

УДК 004.93:621.31

А. М. Алешечкин, Г. К. Макаренко

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ ПРИ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Описывается разработанный аналитический метод оценки погрешностей определения координат заданных точек тепловизионных изображений, получаемых при дистанционном исследовании технического состояния воздушных линий электропередачи. Рассмотрена совокупность основных погрешностей измерения первичных параметров, и алгоритм расчета ее влияния на среднеквадратические погрешности определения координат заданных точек тепловизионных изображений. Проведено сравнение погрешностей, полученных аналитическим методом, с результатами оценок погрешностей, полученных методом статистического моделирования, подтвердившее правильность расчетных соотношений.

Ключевые слова: воздушные линии электропередач, тепловизоры, навигация, координаты, погрешности.

В России общая протяженность магистральных воздушных линий (ВЛ) электропередачи составляет более 120 тыс. км (URL: <http://www.fsk-ees.ru/about.html>). В настоящее время система профилактического обслуживания ВЛ характеризуется низкими оперативностью и точностью локализации мест предаварийных состояний. Повысить эффективность диагностики ВЛ способны беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оснащенные средствами тепловизионного обследования [1]. Это позволяет выявлять дефекты в режиме работы ВЛ под напряжением [2].

Авторами статьи в работах [3; 4] предложен комплекс диагностики ВЛ, объединяющий в себе БПЛА, аппаратуру спутниковых радионавигационных систем (СРНС), и средства получения фото- и тепловизионных изображений. Данный комплекс способен обеспечить диагностику ВЛ в автоматическом режиме. Далее полученные фото- и тепловизионные изображения обрабатываются с целью обеспечения их координатной привязки.

Целью данной работы является оценка погрешностей координатной привязки изображений, получаемых при помощи диагностического комплекса, предложенного в [3; 4].

В настоящей работе решаются следующие задачи: разрабатывается алгоритм расчета значений погрешностей координатной привязки полученных изображений на основе аналитических соотношений; рассчитываются значения погрешностей по предложенному алгоритму; сравниваются значения погрешностей, полученных путем аналитического и статистического моделирования.

Определение координат заданных точек аэрофото-снимков по известным значениям углов обзора камеры ax , ay (где ax – угол в направлении продольной оси (оси фюзеляжа) БПЛА, ay – угол в направлении поперечной оси БПЛА), географических координат БПЛА lat , lon , h (где lat – широта, lon – долгота, h – высота, определенная навигационной аппаратурой потребителя СРНС), угловой ориентации БПЛА, описываемой углами az , ut , kr (где az – азимут продольной оси фюзеляжа, ut – угол места, т. е. угол

между осью фюзеляжа БПЛА и горизонтальной плоскостью, kr – крен, т. е. угол между поперечной осью БПЛА в направлении на правый борт и горизонтальной плоскостью) и высоты полета БПЛА над землей dh , осуществляется в соответствии с алгоритмами указанными в [3; 4]. Известны также значения среднеквадратических отклонений (СКО) погрешностей определения исходных данных.

В предложенных алгоритмах принята связанная с объектом система координат, начало которой совпадает с местоположением камеры в центре БПЛА, ось kX направлена по продольной оси фюзеляжа БПЛА вперед, ось kY направлена вправо, ось kZ направлена вертикально вниз (рис. 1).

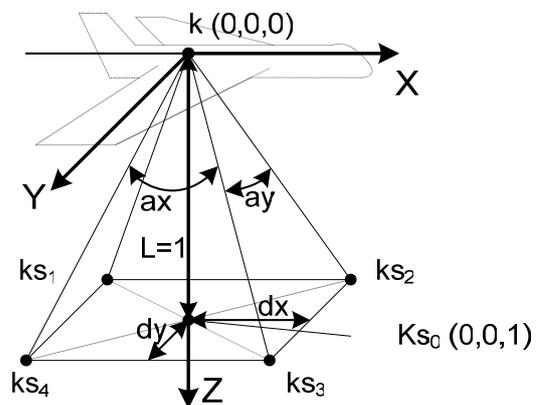


Рис. 9. Точки снимка в системе координат связанной с объектом

На снимке координаты заданных точек определяют по алгоритму (рис. 2).

