погрешностей координатной привязки полученных фото- и тепловизионных изображений на основе аналитических соотношений, позволяющий определять погрешности координатной привязки заданных точек тепловизионных изображений без необходимости проведения затратного по времени статистического моделирования;
- производится расчет значений погрешностей по предложенному алгоритму;
- производится сравнение полученных аналитических значений погрешностей с оценками погрешностей, полученных методом статистического моделирования.

Алгоритм расчета значений погрешностей координатной привязки фото- и тепловизионных изображений

Как было указано, определение координат заданных точек аэрофотоснимков по известным значениям углов обзора камеры, координат и угловой ориентации ЛА, а также высоты его полета над поверхностью земли осуществляется в соответствии с алгоритмами, приведенными в статьях [4, 5]. Блок-схема алгоритма определения координат центра и углов снимков приведена на рис. 2.

В результате использования данного алгоритма потребитель получает значения абсолютных координат заданных точек снимков в системе широта, долгота, высота, что позволяет в дальнейшем наносить обнаруженные точки повреждений на карту без каких-либо дополнительных вычислений.

Как и для режима определения координат, для реализации расчета погрешностей требуется знание исходных значений координат и угловой ориентации беспилотного ЛА, на борту которого установлена камера тепловизора: широту – lat ; долготу – lon ; высоту – h ; азимут – az ; угол места – um ; крен – kr , а также углы обзора камеры тепловизора – ax ; ay и высоту полета ЛА над землей – dh , определяемую при помощи барометрического или радиовысотомера.

Кроме исходных данных, требуемых для решения задачи определения координат, необходимо значение погрешностей измерения этих исходных данных, в частности:

– σ_{dh} – среднеквадратическое отклонение (СКО) погрешности определения высоты ЛА над землей при помощи высотомера;

– σ_{lat} ; σ_{lon} – СКО погрешности определения географических координат ЛА при помощи приемника сигналов спутниковой радионавигационной системы (СРНС);

