

УДК 528.711:528.58

Г. Н. ТИМУШЕВ

О МАРКИРОВКЕ МАРШРУТОВ КРУПНОМАСШТАБНОЙ АЭРОСЪЕМКИ

В связи с широким применением предварительной маркировки разреженной сети опознаков в настоящее время повышаются требования к точности проложения аэрофотосъемочных маршрутов, особенно при крупномасштабных съемках, выполняемых в больших объемах для мелиорации, ирригации и других целей зачастую на однородной малоориентирной местности.

При полетах на малых высотах самолетовождение затрудняется: а) вследствие ограниченного обзора местности, видимой с самолета; б) сложности ведения визуальной ориентировки из-за большой угловой скорости перемещения ориентиров; в) сокращения дальности действия самолетных радиотехнических средств; г) значительного сокращения возможности определения навигационных элементов при помощи автономных средств самолетовождения и т. п. Кроме того, полет на малой высоте создает трудности в пилотировании.

В результате указанных причин трудно выбрать входные и контрольные ориентиры и вывести на них самолет; определение вектора путевой скорости и текущих координат происходит со значительными ошибками, что приводит к отклонению самолета от линии заданного пути и в конечном счете к фотограмметрическим или полным разрывам между аэроснимками смежных маршрутов.

В общем случае в зависимости от условий полета и точности используемых средств навигации фактической линии пути присущи случайные колебания относительно заданного маршрута. Таким образом, отклонение от заданного маршрута Y — непрерывная случайная величина, связанная функциональной зависимостью (1) с системой случайных величин x_i , представляющих собой погрешности навигационных измерений

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Так как значения x_i находятся в узком интервале, для определения числовых характеристик величины Y применяют метод линеарации, ограничиваясь при решении практических задач только математическим ожиданием (2) и дисперсией (3) [2]:

$$M_Y = f'(Mx_1, Mx_2, \dots, Mx_n), \quad (2)$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_M \sigma^2 x_i, \quad (3)$$

где $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_M = f'_{x_i}(Mx_1, Mx_2, \dots, Mx_n)$.

Однако решение задачи можно упростить с учетом того, что аэро-съемочные маршруты ограничены в длине. Тогда можно принять, что отклонение от заданного маршрута пропорционально пройденному расстоянию. При этом, если Y_B — ошибка прохода входного ориентира аэросъемки, S — длина маршрута, то максимальное боковое отклонение от заданного маршрута — Y_{max} определится выражением

$$Y_{max} = Y_B + KS, \quad (4)$$

где K — тангенс угла между заданным и фактическим маршрутами аэросъемки.

Крайне важно, чтобы замаркированные плано-высотные опознаки, расположенные в межмаршрутных перекрытиях, изобразились на снимках смежных маршрутов. Очевидно, в идеальном случае изображения опознаков должны располагаться на оси поперечного перекрытия снимков, а в самом неблагоприятном случае — не ближе a см от ближайшего края каждого из перекрывающихся аэроснимков (требование к точности фотограмметрических измерений). Тогда допустимое отклонение самолета от линии заданного пути, выраженное в процентах перекрытия, определится

$$Y_{доп} = \frac{q}{2} - \frac{a}{l} 100 = \frac{lq - 200a}{2l}, \quad (5)$$

где q — заданное поперечное перекрытие снимков в процентах; l — размер поперечной стороны снимка, см.

Приняв q , равным 30%, l — 18 см, a — 1 см, получим $Y_{доп} = 10\%$.

Ошибки в поперечном перекрытии получаются главным образом вследствие уклонения от заданной линии пути и поперечных колебаний самолета.

Уклонения от заданной линии пути происходят из-за ошибок определения угла упреждения α_y , магнитного склонения α_m , девиации компаса α_k , графических построений α_r , азимутальных колебаний самолета α_a и других факторов.

Задавшись полученными из практики величинами ошибок в определении этих элементов: $\Delta\alpha_y = \pm 2^\circ$, $\Delta\alpha_m = \pm 1^\circ$, $\Delta\alpha_k = \pm 1^\circ$, $\Delta\alpha_r = \pm 1^\circ$, $\Delta\alpha_a = \pm 1^\circ$, по известной формуле (6) получаем среднюю квадратическую ошибку в курсе следования $\Delta\alpha_{кc} = \pm 3^\circ$, ведущей к уклонению самолета от линии заданного пути

$$\Delta\alpha_{кc} = \pm \sqrt{\Delta\alpha_y^2 + \Delta\alpha_m^2 + \Delta\alpha_k^2 + \Delta\alpha_r^2 + \Delta\alpha_a^2}. \quad (6)$$

Ошибка в поперечном перекрытии вследствие уклонения самолета от линии заданного пути подсчитывается по формуле (7) [3]

$$\Delta q_{кc} = \frac{100 S \cdot \Delta\alpha_{кc}}{lt\rho^\circ}, \quad (7)$$

где S — длина аэросъемочного маршрута; t — знаменатель масштаба фотографирования.