В результате использования данного алгоритма потребитель получает значения абсолютных координат заданных точек: центра, левого нижнего, левого верхнего, правого верхнего и правого нижнего углов тепловизионного изображения. Данным точкам приписывают индексы $i = 0, 1, 2, 3$ и 4 соответственно.

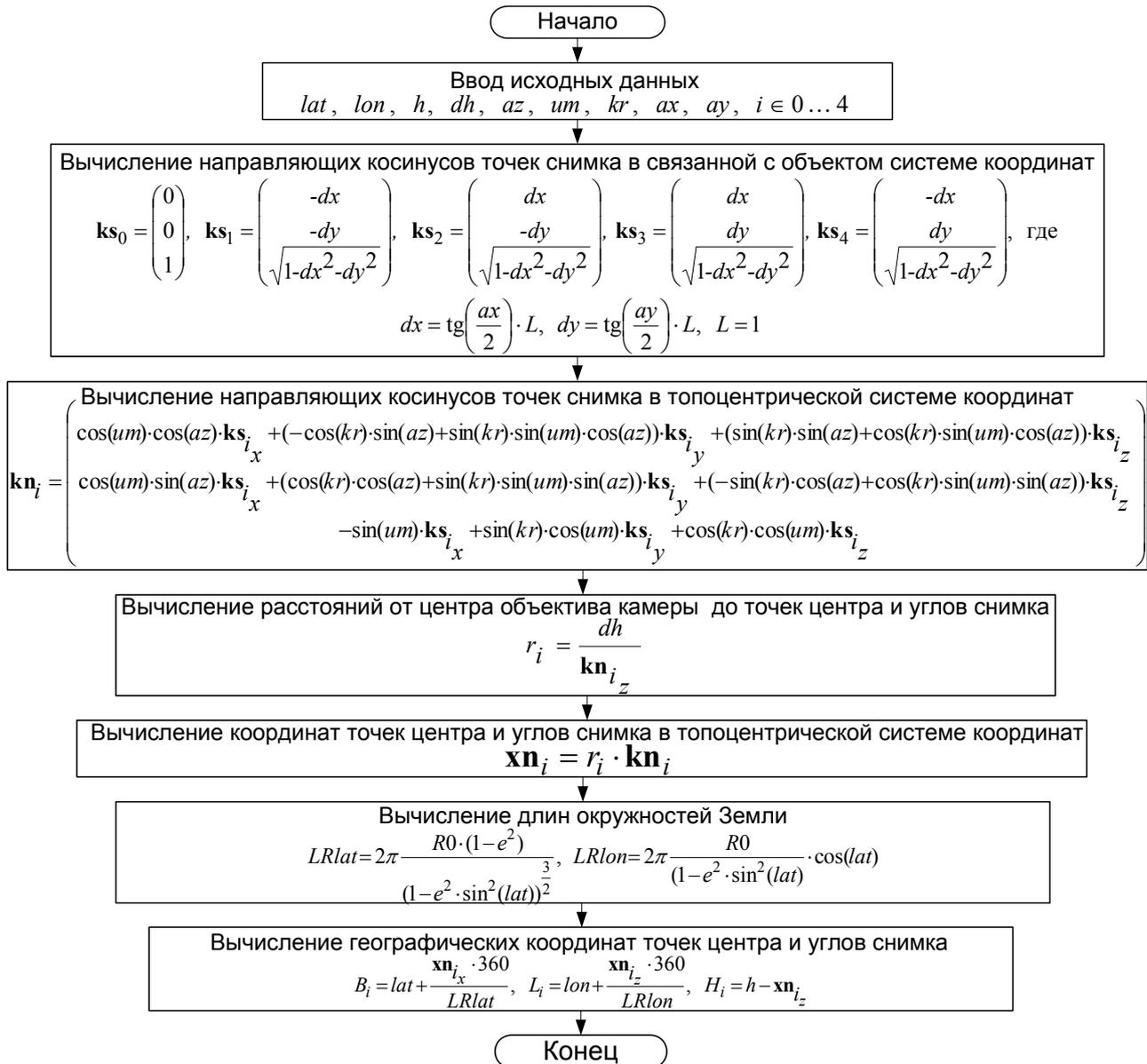


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения координат точек снимка

Задача расчета погрешностей содержит основные этапы (рис. 3).