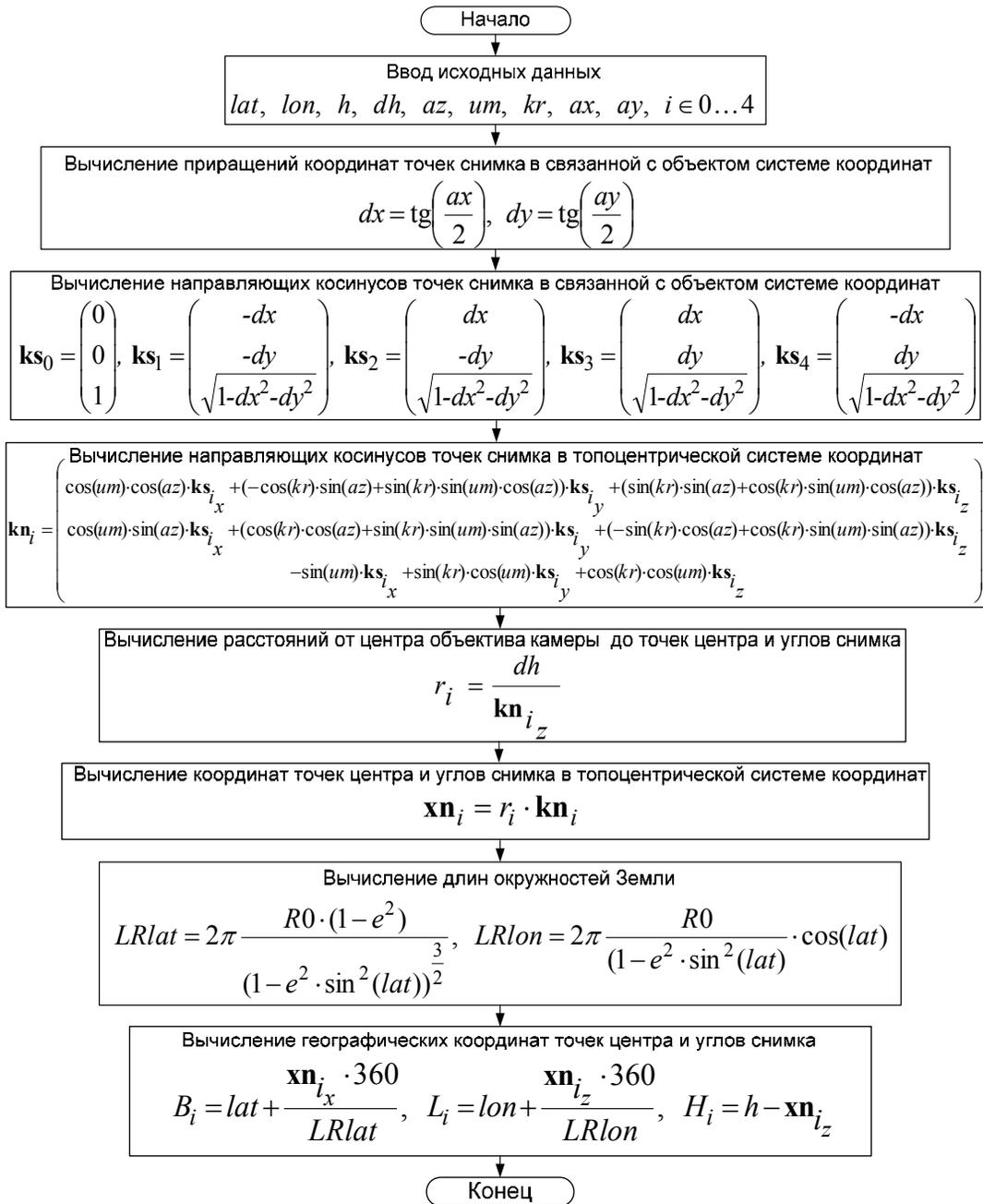


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения координат точек снимка

– σ_h – СКО погрешности определения высоты ЛА при помощи аппаратуры потребителей СРНС;

– σ_{az} , σ_{um} , σ_{kr} – среднеквадратические погрешности определения азимута, угла места и крена ЛА.

При расчете погрешностей определения координат снимком будем считать, что погрешности задания начальных значений азимута, угла места и крена ЛА являются некоррелирован-

ными между собой. В этом случае корреляционная матрица погрешностей задания априорной ориентации ЛА определяется в виде

$$\mathbf{P}_\Psi = \begin{bmatrix} \sigma_{az}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{um}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{kr}^2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Для решения задачи расчета погрешностей необходимо выделить основные этапы в алгоритме расчета координат заданных точек тепловизионных изображений, приведенном на рис. 2. В качестве заданных точек тепловизионных изображений принимают центр, левый нижний, левый верхний, правый верхний и правый нижний углы тепловизионного изображения [4, 5]. Данным точкам приписывают индексы $i=0, 1, 2, 3$ и 4 соответственно.

Согласно приведенному на рис. 2 алгоритму координатной привязки тепловизионных и оптических изображений [4, 5], получаемых с борта ЛА, на основе заданных значений направляющих косинусов на точки изображения в связанной с объектом (ЛА) системе координат осуществляется пересчет значений погрешностей параметров пространственной ориентации ЛА в погрешности направляющих косинусов пяти векторов от центра объектива камеры тепловизора до точек 0, 1, 2, 3, 4 в топоцентрической системе координат (ТЦСК). Значения направляющих косинусов в ТЦСК функционально связаны со значениями направляющих косинусов в связанной с ЛА системе координат (СК) и являются результатами косвенных измерений [6]. Прямыми измерениями являются углы пространственной ориентации ЛА.

Уравнения для расчета направляющих косинусов вектора от центра объектива камеры тепловизора до i -й точки тепловизионного изображения в ТЦСК ($\mathbf{kn}_{i_x}, \mathbf{kn}_{i_y}, \mathbf{kn}_{i_z}$) имеют вид [5]

$$\begin{aligned} \mathbf{kn}_{i_x} &= \cos(um) \cdot \cos(az) \cdot \mathbf{ks}_{i_x} + (-\cos(kr) \cdot \sin(az) + \sin(kr) \cdot \sin(um) \cdot \cos(az)) \cdot \mathbf{ks}_{i_y} + \\ &+ (\sin(kr) \cdot \sin(az) + \cos(kr) \cdot \sin(um) \cdot \cos(az)) \cdot \mathbf{ks}_{i_z}, \\ \mathbf{kn}_{i_y} &= \cos(um) \cdot \sin(az) \cdot \mathbf{ks}_{i_x} + (\cos(kr) \cdot \cos(az) + \sin(kr) \cdot \sin(um) \cdot \sin(az)) \cdot \mathbf{ks}_{i_y} + \\ &+ (-\sin(kr) \cdot \cos(az) + \cos(kr) \cdot \sin(um) \cdot \sin(az)) \cdot \mathbf{ks}_{i_z}, \\ \mathbf{kn}_{i_z} &= -\sin(um) \cdot \mathbf{ks}_{i_x} + \sin(kr) \cdot \cos(um) \cdot \mathbf{ks}_{i_y} + \cos(kr) \cdot \cos(um) \cdot \mathbf{ks}_{i_z}. \end{aligned} \quad (2)$$

