

УДК 528.4+528.7

**РЕКОМЕНДУЕМЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО СНИМКА,
ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ ОБЗОРНОЙ КАМЕРЫ ЭЛЕКТРОННОГО ТАХЕОМЕТРА**

*канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА; канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ
(Полоцкий государственный университет);*

Д.О. ВОЛКОВ

(Витебское агентство по государственной регистрации и земельному кадастру)

Рассматривается процесс создания панорамы или плана фасада здания (сооружения) по снимкам, полученным обзорной камерой электронного тахеометра. Показано, что для этого необходимо знать элементы внешнего ориентирования цифрового снимка. В ходе работы с электронным тахеометром определяются углы на измеряемые точки, в том числе и для цифрового снимка, полученного обзорной камерой. Измеренные углы и координаты точек, с которых выполнялась съёмка, не являются элементами внешнего ориентирования снимка. Кроме того, система координат для измерений на точки отличается от системы фотограмметрических координат, в которой необходимо знать элементы внешнего ориентирования снимка. Предложена последовательность процедур и формулы перехода от определенных тахеометром углов и координат точек к элементам внешнего ориентирования снимков.

Ключевые слова: цифровые снимки, электронный тахеометр, обзорная камера, элементы внешнего ориентирования снимка.

На основе предоставленных результатов цифровой съёмки здания обзорной камерой тахеометра *LeicaNovaMS50*, приведенного на рисунке 1, рассмотрим процесс определения элементов внешнего ориентирования снимка.

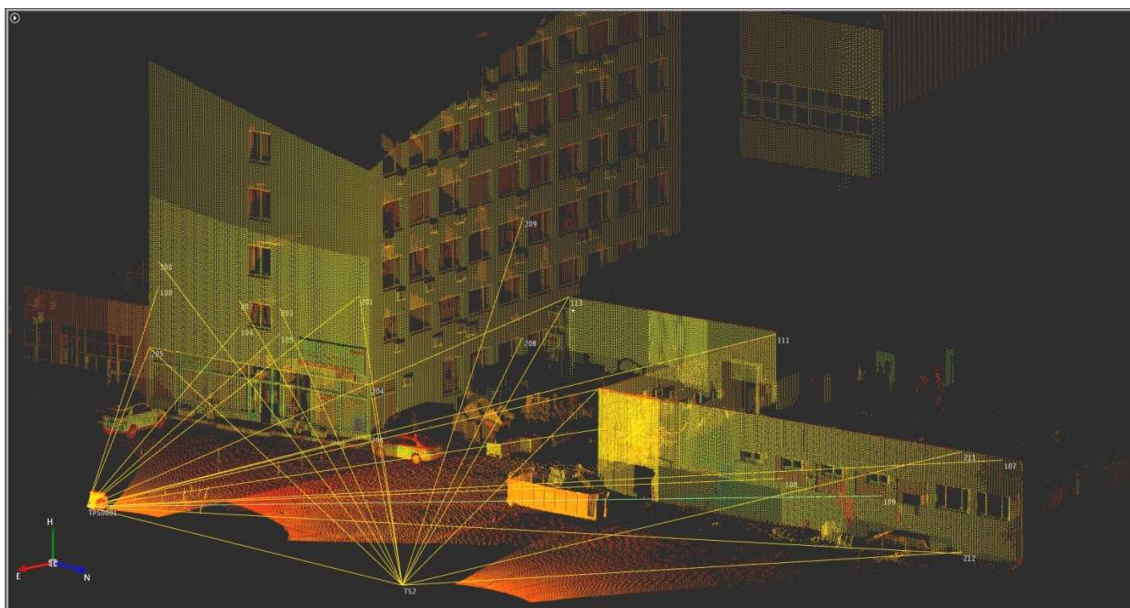


Рисунок 1. – Результаты цифровой съёмки здания

Измерение углов и расстояний выполнялось в условной (X_Y, Y_Y, Z_Y) системе координат (рисунок 2) с началом $(X_Y = 0, Y_Y = 0, Z_Y = 0)$ в геометрическом центре тахеометра на первой точке стояния *I*. За направление оси *X* и за начальное направление принято направление на точку *II*.