Приняв, например, $t = 1 : 5000$, $S = 4$ км, получим $\Delta q_{кc} = 24\%$, то есть даже при незначительной длине аэросъемочного маршрута, не обеспеченного наземными ориентирами, по створу которых можно осуществлять самолетовождение, боковое отклонение самолета от линии заданного пути может оказаться недоступным.

При постоянной ошибке $\Delta\alpha_{кc}$ последующие маршруты могут располагаться и параллельно предыдущему, однако изображения маркированных опознаков будут в нежелательных местах снимков.

Поперечные колебания самолета приводят непосредственно к изменению поперечного перекрытия смежных маршрутов. В этом случае

ошибка $\Delta q_{\text{п}}$ в поперечном перекрытии вычисляется по формуле (8) [3]

$$\Delta q_{\text{п}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 100 \alpha_{\text{п}}}{\rho^{\circ} \sin 2\beta}, \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{п}}$ — величина поперечного колебания самолета в градусах; 2β — угол поля зрения аэрофотоаппарата.

Приняв $\alpha_{\text{п}} = \pm 3^{\circ}$ (при ручном управлении самолетом на малых высотах) и $2\beta = 120^{\circ}$, получим $\Delta q_{\text{п}} = \pm 7\%$, то есть возможная ошибка в поперечном перекрытии от поперечной неустойчивости самолета имеет значительную величину и в сумме с другими ошибками может привести к фотограмметрическим разрывам между маршрутами.

Для уменьшения вероятности появления разрывов между маршрутами можно увеличить заданное поперечное перекрытие снимков, что прямо пропорционально повысит стоимость аэрофотосъемочных, фотограмметрических и полевых работ. Есть и другой способ — обеспечить аэрофотосъемочные маршруты искусственными (маркированными) знаками, что мало отразится на стоимости маркировочных работ.

Остановимся на последнем способе, при котором с большой вероятностью исключаются отклонения от линии заданного пути, так как самолетовождение осуществляется с использованием хорошо видимых маркированных знаков.

Маркировку аэрофотосъемочных маршрутов целесообразно выполнять отдельными знаками, которые должны безошибочно опознаваться с заданной высоты полета и отличаться от других предметов местности, имеющих правильную геометрическую форму. Желательно, чтобы весь знак или один из его элементов были вытянуты вдоль линии полета. Для этого могут быть рекомендованы знаки в виде буквы «Т», «стрелы», «креста» и т. п.

Так как при определении размеров знаков необходимо рассчитывать на визуальное их обнаружение, критическая ширина знака $Ш$ определится из выражения

$$Ш \geq \frac{\psi'}{\rho^{\circ}} D_{\text{п}}, \quad (9)$$

где ψ' — острота зрения; $D_{\text{п}}$ — наклонная дальность обнаружения.

Для практических целей выражение (9) удобно представить в следующем виде:

$$Ш \geq \frac{\psi' t f_{\text{к}}}{\rho' \cos \varphi}, \quad (10)$$

где $f_{\text{к}}$ — фокусное расстояние аэрофотоаппарата; φ — вертикальный угол, под которым обнаруживается знак.

Известно, что при рассмотрении предметов, перпендикулярных зрительному базису, острота невооруженного зрения может составлять даже $20''$. При рассматривании точечных предметов она снижается до $45''$. С учетом же вибрации самолета, скорости полета, остекления кабины и других факторов острота зрения не превышает $1,5-2'$.

Для лучшего опознавания необходимо, чтобы длина белого знака на темном фоне превосходила его ширину в шесть раз, а черного знака на светлом фоне — в девять раз [1].

Тогда, принимая в расчет $\varphi = 60^{\circ}$, получаем минимальные размеры белых знаков на темном фоне (см. таблицу).

Соответственно могут быть рассчитаны и размеры черных знаков на светлом фоне. Однако такие знаки на практике применяются редко.

Для определения расстояния L , через которое необходимо располагать знаки на оси маршрута, воспользуемся формулой (11) [3]

$$L = \frac{lt\rho^\circ \Delta q'}{100 \Delta \alpha_{\text{кс}}}, \quad (11)$$

где $\Delta \alpha_{\text{кс}}$ — ошибка в курсе следования; $\Delta q'$ — ошибка в поперечном перекрытии, которая допускается при наличии поперечных колебаний самолета, чтобы не получить разрывов между маршрутами.

Минимальные размеры белых знаков для различных условий аэро съемки, м

Масштаб аэро съемки	Фокусное расстояние, мм			
	70		100	
	ширина	длина	ширина	длина
1 : 3000	0,2	1,2	0,3	1,8
1 : 5000	0,4	2,4	0,5	3,0
1 : 8000	0,6	3,6	0,8	4,8
1 : 10000	0,7	4,2	1,0	6,0
1 : 15000	1,1	6,6	1,5	9,0

Нетрудно подсчитать, что при $Y_{\text{доп}} = 10\%$, $\Delta q_{\text{п}} = 7\%$, $\Delta q' = 5-6\%$.