При наличии погрешностей определения азимута, угла места и крена ЛА $\Delta az, \Delta um, \Delta kr$, которые полагаются малыми по сравнению с действительными значениями азимута, угла места и крена az, um, kr , уравнения (2) запишутся в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{kn}_{i_x} + \Delta \mathbf{kn}_{i_x} &= \cos(um + \Delta um) \cdot \cos(az + \Delta az) \cdot (\mathbf{ks}_{i_x} + \Delta \mathbf{ks}_{i_x}) + \\ &+ (-\cos(kr + \Delta kr) \cdot \sin(az + \Delta az) + \sin(kr + \Delta kr) \cdot \sin(um + \Delta um) \cdot \cos(az + \Delta az)) \cdot (\mathbf{ks}_{i_y} + \Delta \mathbf{ks}_{i_y}) + \\ &+ (\sin(kr + \Delta kr) \cdot \sin(az + \Delta az) + \cos(kr + \Delta kr) \cdot \sin(um + \Delta um) \cdot \cos(az + \Delta az)) \cdot (\mathbf{ks}_{i_z} + \Delta \mathbf{ks}_{i_z}) \\ \mathbf{kn}_{i_y} + \Delta \mathbf{kn}_{i_y} &= \cos(um + \Delta um) \cdot \sin(az + \Delta az) \cdot (\mathbf{ks}_{i_x} + \Delta \mathbf{ks}_{i_x}) + \\ &+ (\cos(kr + \Delta kr) \cdot \cos(az + \Delta az) + \sin(kr + \Delta kr) \cdot \sin(um + \Delta um) \cdot \sin(az + \Delta az)) \cdot (\mathbf{ks}_{i_y} + \Delta \mathbf{ks}_{i_y}) + \\ &+ (-\sin(kr + \Delta kr) \cdot \cos(az + \Delta az) + \cos(kr + \Delta kr) \cdot \sin(um + \Delta um) \cdot \sin(az + \Delta az)) \cdot (\mathbf{ks}_{i_z} + \Delta \mathbf{ks}_{i_z}) \\ \mathbf{kn}_{i_z} + \Delta \mathbf{kn}_{i_z} &= -\sin(um + \Delta um) \cdot (\mathbf{ks}_{i_x} + \Delta \mathbf{ks}_{i_x}) + \sin(kr + \Delta kr) \cdot \cos(um + \Delta um) \cdot (\mathbf{ks}_{i_y} + \Delta \mathbf{ks}_{i_y}) + \\ &+ \cos(kr + \Delta kr) \cdot \cos(um + \Delta um) \cdot (\mathbf{ks}_{i_z} + \Delta \mathbf{ks}_{i_z}). \end{aligned} \quad (3)$$

Выражения (3) раскладываются в ряд Тейлора. Вследствие малости погрешностей в сравнении с действительными значениям азимута, угла места и крена в данном ряде могут быть удержаны только линейные члены разложения, компоненты разложения более высоких порядков могут быть отброшены.

Перейдя в выражении (3) к рассмотрению погрешностей измерений, получают выражение для погрешностей определения направляющих косинусов на i -ю точку изображения, которое удобно записать в матричном виде

$$\begin{bmatrix} \Delta kn_{i,x} \\ \Delta kn_{i,y} \\ \Delta kn_{i,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial kn_{i,x}}{\partial az} & \frac{\partial kn_{i,x}}{\partial um} & \frac{\partial kn_{i,x}}{\partial kr} \\ \frac{\partial kn_{i,y}}{\partial az} & \frac{\partial kn_{i,y}}{\partial um} & \frac{\partial kn_{i,y}}{\partial kr} \\ \frac{\partial kn_{i,z}}{\partial az} & \frac{\partial kn_{i,z}}{\partial um} & \frac{\partial kn_{i,z}}{\partial kr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta az \\ \Delta um \\ \Delta kr \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Корреляционная матрица погрешностей оценки направляющих косинусов вектора i -й точки снимка в ТЦСК определяется согласно выражению

$$\mathbf{Pkn}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial kn_{i,x}}{\partial az} & \frac{\partial kn_{i,x}}{\partial um} & \frac{\partial kn_{i,x}}{\partial kr} \\ \frac{\partial kn_{i,y}}{\partial az} & \frac{\partial kn_{i,y}}{\partial um} & \frac{\partial kn_{i,y}}{\partial kr} \\ \frac{\partial kn_{i,z}}{\partial az} & \frac{\partial kn_{i,z}}{\partial um} & \frac{\partial kn_{i,z}}{\partial kr} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{P}_\Psi \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial kn_{i,x}}{\partial az} & \frac{\partial kn_{i,x}}{\partial um} & \frac{\partial kn_{i,x}}{\partial kr} \\ \frac{\partial kn_{i,y}}{\partial az} & \frac{\partial kn_{i,y}}{\partial um} & \frac{\partial kn_{i,y}}{\partial kr} \\ \frac{\partial kn_{i,z}}{\partial az} & \frac{\partial kn_{i,z}}{\partial um} & \frac{\partial kn_{i,z}}{\partial kr} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \sigma_{kn_{i,x}}^2 & \sigma_{kn_{i,xy}} & \sigma_{kn_{i,xz}} \\ \sigma_{kn_{i,xy}} & \sigma_{kn_{i,y}}^2 & \sigma_{kn_{i,yz}} \\ \sigma_{kn_{i,xz}} & \sigma_{kn_{i,yz}} & \sigma_{kn_{i,z}}^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где \mathbf{Pkn}_i (3×3) – корреляционная матрица погрешностей определения направляющих косинусов вектора i -й точки снимка в ТЦСК. На главной диагонали матрицы \mathbf{Pkn}_i находятся дисперсии оценок направляющих косинусов векторов точек снимка в ТЦСК, а вне ее – корреляционные моменты связи погрешностей; \mathbf{P}_Ψ – корреляционная матрица погрешностей определения угловой ориентации, заданная в соответствии с (1).