Для решения задачи воспользуемся системой координат, принятой в наземной фототеодолитной съёмке. Так как снимки, полученные с разных точек, имеют малое перекрытие, решать задачу будем фотограмметрическим методом, в котором для измерительных целей используют одиночные снимки.

Фотограмметрический метод используют, когда необходимо определить положение на снимке деталей сооружений в одной плоскости, как правило, в плоскости *XZ*, параллельно которой обычно устанавливается плоскость снимка. Съёмку выполняют с одной фотостанции [1]. В нашем случае снимков много и все они не параллельны зданию. Однако и в этих условиях задачу можно решить.

Фотограмметрический метод дает возможность получить фотоплан или чертёжный план фасада здания или его частей. Планы фасадов зданий выполняют в широком диапазоне масштабов – от 1:1 до 1:2000 – в зависимости от требуемой точности обмерных работ [1].

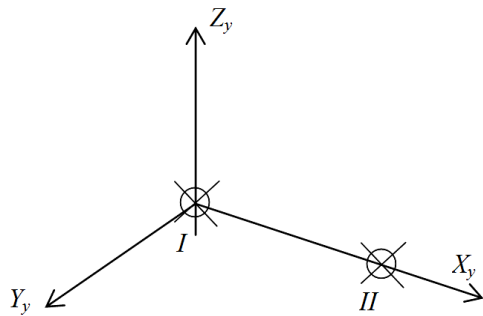


Рисунок 2. – Условная система координат

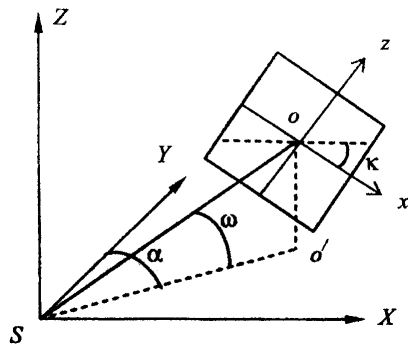


Рисунок 3. – Элементы внешнего ориентирования

Для определения по снимкам координат точек объекта необходимо знать положение снимка в пространстве. Это положение определяется девятью параметрами – тремя элементами внутреннего и шестью элементами внешнего ориентирования [1].

Элементы внутреннего ориентирования [1]:

- f – фокусное расстояние фотокамеры;
- x_0, z_0 – координаты главной точки снимка.

Так как цифровая камера не калибровалась, примем примерное значение $f = 21$ мм, указанное в работе [2], а координаты главной точки снимка – $x_0 = z_0 = 0$ мм.

Элементы внешнего ориентирования показаны на рисунке 3 [1]:

- X_S, Y_S, Z_S – координаты центра фотографирования S в заданной системе координат;

- *элементы углового ориентирования снимка*: α, ω, κ , где α – дирекционный угол оптической оси – горизонтальный угол между направлением оси Y и проекцией оптической оси на горизонтальную плоскость XU ;

- ω – угол наклона оптической оси, угол в вертикальной плоскости между проекцией оптической оси на плоскость XU и самой оптической осью;

- κ – угол крена снимка, угол в плоскости снимка, составленный осью x снимка и следом плоскости, проходящей через главную точку снимка o параллельно плоскости XU .

Примем систему координат X, Y, Z , приведенную на рисунке 3, в которой:

- ось Y направлена перпендикулярно фасаду здания и в пересечении с плоскостью образует точку N (проекция точки надира на плоскость фасада здания);
- начало фотограмметрической системы координат ($X = 0, Y = 0, Z = 0$) в центре проекции S .

На рисунке 4 схематично показано направление осей координат в принятой нами системе координат применительно к объекту, показанному на рисунке 1.