В операторе 1 вычисляются погрешности задания направляющих косинусов пяти векторов от центра объектива камеры тепловизора до точек 0–5 телевизионных изображений в топоцентрической системе координат (ТЦСК).

Значения направляющих косинусов в ТЦСК функционально связаны со значениями направляющих косинусов в соединенной с ЛА системе координат (СК) и являются результатами косвенных измерений. К прямым измерениям относятся углы пространственной ориентации ЛА.

В операторе 2 вычисляется дисперсия определения расстояния от i -й точки снимка до центра объектива камеры тепловизора с учетом погрешностей определения направляющих косинусов на i -ю точку изображения, найденных в предыдущем пункте. Предпо-

лагается, что погрешности измерения высоты полета ЛА над землей dh и определения направляющих косинусов векторов точек снимка в ТЦСК являются также некоррелированными, поскольку измерения угловой ориентации и высоты полета выполняются разными устройствами (аппаратура потребителей СРНС и высотомер).

На следующем этапе – в операторе 3 – исходя из значения погрешностей определения направляющих косинусов на i -ю точку изображения и дисперсии определения расстояния от i -й точки снимка до центра объектива камеры тепловизора вычисляется дисперсия погрешностей определения x, y, z , составляющих координат i -й точки снимка в ТЦСК. При этом погрешности задания значений направляющих косинусов векторов точек снимка в ТЦСК по x, y -составляющим и расстояния от камеры до i -й точки являются некоррелированными.



Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета погрешностей определения координат объектов, имеющих на тепловизионном изображении

Исходные данные, использованные при моделировании

Наименование	значение	СКО	Примечание
Широта ЛА	$lat = 56^{\circ}0'$ с.ш.	$\sigma_{lat} = 0,032''$	Определяются аппаратурой потребителя спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS
Долгота ЛА	$lon = 92^{\circ}0'$ в.д.	$\sigma_{lon} = 0,058''$	
Высота ЛА	$h = 400$ м	$\sigma_h = 10$ м	
Азимут ЛА	$az = 0^{\circ} - 360^{\circ}$	$\sigma_{az} = 10'$	
Угол места ЛА	$um = 0^{\circ}$	$\sigma_{um} = 20'$	
Крен ЛА	$kr = 0^{\circ}, 10^{\circ}, 20^{\circ}, 30^{\circ}$	$\sigma_{kr} = 20'$	
Углы обзора	$ax = 29^{\circ}, ay = 22^{\circ}$	–	объектива тепловизора ТН7102 NEC [6]
Высота ЛА	$dh = 100$ м	$\sigma_{dh} = 10$ м	Определяется радиовысотомером
$z = 1000$	Число статистических испытаний в каждом заданном значении азимута ЛА		

Далее рассчитываются дисперсии погрешностей определения широты и долготы координат i -й точки снимка (оператор 5), для чего определяются и используются дисперсии погрешности определения нормального и меридионального радиусов кривизны сечения Земли (оператор 4).

Вышеописанный алгоритм расчета погрешностей был использован для анализа алгоритма [3; 4], в частности, были рассчитаны зависимости СКО погрешности σ_r определения пространственных координат одной из точек тепловизионного изображения от угла азимута БПЛА в соответствии с выражением:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}, \quad (1)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – СКО погрешности определения геоцентрических координат точки.

Кроме того, были вычислены погрешности координатной привязки получаемых изображений методом статистического моделирования, исходя из которого на измеряемые исходные параметры накладывались погрешности в виде случайных величин с заданными значениями СКО и нулевыми математическими ожиданиями. Затем проводилось заданное число статистических испытаний, в результате которых рассчитывались статистические оценки СКО определяемых параметров. Исходные данные для расчетов указаны в таблице.

При расчетах была выявлена 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 ЛА (рис. 4).