Согласно приведенному на рис. 2 алгоритму расчета координат заданных точек изображений по полученным значениям направляющих косинусов в ТЦСК на основе известной высоты полета ЛА над землей определяется расстояние от центра объектива камеры тепловизора до точек тепловизионного изображения в соответствии с формулой

$$r_i = \frac{dh}{kn_{i,z}}, \quad (6)$$

где $i = 0, 1, 2, 3, 4$ – номера заданной точки тепловизионного изображения.

Погрешности измерения высоты полета ЛА над землей dh и определения направляющих косинусов векторов точек снимка в ТЦСК полагаются также некоррелированными, поскольку измерения угловой ориентации и высоты полета выполняются разными устройствами (аппаратура потребителей СРНС и высотомер). Исходя из этого корреляционная матрица погреш-

ностей задания высоты и z -составляющей направляющих косинусов вектора i -й точки снимка в ТЦСК определяется в виде

$$\mathbf{P}_{dh_kn_i} = \begin{bmatrix} \sigma_{dh}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{kn_{i_z}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

При наличии погрешностей измерения Δdh , Δkn_{i_z} выражение (6) принимает вид

$$r_i + \Delta r_i = \frac{dh + \Delta dh}{\mathbf{kn}_{i_z} + \Delta kn_{i_z}}. \quad (8)$$

Для упрощения анализа выражение (8) также раскладывается в ряд Тейлора. В силу малости погрешностей по сравнению с действительными значениями величин в рассмотрении остаются только линейные члены разложения. Погрешности измерений расстояния от i -й точки снимка до центра объектива камеры тепловизора определяются как

$$\Delta r_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_i}{\partial dh} & \frac{\partial r_i}{\partial \mathbf{kn}_{i_z}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta dh \\ \Delta kn_{i_z} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Далее вычисляются значения частных производных корреляционной матрицы задания высоты ЛА и z -составляющей направляющих косинусов вектора i -й точки снимка в ТЦСК $\Delta \mathbf{R}_i$:

$$\Delta \mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{dh}{2} \\ \mathbf{kn}_{i_z} & \mathbf{kn}_{i_z} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Вычисляется дисперсия определения расстояния от i -й точки снимка до центра объектива камеры тепловизора путем на основе выражения

$$\sigma_{r_i}^2 = \Delta \mathbf{R}_i \cdot \mathbf{P}_{dh_kn_i} \cdot \Delta \mathbf{R}_i^T. \quad (11)$$

На следующем этапе алгоритма расчета координат тепловизионных изображений (рис. 2) осуществляют определение координат заданной точки в ТЦСК, что выполняется в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} \mathbf{xn}_{i_x} &= r_i \cdot \mathbf{kn}_{i_x} \\ \mathbf{xn}_{i_y} &= r_i \cdot \mathbf{kn}_{i_y} \\ \mathbf{xn}_{i_z} &= r_i \cdot \mathbf{kn}_{i_z} \end{aligned} \quad (12)$$

Можно показать, что погрешности задания значений направляющих косинусов векторов точек снимка в ТЦСК по x , y -составляющим и расстояния от камеры до i -й точки являются некоррелированными.