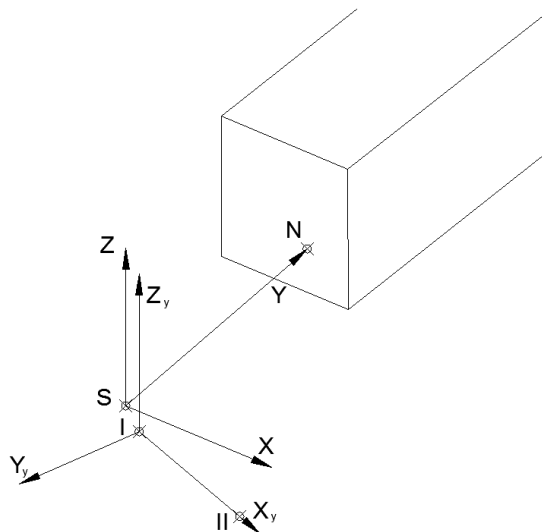


Рисунок 4. – Направление осей координат применительно к объекту

Чтобы определить, как расположены оси фотограмметрической системы координат в пространстве, необходимо найти проекцию точки надира на плоскость фасада здания N и восстановить перпендикуляр к плоскости здания.

На фасаде здания имеются опорные точки, по которым можно определить плоскость здания. Запишем уравнение прямой линии, проходящей через точку перпендикулярно к плоскости [3]:

$$AX_Y^i + BY_Y^i + CZ_Y^i + D = 0, \quad (1)$$

где X_Y^i, Y_Y^i, Z_Y^i – координаты опорной точки (i – номер точки) в условной системе координат; A, B, C, D – коэффициенты, определяющие положение прямой и плоскости в пространстве.

В формуле (1) имеем четыре неизвестных коэффициента, каждая точка даёт одно уравнение, значит, для решения задачи нам необходимо четыре точки.

Для приведения формулы (1) к нормальному виду необходимо умножить уравнение (1) на нормирующий множитель, тогда получим [3]:

$$l_i = \frac{AX_Y^i + BY_Y^i + CZ_Y^i + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (2)$$

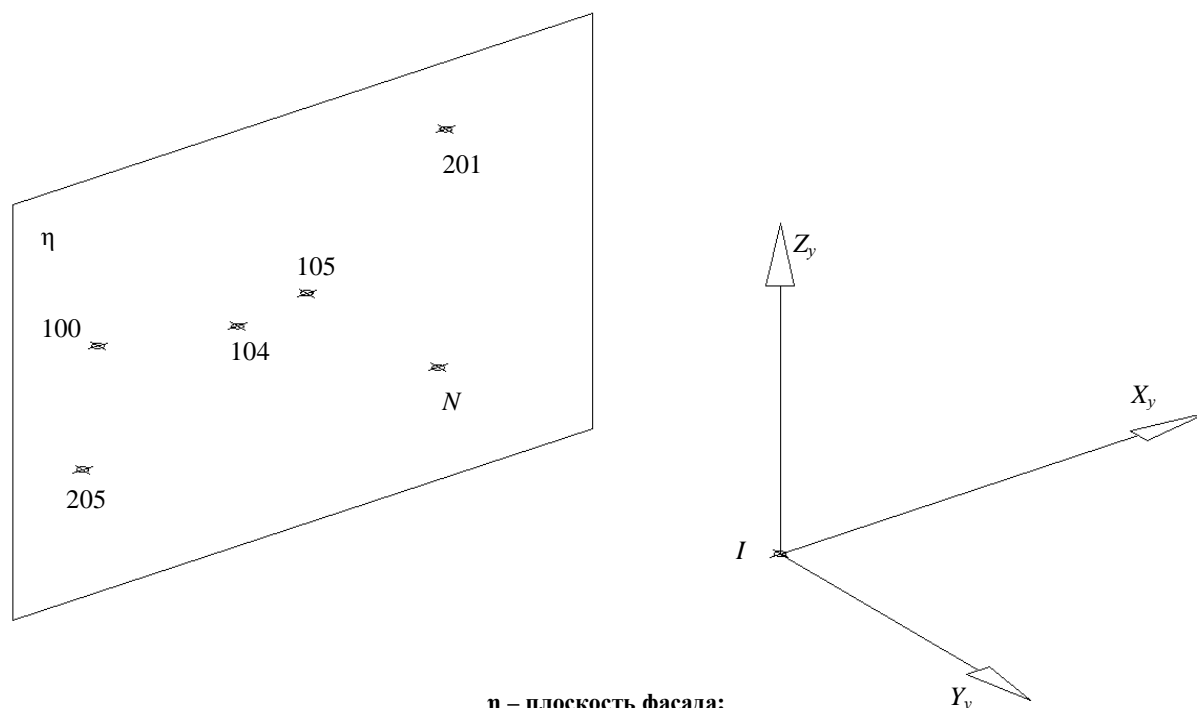
Здесь $\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = \lambda$ – нормирующий множитель.