При выполнении полета по маркированному маршруту, когда самолетовождение производится по створам знаков, можно считать, что ошибка $\Delta \alpha_{\text{кс}}$ является следствием только азимутальной неустойчивости самолета и не превышает $\pm 1^\circ$. Тогда, $L \approx 0,0006t$ (км).

Если аэрофотосъемка участка выполняется в разных масштабах и с разных высот, то размеры знаков следует рассчитывать по большей высоте, а расстояния между знаками — по более крупному масштабу.

Для определения количества маркированных и немаркированных маршрутов и порядка их чередования произведем расчет под условием, что при аэрофотосъемке переход с маркированного на немаркированный маршрут производится по рассчитанному углу крена.

В этом случае ошибка в поперечном перекрытии будет зависеть, во-первых, от разности ΔV между фактической величиной воздушной скорости на выраже $V_{\text{ф}}$ (12) и тем значением скорости $V_{\text{р}}$, по которой рассчитан угол крена самолета; во-вторых, от неточного выдерживания на выраже рассчитанного угла крена γ (13)

$$\Delta q_v = \pm 2(100 - q) \frac{\Delta v}{V_p}, \quad (12)$$

$$\Delta q_\gamma = \pm (100 - q) \frac{2 \Delta \gamma^\circ}{\rho^\circ \sin 2 \gamma^\circ}. \quad (13)$$

Приняв для средних условий крупномасштабных съемок $t = 1 : 7500$, $V_{\text{р}} = 200$ км/час; $\frac{\Delta V}{V_p} = 0,03$; $\Delta \gamma^\circ = 3^\circ$, получим $\Delta q_v = 4\%$, $\Delta q_\gamma = 3\%$.

Тогда, общая ошибка в поперечном перекрытии, зависящая от ошибок в скорости и угле крена, составит примерно $\pm 5\%$. Полагая эту ошибку случайной, определим количество немаркированных маршрутов, которые располагаются между маркированными, учитывая при этом и ошибку в перекрытии от поперечных колебаний самолета на маршруте,

$$\Delta q_{\text{доп}} = \Delta q_v \cdot \gamma \sqrt{n}, \quad (14)$$

где n — количество маршрутов.

$$\Delta q_{\text{доп}} = \pm \sqrt{Y_{\text{доп}}^2 - \Delta q_{\text{п}}^2} = \pm \sqrt{50} \quad (15)$$

или

$$n = \frac{\Delta q_{\text{доп}}^2}{\Delta q_{v, \gamma}^2} = \frac{50}{25} = 2,$$

то есть между маркированными маршрутами можно располагать два немаркированных. Причем при выполнении полета по немаркированному маршруту, экипаж производит контроль пути, привязываясь к знакам ближайшего к нему маркированного маршрута.

Наиболее тщательно следует маркировать первый (базисный) маршрут, на котором определяются и уточняются навигационные элементы, влияющие на качество аэросъемочных работ. Здесь желательно иметь расположенные последовательно с одной стороны два входных ориентира: первый — в 3—4 км от начала съемки, а второй — в 1,5—2 км, а также начальный, конечный и контрольные ориентиры. Другие маркированные маршруты могут быть обеспечены только одним входным ориентиром и меньшим количеством контрольных. При этом в результате инженерного изучения местности должна быть учтена возможность использования для самолетовождения и аэрофотосъемки большего количества естественных ориентиров и визирных точек, по створу которых можно осуществлять точное выдерживание аэросъемочных маршрутов.

Все указанные положения и практические предложения были проверены экспериментально сотрудниками кафедры аэрофотогеодезии Львовского политехнического института в 1965, 1967 и 1969 гг. Было выполнено десять аэрофотосъемок равнинной и всхолмленной местности в масштабах от 1:4000 до 1:20000, с высот от 400 до 3000 м, аэрофотоаппаратами с фокусными расстояниями 100, 140 и 350 мм.

Для маркировки входных ориентиров применялись знаки белого цвета в виде буквы «Т» и «стрелы». Начальные и контрольные ориентиры аэросъемки маркировались крестообразными знаками, окаймленными кольцом. Все эти знаки уверенно опознаются на лугу, пашне, среди кустарников и могут быть рекомендованы при маркировке маршрутов крупномасштабной аэросъемки.

Так как в положении таких знаков на местности допустимы сравнительно большие ошибки, при разбивке их на местности применялись приближенные промеры.

Опыт показал, что при аэросъемке необходимо иметь, кроме карты возможно более крупного масштаба, фотосхему или другой графический документ с нанесенными на нем в соответствующих местах изображениями знаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копылова А. Д. О научных основах установления размеров и формы картографических обозначений. — «Геодезия и картография», 1956, № 10.
2. Молоканов Г. Ф. Точность и надежность навигации летательных аппаратов. М., «Машиностроение», 1967.
3. Шершень А. И. Аэрофотосъемка. М., Геодезиздат, 1958.

Работа поступила в редколлегию 6 июля 1971 года. Рекомендована кафедрой аэрофотогеодезии Львовского ордена Ленина политехнического института.