При наличии погрешностей Δkn_{i_x} , Δkn_{i_y} , Δr выражение (12) для \mathbf{xn}_{i_x} принимает вид

$$\mathbf{xn}_{i_x} + \Delta \mathbf{xn}_{i_x} = (r_i + \Delta r_i) (\mathbf{kn}_{i_x} + \Delta kn_{i_x}). \quad (13)$$

Разложение (13) в ряд Тейлора с удержанием линейных членов дает выражения для погрешностей определения координаты \mathbf{xn}_{i_x} :

$$\Delta x_{ni_x} = \frac{\partial x_{ni_x}}{\partial r_i} \cdot \Delta r_i + \frac{\partial x_{ni_x}}{\partial kn_{i_x}} \cdot \Delta kn_{i_x} . \quad (14)$$

После вычисления частных производных выражение (14) принимает вид

$$\Delta x_{ni_x} = kn_{i_x} \cdot \Delta r_i + r_i \cdot \Delta kn_{i_x} . \quad (15)$$

Усреднением квадратов левой и правой частей выражения (15) можно определить дисперсию погрешностей определения x -составляющей координат i -й точки снимка в ТЦСК:

$$\sigma_{x_{ni_x}}^2 = \mathbf{M} \left[(\Delta x_{ni_x})^2 \right] = kn_{i_x}^2 \cdot \sigma_{r_i}^2 + r_i^2 \cdot \sigma_{kn_{i_x}}^2 , \quad (16)$$

где $\mathbf{M} \left[(\Delta x_{ni_x})^2 \right]$ – означает операцию усреднения (вычисления математического ожидания) величины, заключенной в квадратные скобки.

Аналогичным образом можно определить дисперсию погрешности определения y -составляющей координат i -й точки снимка в ТЦСК x_{ni_y} :

$$\sigma_{x_{ni_y}}^2 = kn_{i_y}^2 \cdot \sigma_{r_i}^2 + r_i^2 \cdot \sigma_{kn_{i_y}}^2 . \quad (17)$$

Для z -составляющей координат i -й точки снимка в ТЦСК x_{ni_z} выражение (16) запишется в виде

$$(\Delta x_{ni_z})^2 = kn_{i_z}^2 \cdot \Delta r_i^2 + r_i^2 \cdot \Delta kn_{i_z}^2 + 2 \cdot kn_{i_z} \cdot r_i \cdot (\Delta r_i \cdot \Delta kn_{i_z}) , \quad (18)$$

где корреляционный момент связи $(\Delta r_i \cdot \Delta kn_{i_z})$ оценивается ранее как (10)

$$\begin{aligned} \mathbf{R} \Delta r_i \cdot \Delta kn_{i_z} &= \mathbf{M} \left[\Delta r_i \cdot \Delta kn_{i_z} \right] = \mathbf{M} \left[\frac{1}{kn_{i_z}} \Delta dh - \frac{dh}{kn_{i_z}^2} \Delta kn_{i_z}^2 \right] = \\ &= -\frac{dh}{kn_{i_z}^2} \mathbf{M} \left[\Delta r_i \cdot \Delta kn_{i_z}^2 \right] = -\frac{dh}{kn_{i_z}^2} \cdot \sigma_{kn_{i_z}}^2 . \end{aligned} \quad (19)$$

Тогда дисперсия погрешностей определения z -составляющей координат i -й точки снимка в ТЦСК x_{ni_z} определяется как

$$\sigma_{x_{ni_z}}^2 = \mathbf{M} \left[\Delta x_{ni_z} \right] = kn_{i_z}^2 \cdot \Delta r_i^2 + r_i^2 \cdot \Delta kn_{i_z}^2 - 2 \cdot r_i \cdot \sigma_{kn_{i_z}}^2 . \quad (20)$$

Таким образом, найдены погрешности определения координат i -й точки снимка в ТЦСК, центром которой является центр камеры тепловизора, размещенного на борту беспилотного ЛА.

Для определения погрешностей широты и долготы i -й точки требуется использование радиусов кривизны земного эллипсоида для заданных координат, в качестве которых могут выступать координаты места ЛА.

Значение радиуса кривизны сечения земного эллипсоида в меридиональной плоскости определяется параметрами эллипсоида и географической широтой места lat . При наличии погрешности определения широты ЛА Δlat значение радиуса кривизны сечения эллипсоида в плоскости меридиана также будет определено с погрешностью $\Delta Rlat$:

$$Rlat + \Delta Rlat = \frac{R0 \cdot (1 - e^2)}{(1 - e^2 \cdot \sin^2(lat + \Delta lat))^{\frac{3}{2}}}, \quad (21)$$

где $R0$ – экваториальный радиус эллипсоида, e – эксцентриситет эллипсоида.