Для определения координат точки основания перпендикуляра спроецируем точку с координатами центра проекции в условной системе координат на плоскость фасада здания. В итоге будем иметь следующие формулы [3]:

$$\begin{aligned} X_Y^N &= X_Y^S - Al_i, \\ Y_Y^N &= Y_Y^S - Bl_i, \\ Z_Y^N &= Z_Y^S - Cl_i, \end{aligned} \quad (3)$$

где X_Y^N, Y_Y^N, Z_Y^N – проекция точки S на плоскость фасада здания η (рисунок 5) в условной системе координат; X_Y^S, Y_Y^S, Z_Y^S – координаты центра проекции в условной системе координат.

Для уточнения результатов вычисления коэффициентов A, B, C, D мы взяли пять точек. Расположение опорных точек на фасаде здания показано на рисунке 5, а их координаты приведены в таблице 1.



η – плоскость фасада;
 I – номер станции; 105 – номер опорной точки;
 N – проекция точки надира на плоскость фасада здания

Рисунок 5. – Расположение опорных точек на фасаде здания

Таблица 1. – Координаты опорных точек и центра проекции S в условной системе координат

№ точек	Координаты точек		
	X_Y^i , м	Y_Y^i , м	Z_Y^i , м
100	-19,550	-23,724	5,862
104	-13,637	-24,870	4,369
105	-10,701	-25,447	4,347
201	-4,827	-26,576	7,349
205	-20,200	-23,587	2,257
S	-0,0027	-0,0381	0,0739

По данным таблицы 1 составили систему уравнений, подставив координаты опорных точек в формулу (1). Решив эту систему уравнений по методу наименьших квадратов, получили коэффициенты, представленные в таблице 2.

Таблица 2. – Вычисленные значения коэффициентов

Коэффициент	A	B	C	D
Значение	0,1906342	0,9816610	0,0005888	27,00991

Подставив определенные коэффициенты в уравнение (1), получили незначительные расхождения, не превышающие 5 мм, обусловленные шероховатостью здания. Коэффициенты, приведенные в таблице 2, будем использовать для вычисления координат точки надира.

В предоставленных нам данных приведены результаты калибровки, где указаны угловые элементы взаимного положения оптической оси цифровой камеры по отношению к визирной оси тахеометра и линейные элементы, показывающие смещение главной точки объектива (центра проекции S) относительно геометрического центра тахеометра (ΔX_Y^{I-S} , ΔY_Y^{I-S} , ΔZ_Y^{I-S}).

Угловые элементы взаимного ориентирования будут неизменными для любых полученных снимков, а линейные будут меняться с изменением измеряемых горизонтальных и вертикальных углов. Линейные элементы взаимного положения главной точки объектива S и геометрического центра тахеометра I – ΔX_Y^{I-S} , ΔY_Y^{I-S} , ΔZ_Y^{I-S} , полученные в ходе калибровки, приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Данные определения линейных элементов взаимного положения главной точки объектива и геометрического центра тахеометра

Приращения координат	ΔX_Y^{I-S}	ΔY_Y^{I-S}	ΔZ_Y^{I-S}
Значения, м	0,060772	0,015872	0,054600

В таблице 3 приведены данные применительно к принятой нами системе координат.

В рассматриваемом электронном тахеометре определяются линейные приращения координат между центром проекции S и геометрическим центром тахеометра I (ΔX_Y^{I-S} , ΔY_Y^{I-S} , ΔZ_Y^{I-S}) для всех получаемых снимков. Эти данные для рассматриваемого нами снимка приведены в последней строке таблицы 1.

Чтобы получить координаты центра проекции в условной системе координат (X_Y^S , Y_Y^S , Z_Y^S), необходимо к координатам станции I (X_Y^I , Y_Y^I , Z_Y^I) прибавить приращения координат (ΔX_Y^{I-S} , ΔY_Y^{I-S} , ΔZ_Y^{I-S}).