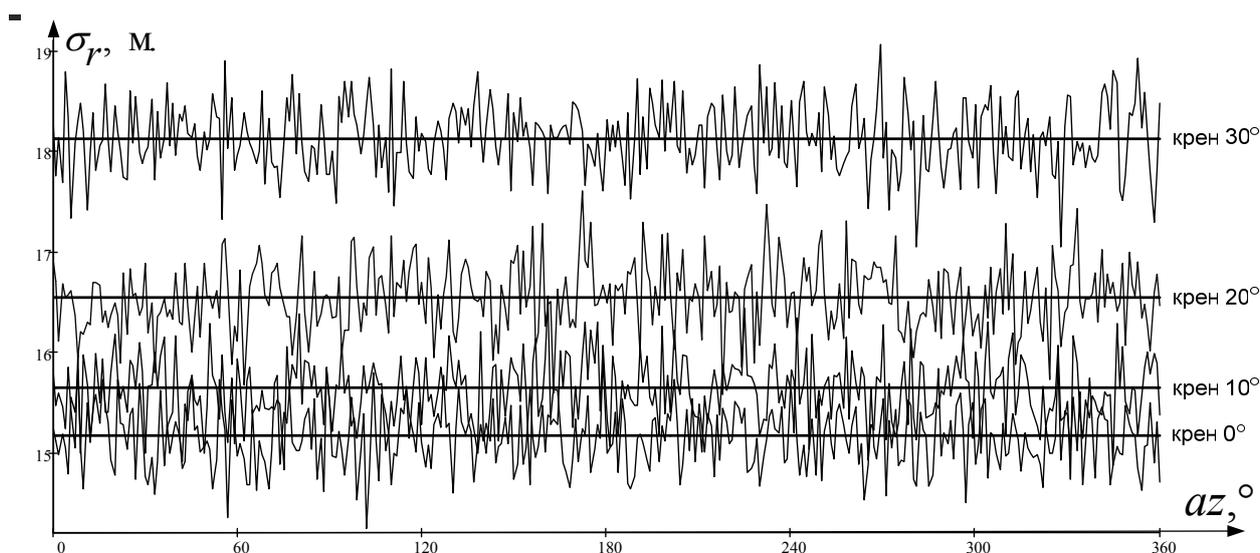


Рис. 4. Зависимость СКО погрешности определения координат заданной точки от азимута ЛА

Зависимости (рис. 4) 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. Результаты аналогичны для всех точек изображения.

Анализ результатов расчета погрешностей методами статистического и аналитического моделирования, показывает, что методы имеют несущественное расхождение, обусловленное влиянием случайных погрешностей прямых измерений на получаемые по методу статистического моделирования результаты.

Исходя из этого, аналитический метод расчета погрешностей является более предпочтительным, поскольку не подвержен влиянию случайных значений погрешностей прямых измерений, не зависит от числа проведенных статистических испытаний, не требует затратных по времени вычислений. Кроме того, дополнительным достоинством аналитического метода является возможность учета корреляции между измеряемыми значениями, для чего требуется только изменение вида корреляционных матриц измеряемых

параметров, при этом сам алгоритм расчета погрешностей не изменяется.

Таким образом, приведенный аналитический метод расчета погрешностей позволяет на основе заданных погрешностей прямых измерений рассчитывать погрешности искомых географических координат заданной точки получаемых с борта ЛА тепловизионных изображений или фотоснимков.

Библиографические ссылки

1. Сучкова Г. А. Комплексное обследование и контроль технического состояния элементов ВЛ неразрушающими методами // Энергетик. 2008. № 4 С. 20–22.
2. Шалыт Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М. : Энергоатомиздат, 1982.
3. Макаренко Г. К., Алешечкин А. М. Алгоритм координатной привязки тепловизионных снимков // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. ; науч. ред. Г. Я. Шайдурова ; отв. за вып. А. А. Левицкий. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. С. 33–37.
4. Алешечкин А. М. Способ геодезической привязки аэрофотоснимков // Вестник СибГАУ. 2011. № 7 (37). С. 58–62.

А. М. Aleshechkin, G. K. Makarenko

ESTIMATION OF ERROR BOUNDS OF IDENTIFICATION OF COORDINATES OF ELECTRIC POWER UNDER REMOTE DIAGNOSIS

The authors describe analytical method developed for estimation of errors of identification of coordinates of thermal images given points with remote study of technical condition of overhead power lines and consider a set of main errors of primary parameters measurements, and the algorithm for calculation of its impact on RMS error in determination of coordinates of thermal images given points. The parallel of errors obtained by analytical method with the results of estimations of the errors obtained with the method of statistical modeling is pursued.

Keywords: Overhead power line, infra-red chamber, navigation, position, position error.

© Алешечкин А. М., Макаренко Г. К., 2012