Выражение (21) раскладывается в ряд Тейлора. В силу малости погрешностей удерживаются только линейные члены разложения

$$\Delta Rlat = \frac{\partial Rlat}{\partial lat} \cdot \Delta lat. \quad (22)$$

При этом частная производная выражения (22) имеет значение

$$\frac{\partial Rlat}{\partial lat} = \frac{3 \cdot e^2 \cdot R0 \cdot \cos(lat) \cdot \sin(lat) \cdot (e^2 - 1)}{[1 - e^2 \cdot \sin^2(lat)]^{\frac{5}{2}}}. \quad (23)$$

Исходя из этого определяется дисперсия погрешности определения меридианального радиуса кривизны $\Delta Rlat$:

$$\sigma_{Rlat}^2 = \mathbf{M}[(\Delta Rlat)^2] = \left(\frac{\partial Rlat}{\partial lat}\right)^2 \cdot \sigma_{lat}^2. \quad (24)$$

Рассуждая аналогично (21)-(24), можно найти значение погрешности определения величины радиуса кривизны сечения эллипсоида Земли в нормальной плоскости по формуле

$$\sigma_{Rlon}^2 = \mathbf{M}[(\Delta Rlon)^2] = \left(\frac{\partial Rlon}{\partial lat}\right)^2 \cdot \sigma_{lat}^2. \quad (25)$$

Далее определяется дисперсия погрешностей определения широты координат i -й точки снимка. Для этого задаются малые по сравнению с действительными значениями lat и \mathbf{xn}_{i_x} значения погрешностей Δlat и $\Delta \mathbf{xn}_{i_x}$

$$B_i + \Delta B_i = (lat + \Delta lat) + \frac{(\mathbf{xn}_{i_x} + \Delta \mathbf{xn}_{i_x}) \cdot 360}{2\pi \cdot (Rlat + \Delta Rlat)}. \quad (26)$$

Выражение (26) раскладывается в ряд Тейлора. В силу малости погрешностей рассматриваются только линейные члены разложения

$$\Delta B_i = \frac{\partial B_i}{\partial lat} \cdot \Delta lat + \frac{\partial B_i}{\partial \mathbf{xn}_{i_x}} \cdot \Delta \mathbf{xn}_{i_x} + \frac{\partial B_i}{\partial Rlat} \cdot \Delta Rlat. \quad (27)$$

Вычисляются частные производные выражения (27)

$$\Delta B_i = \Delta lat + \frac{360}{2\pi \cdot Rlat} \cdot \Delta \mathbf{xn}_{i_x} - \frac{360 \cdot \mathbf{xn}_{i_x}}{2\pi \cdot Rlat^2} \cdot \Delta Rlat. \quad (28)$$

Возводятся в квадрат левая и правая части выражения (27):

$$\begin{aligned}
 (\Delta B_i)^2 = & \Delta lat^2 + \left(\frac{360}{2\pi \cdot Rlat}\right)^2 \cdot (\Delta xn_{i_x})^2 + \left(\frac{360 \cdot \mathbf{xn}_{i_x}}{2\pi \cdot Rlat^2}\right)^2 \cdot \Delta Rlat^2 + \\
 & + 2 \cdot \Delta lat \cdot \Delta xn_{i_x} \cdot \frac{360}{2\pi \cdot Rlat} - 2 \cdot \Delta lat \cdot \Delta Rlat \cdot \frac{360 \cdot \mathbf{xn}_{i_x}}{2\pi \cdot Rlat^2} - 2 \cdot \Delta xn_{i_x} \cdot \Delta Rlat \cdot \frac{180^2 \cdot \mathbf{xn}_{i_x}}{\pi^2 \cdot Rlat^3}.
 \end{aligned} \tag{29}$$

Выражение (29) усредняется. Дисперсия погрешности определения широты i -й точки снимка определяется как

$$\begin{aligned}
 \sigma_{B_i}^2 = \mathbf{M}[(\Delta B_i)^2] = & \sigma_{lat}^2 + \left(\frac{360}{2\pi \cdot Rlat}\right)^2 \cdot \sigma_{xn_{i_x}}^2 + \left(\frac{360 \cdot \mathbf{xn}_{i_x}}{2\pi \cdot Rlat^2}\right)^2 \cdot \sigma_{Rlat}^2 - \\
 & - 2 \cdot \frac{360 \cdot \mathbf{xn}_{i_x}}{2\pi \cdot Rlat} \cdot \mathbf{M}[\Delta lat \cdot \Delta Rlat],
 \end{aligned} \tag{30}$$

где $\mathbf{M}[\Delta lat \cdot \Delta Rlat]$ – корреляционный момент связи между двумя случайными величинами, определенный как математическое ожидание произведения центрированных случайных величин:

$$\mathbf{M}[\Delta lat \cdot \Delta Rlat] = \frac{\partial Rlat}{\partial lat} \cdot \sigma_{lat}^2 \tag{31}$$

Таким образом, дисперсия погрешности определения широты координат i -й точки снимка определяется как

$$\begin{aligned}
 \sigma_{B_i}^2 = \mathbf{M}[(\Delta B_i)^2] = & \sigma_{lat}^2 + \left(\frac{360}{2\pi \cdot Rlat}\right)^2 \cdot \sigma_{xn_{i_x}}^2 - \left(\frac{360 \cdot \mathbf{xn}_{i_x}}{2\pi \cdot Rlat^2}\right)^2 \cdot \sigma_{Rlat}^2 - \\
 & - 2 \cdot \frac{360 \cdot \mathbf{xn}_{i_x}}{2\pi \cdot Rlat} \cdot \frac{3 \cdot e^2 \cdot R_0 \cdot \cos(lat) \cdot \sin(lat) \cdot (e^2 - 1)}{[1 - e^2 \cdot \sin^2(lat)]^{3/2}} \cdot \sigma_{lat}^2.
 \end{aligned} \tag{32}$$