Поскольку координаты станции I равны нулю, то приращения координат будут равняться координатам центра проекции в условной системе координат.

Далее по формулам (3) определили координаты проекции точки надира на плоскость фасада здания, приведенные в таблице 4.

Таблица 4. – Координаты проекции точки надира N на плоскость фасада в условной системе координат

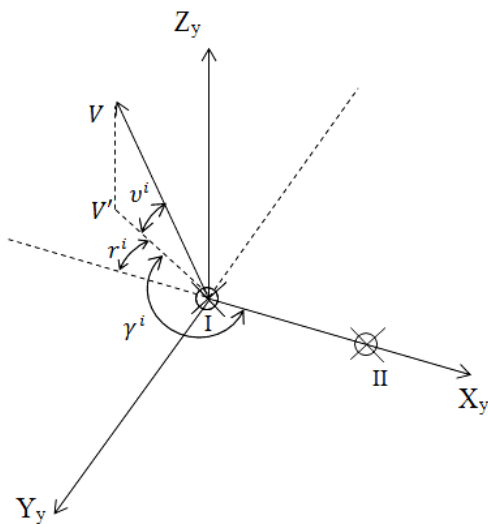
Координаты	X_Y^N	Y_Y^N	Z_Y^N
Значения, м	-5,14452	-26,51549	0,05806

Для проверки правильности вычислений подставим данные таблицы 4 в уравнение (1). Полученное расхождение $3,02254 \cdot 10^{-7}$ можно считать пренебрегаемо малой величиной.

С помощью проекции точки надира можно восстановить перпендикуляр к плоскости здания и получить направление оси Y в принятой нами системе координат. Относительно этого направления вычислим угловые элементы внешнего ориентирования.

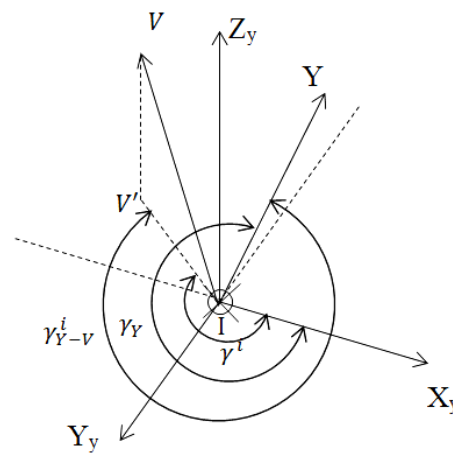
Во время фотосъемки тахеометр записывает отчёты по вертикальному и горизонтальному кругу. В нашем случае горизонтальный угол будет являться углом γ^i – углом между проекцией визирной оси тахеометра на плоскость $X_y Y_y$ и направлением оси X_y , а вертикальный угол v^i – углом между проекцией визирной оси тахеометра на плоскость $X_y Y_y$ и визирной осью тахеометра V (рисунок 6).

Для того чтобы найти дирекционный угол оптической оси α (см. рисунок 3) для каждого снимка относительно перпендикуляра к зданию, воспользуемся последовательностью решения, представленной на рисунке 7.



V – визирная ось тахеометра;
 V' – проекция визирной оси на плоскость $X_y Y_y$;
 v^i – вертикальный угол между осью V и её проекцией V' для снимка с номером i ;
 γ^i – горизонтальный угол между проекцией визирной оси V' и осью X_y для снимка с номером i ; r – румб угла γ

Рисунок 6. – Угловые элементы внешнего ориентирования



V – визирная ось тахеометра;
 V' – проекция визирной оси на плоскость $X_y Y_y$;
 Y – ось Y в принятой нами системе координат;
 γ^i – горизонтальный угол между осью X_y и проекцией визирной оси тахеометра на плоскость $X_y Y_y$;
 γ_Y – горизонтальный угол между осью X_y и осью Y ;
 γ_{Y-v^i} – горизонтальный угол между осью Y и проекцией визирной оси тахеометра на плоскость $X_y Y_y$ в момент фотографирования для снимка i