Отметим, что четвертое слагаемое выражения (32) вносит незначительный вклад в дисперсию погрешности определения широты координат i -й точки снимка. Поэтому в дальнейших вычислениях им можно пренебречь:

$$\sigma_{B_i}^2 = \mathbf{M}[(\Delta B_i)^2] = \sigma_{lat}^2 + \left(\frac{360}{2\pi \cdot Rlat}\right)^2 \cdot \sigma_{xn_{i_x}}^2 - \left(\frac{360 \cdot \mathbf{xn}_{i_x}}{2\pi \cdot Rlat^2}\right)^2 \cdot \sigma_{Rlat}^2. \tag{33}$$

Аналогичным образом определяются дисперсии погрешностей определения долготы и высоты i -й точки снимка.

Дисперсия погрешности определения долготы i -й точки снимка

$$\sigma_{L_i}^2 = \mathbf{M}[(\Delta L_i)^2] = \sigma_{lon}^2 + \left(\frac{360}{2\pi \cdot Rlon}\right)^2 \cdot \sigma_{xn_{i_y}}^2 - \left(\frac{360 \cdot \mathbf{xn}_{i_y}}{2\pi \cdot Rlon^2}\right)^2 \cdot \sigma_{Rlon}^2. \tag{34}$$

Дисперсия погрешности определения высоты координат i -й точки снимка

$$\sigma_{H_i}^2 = \mathbf{M}[(\Delta H_i)^2] = \sigma_h^2 + \sigma_{xn_i}^2. \quad (35)$$

Таким образом, приведенный алгоритм расчета погрешностей позволяет на основе погрешностей прямых измерений рассчитывать погрешности искомым географических координат заданной точки получаемых с борта ЛА тепловизионных или фотоснимков.

Расчет погрешностей координатной привязки полученных фото- и тепловизионных изображений

Вышеописанный алгоритм расчета погрешностей аналитическим методом был использован для анализа алгоритма определения координат заданной точки изображения [4, 5], моделирующего процесс координатной привязки получаемых тепловизионных изображений.

В частности, был произведен расчет зависимости СКО погрешности σ_r определения пространственных координат одной из точек тепловизионного изображения от угла азимута ЛА в соответствии с выражением

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2}, \quad (36)$$

где $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ – СКО погрешности определения прямоугольных геоцентрических координат точки (данные координаты могут быть однозначно получены из широты, долготы и высоты на основе известных соотношений).

Кроме того, для анализа полученных результатов был произведен расчет погрешностей координатной привязки получаемых изображений методом статистического моделирования, исходя из которого на измеряемые исходные параметры накладывались погрешности в виде случайных величин с заданными значениями среднеквадратических отклонений (СКО) и нулевыми математическими ожиданиями. Затем проводилось заданное число статистических испытаний, в результате которых рассчитывались статистические оценки СКО определяемых параметров.

Расчеты производились при следующих исходных данных:

– координаты и угловая ориентация ЛА, определяемые аппаратурой потребителей СРНС: широта $lat = 56^\circ 0'$ с.ш.; долгота $lon = 92^\circ 0'$ в.д.; высота $h = 400$ м; азимут $az = 0^\circ - 360^\circ$; угол места $um = 0^\circ$; крен $kr = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$;

– углы обзора камеры тепловизора типа ТН7102 NEC [0]: $ax = 29^\circ$; $ay = 22^\circ$;

– высота ЛА над землей $dh = 100$ м, определяемая при помощи барометрического или радиовысотомера.

– $\sigma_{dh} = 10$ м – СКО погрешности определения высоты ЛА над землей при помощи высотомера;

– $\sigma_{lat} = 0,032''$, $\sigma_{lon} = 0,058''$ – СКО погрешности определения географических координат ЛА при помощи приемника спутниковых сигналов (указанные значения σ_{lat} и σ_{lon} соответствуют СКО погрешности $\sigma = 1$ м определения координат ЛА в горизонтальной плоскости);

– $\sigma_h = 10$ м – СКО погрешности определения высоты ЛА при помощи аппаратуры потребителей СРНС;

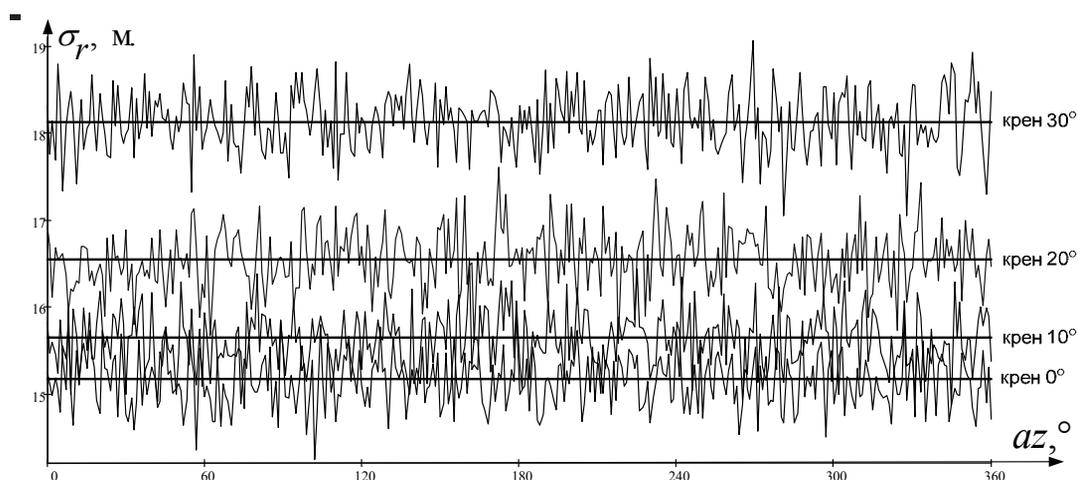


Рис. 3. Зависимость среднеквадратической погрешности определения координат заданной точки от азимута ЛА

– $\sigma_{az} = 10'$, $\sigma_{um} = 20'$, $\sigma_{kr} = 20'$ – среднеквадратические погрешности определения азимута, угла места и крена ЛА;

– $z = 1000$ – число статистических испытаний в каждом заданном значении азимута ЛА.

Зависимость СКО погрешности определения координат точки левого нижнего угла тепловизионного изображения σ_r от азимута ЛА в диапазоне $0-360^\circ$ при четырех значениях крена приведена на рис. 3.

Приведенные на рис. 3 зависимости наглядно демонстрируют соответствие результатов статистического и аналитического методов оценок погрешностей координатной привязки получаемых изображений. Оценки, полученные аналитическим методом, представляют собой математические ожидания оценок, полученных методом статистического моделирования.

Аналогичные результаты получены для остальных точек тепловизионного изображения.

Выводы

Анализ полученных результатов расчета погрешностей координатной привязки изображений, получаемых методами статистического и аналитического моделирования, показывает, что методы имеют расхождение менее 1 %, что позволяет при необходимости оценивать погрешности только аналитическим методом по предложенному алгоритму, избегая затратных по времени вычислений, присущих методу статистического моделирования. Кроме того, дополнительным достоинством аналитического метода является возможность учета корреляции между измеряемыми значениями, для чего требуется только изменение вида корреляционных матриц измеряемых параметров (они перестают быть диагональными), при этом алгоритм расчета погрешностей не изменяется.

Список литературы

- [1] URL: <http://www.fsk-ees.ru/about.html>.
 [2] Сучкова Г.А. // Энергетик. 2008. № 4. С. 20–22.

[3] Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоатомиздат, 1982. 312 с.

[4] Макаренко Г.К., Алешечкин А.М. // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. С. 33–37.

[5] Алешечкин А.М. // Вестник СибГАУ, 2011. № 7. С. 58–62.

[6] Винокуров В.И. Электрорадиоизмерения. М.: Высш. шк., 1986. 351 с.

[7] URL <http://www.analyzers.ru/teplovizori/necth7102/>.

Calculation of Error in Determining the Coordinates of Points Thermal Images Obtained with Remote Technical State Survey Overhead Power Lines

Grigoriy K. Makarenko and Andrey M. Aleshechin
*Siberian Federal University,
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

In the present paper was developed and investigated based on numerical simulation method of calculation errors in determining the coordinates of points of thermal images. These images can be used for remote investigation of the technical condition of some facilities of electric networks, especially overhead power lines. The article describes in detail the analytical method developed by the error estimates of coordinates of points given thermal images. The main sources of errors in determining the coordinates of points of thermal images are errors in determining the coordinates and angular orientation of objects – carriers of diagnostic equipment. The developed method makes it possible based on the specified number of errors of measurement characteristics of the primary parameters to calculate the values of mean square errors in determining the coordinates of the given point thermal images. A comparison of errors obtained by an analytical method with the results of error estimates obtained by the method of statistical modeling, which confirmed the correctness of the calculated ratios.

Keywords: radio navigation, error positioning, power generation, power transmission lines, aerial photography.