Рисунок 7. – Угловые элементы внешнего ориентирования

Найдём угол γ_Y между осью Y и осью X_y в условной системе координат относительно начального направления X_y из обратной геодезической задачи. Чтобы определить направления, необходимо найти румб искомого угла. В геодезии румб определяется от ближайшего конца меридиана до направления на искомую точку. В нашей задаче определим румб направления от точки S на N , которое будет соответствовать направлению оси Y в принятой нами системе координат (см. рисунок 4), относительно оси X_y условной системы координат по формуле:

$$r_{S-N} = \arctg \left(\frac{\Delta Y_Y^{S-N}}{\Delta X_Y^{S-N}} \right), \quad (4)$$

где r_{S-N} – румб направления от точки S на точку N ; ΔY_Y^{S-N} , ΔX_Y^{S-N} – приращения координат от точки S до точки N .

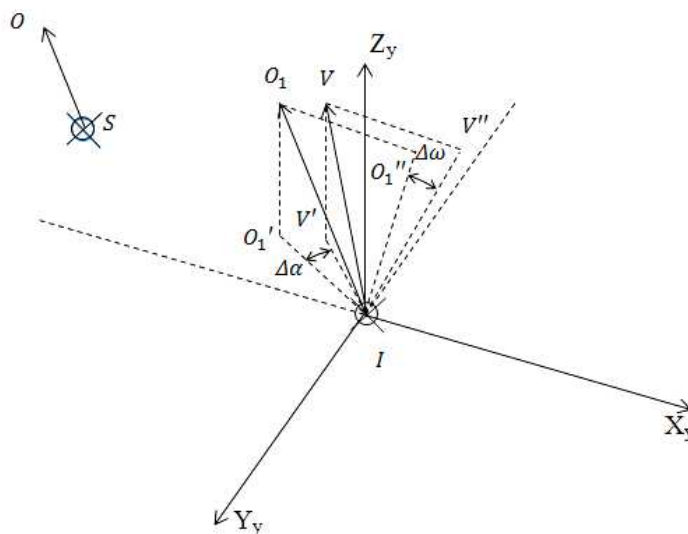
Затем необходимо определить, в какой четверти находится румб, по общепринятой методике.

Отняв от угла γ^i угол γ_{Y^i} между осью X_y и осью Y , получим горизонтальный угол между осью Y и проекцией визирной оси тахеометра на плоскость $X_y Y_y$ в момент фотографирования (см. рисунок 7).

Горизонтальный угол между осью Y и проекцией визирной оси тахеометра на плоскость $X_y Y_y$ в момент фотографирования для снимка i вычисляем по формуле:

$$\gamma_{Y-V} = \gamma_i - \gamma_Y. \quad (5)$$

Прибавив к углу $\gamma_{y.v}$ поправку в дирекционный угол оптической оси $\Delta\alpha$ (рисунок 8), которая определена в результате калибровки, получим направление оптической оси цифровой камеры α относительно оси координат Y .



**SO – фрагмент оптической оси цифровой камеры, вынесенный вне рисунка, чтобы его не загромождать; IO_1 – линия, параллельная оптической оси SO ;
 IO'_1 – проекция IO_1 на плоскость $XyYy$; IO''_1 – проекция IO_1 на плоскость $ZyYy$;
 IV' – проекция визирной оси на плоскость $XyYy$; IV'' – проекция визирной оси на плоскость $ZyYy$;
 $\Delta\alpha$ – поправка в дирекционный угол оптической оси; $\Delta\omega$ – поправка в угол наклона оптической оси**

Рисунок 8. – Углы отклонения оптической оси цифровой камеры от визирной оси тахеометра

Поправки по результатам калибровки определения взаимных углов между визирной осью тахеометра и оптической осью обзорной камеры приведены в таблице 5.

Таблица 5. – Результаты калибровки

Угол	$\Delta\alpha$	$\Delta\omega$	$\Delta\kappa$
Значение	0°21'38",2	0°07'38",6	0°13'59",7

Угол внешнего ориентирования α для снимка с номером i (см. рисунок 3) можно вычислить по формуле:

$$\alpha = \gamma_{y.v}^i + \Delta\alpha^i \tag{6}$$

Чтобы найти угол внешнего ориентирования ω (см. рисунок 3), необходимо найти вертикальный угол ν^i (см. рисунок 6) из выражения:

$$\nu^i = Mz - \theta_i \tag{7}$$

где Mz – место зенита; θ – зенитное расстояние для снимка с номером i .

Прибавив к полученному значению зенитного расстояния результат калибровки, угол внешнего ориентирования ω для снимка под номером i уменьшится, следовательно

$$\omega^i = \nu^i - \Delta\omega \tag{8}$$

Рассчитаем угловые элементы внешнего ориентирования для снимка `Img_pano_00_01_040615_153357` (далее – № 357) на основе измерений во время фотографирования, приведенных в таблице 6.

Результаты всех вычисления сведём в таблицу 7.

Таблица 6. – Измеренный горизонтальный угол γ_{357} , зенитное расстояние θ_{357} и вычисленный вертикальный угол ν^{357} во время фотографирования

Название	Обозначение	Значение
Горизонтальный угол для снимка 357	γ_{357}	241°20'44",7
Зенитное расстояние для снимка 357	θ_{357}	73°13'49",6

В таблице 7 приведем также приращения координат между точками S и N в условной системе координат, горизонтальный γ_Y , вертикальный ν_Y углы и элементы внешнего ориентирования для снимка 357.

Таблица 7. – Вычисленные значения элементов внешнего ориентирования для снимка под номером № 357

Названия	Обозначения	Вычисленные значения
Приращения координат между точками S и N	ΔY^{S-N}	-26,47739 м
	ΔX^{S-N}	-5,141788 м
Румб направления $S-N$	r_{S-N}	79°00'36.748" (III четверть)
Горизонтальный угол между осью X_Y и осью Y	γ_Y	259°00'36.748"
Линейные элементы внешнего ориентирования, м	X_Y^S	-0,002732
	Y_Y^S	-0,038100
	Z_Y^S	0,073941
Горизонтальный угол между осью Y и визирной осью тахеометра для снимка 357	γ_{Y-V}^{357}	342°20'07,961"
Дирекционный угол оптической оси	α^{357}	342°20'07,961" + 0°21'38",2 = 342°41'46",16
Измеренный вертикальный угол	ν_Y^{357}	16°46'10",4
Угол наклона оптической оси	ω^{357}	16°46'10",4 - 0°07'38",6 = 16°38'31",8
Угол поворота снимка	κ^{357}	0°13'59",7

Таким образом, по полученным углам α , ω и κ можно выполнить трансформирование снимка и получить панораму здания или план фасада здания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михеева, А.А. Фотограмметрия. Наземная стереофотограмметрическая съемка : учеб.-метод. компл / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов. – Новополоцк : ПГУ, 2008. – 88 с.
2. Техническая документация компании Artina. Светочувствительная матрица МТ9Р031.
3. Александров, П.С. Лекции по аналитической геометрии, дополненные необходимыми сведениями с приложением собрания задач, снабженных решениями / А.С. Пархоменко, П.С. Александров. – М. : Наука, 1968. – 912 с.

Поступила 27.12.2017

SUGGESTED ALGORITHM FOR THE DEFINITION OF THE OUTER ORIENTATION DATA OF THE DIGITAL PLATE MADE WITH THE OVERVIEW CAMERA OF THE ELECTRONIC TACHOMETER

A. MIKHEEVA, V. YALTYKHOV, D. VOLKOV

In order to create the panorama or the plan of the building façade of using the digital plates made with the overview camera of the electronic tachometer it is necessary to know the outer orientation data of the digital plate. Working with the electronic tachometer one should determine the angles for the measured points, including the digital plate made with the overview camera. The measured angles and the coordinates of the points, from which the survey was conducted, are not the data of the outer orientation of the plate. Moreover, the system of the coordinates for the measurement at the point is different from the survey coordinates, for which the data of the outer orientation is necessary. The paper suggests the sequence of procedures and formulas of transition from the angles and points coordinates determined with the tachometer to the data of the outer orientation.

Keywords: digital images, electronic total station, survey camera, elements of external orientation of the image.