

Математическая модель влияния атмосферной дымки на линейное разрешение на местности съемной системы, установленной на беспилотном летательном аппарате

А. И. Тищенко, email: aleksei.tishenko@yandex.ru

С.В. Беспалов, email: antonn58@ya.ru

ВУНЦ ВВС «ВВА»

***Аннотация.** В данной работе рассматривается математическая модель влияния яркости атмосферной дымки на линейное разрешение на местности съемной системы, установленной на беспилотном летательном аппарате.*

***Ключевые слова:** Математическая модель, разрешающая способность на местности, съемная система, беспилотный летательный аппарат, интегральный коэффициент яркости атмосферной дымки.*

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с оптико-электронной целевой нагрузкой находят широкое применение в различных сферах деятельности человека, связанных с охраной общественного порядка, лесов, с организацией безопасного движения на автодорогах, с эксплуатацией трубопроводов и так далее. Эффективность применения комплексов с БПЛА зависит как от тактико-технических характеристик БПЛА, возможностей полезной нагрузки наземных компонентов, так и от состояния атмосферы в период проведения аэрофотосъемки. Последний фактор признается повсеместно, но, к сожалению, практически является мало освещенным в количественном отношении.

Целью статьи является рассмотреть математическую модель количественной оценки влияния атмосферной дымки на линейное разрешение на местности съемной системы, установленной на БПЛА.

Для нахождения интересующей зависимости рассмотрим математические модели: оценки разрешающей способности на местности съемной системы L [1] и оценки спектрального коэффициента задымленности χ_λ [2]. Интеграция моделей позволит оценить влияние атмосферной дымки на линейное разрешение на местности съемной системы, установленной на БПЛА.

1. Математическая модель

Оценка линейного разрешения на местности съемной системы, установленной на БПЛА, выполняется на основе выражения (1) [1]:

$$L = \frac{H}{2 R_c f}, \quad (1)$$

где H – высота полета БПЛА, определяющая расстояние между объектом наблюдения и съемной системой, установленной на БПЛА, f – фокусное расстояние объектива съемной системы, R_c – разрешение съемной системы.

Для достижения поставленной цели рассмотрим R_c , как пространственную частоту N , при которой выполняется совместное решение двух уравнений – контраста оптического изображения в фокальной плоскости $K_\phi(N)$ и порогового контраста приемника излучения $K_n(N)$. Уравнения зависимостей $K_\phi(N)$ и $K_n(N)$ имеют вид:

$$K_\phi(N) = T(N) K_o, \quad (2)$$

$$K_n(N) = \frac{N}{2 R_{nu} - N}, \quad (3)$$

где $T(N)$ – функция передачи модуляции съемной системы, K_o – контраст объекта, R_{nu} – разрешающая способность приемника излучения.

Входящие в выражения (2), (3) $T(N)$, K_o , R_{nu} можно определить на основе соотношений (4) – (6).

$$T(N) = T_{атм} T_{об}(N) T_{сду}(N), \quad (4)$$

$$K_o = \frac{r_{об} - r_\phi}{r_{об} + r_\phi}, \quad (5)$$

$$R_{nu} = \frac{1}{2 p}, \quad (6)$$

где $T_{атм}$ – коэффициент модуляции, обусловленный влиянием слоя атмосферы между объектом наблюдения и съемной системой, установленной на БПЛА, $T_{об}(N)$ – функция передачи модуляции объектива съемной системы, $T_{сду}(N)$ – функция передачи модуляции

сдвига изображения, $r_{об}$, r_{ϕ} – интегральные коэффициенты яркости объекта съемки и фона ландшафта, p – размер пикселя приемника излучения.

В свою очередь оценку $T_{атм}$, $T_{об}(N)$, $T_{сду}(N)$ можно выполнить на основе уравнений вида:

$$T_{атм} = \frac{r_{об} + r_{\phi}}{r_{об} + r_{\phi} + 2\chi_{\lambda}}, \quad (7)$$

$$T_{об}(N) = \left(1 - \frac{4}{\pi} n_o \lambda N \right) \exp \left(- \frac{0.0035 f N t g^2 \beta}{n_o^2} \right) \quad (8)$$

$$T_{сду}(N) = \frac{\sin(\pi \delta N)}{\pi \delta N} \frac{\sin(\pi \delta N (1 - \eta))}{\pi \delta N (1 - \eta)}, \quad (9)$$

где n_o – знаменатель относительного отверстия объектива съемной системы, β – половина угла поля зрения объектива съемной системы, η – оптический коэффициент полезного действия затвора съемной системы.

Значение δ , входящего в выражение (9), определяется в соответствии с уравнением вида (10):

$$\delta = v t_{эк} \frac{f}{H}, \quad (10)$$

где v – скорость полета БПЛА, $t_{эк}$ – время экспонирования съемной системы.

Анализ выражений (1) – (10) показывает, что учет влияния атмосферной дымки на линейное разрешение на местности съемной системы можно осуществить на основе спектрального коэффициента задымленности χ_{λ} . Оценка этого коэффициента основывается на математических соотношениях, определяющих рассеяние энергии солнечного потока слоем атмосферы, расположенного над подстилающей поверхностью, отражающей по закону Ламбера [3].

Первоначально определяется оптическая толщина атмосферы на трассе «БПЛА съемная система – объект наблюдения» τ_{λ} обусловленная молекулярным $K_{м\lambda}$ и аэрозольным $K_{а\lambda}$ рассеянием излучения на длине волны λ , на основе выражений (11) – (13) [2]:

$$\tau_{\lambda} = \exp(-K_{м\lambda} - K_{а\lambda}), \quad (11)$$

$$K_{.M\lambda} = a_0 \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^4 D_H \left(1 - \frac{\exp(-\alpha H)}{\alpha H} \right), \quad (12)$$

$$K_{a\lambda} = \left[3,91 \frac{\left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^{0,585} \sqrt[3]{S_M}}{S_M} D_H \frac{(1 - \exp(-\beta_1 H))}{\beta_1 H} \right], \quad (13)$$

где a_0 , α – показатель молекулярного рассеяния на длине волны 0,55 коэффициент затухания, β_1 – коэффициент затухания излучения, обусловленного аэрозольным рассеянием, зависимость от метеорологической дальности видимости S_M имеет вид [2]:

$$\beta_1 = 0,2(6,658 - \ln S_M). \quad (14)$$

Затем следует определить полную оптическую толщину атмосферы $K_{0\lambda}$ в вертикальном направлении, с учетом молекулярного и аэрозольного рассеянием излучения [2]:

$$K_{0\lambda} = \frac{a_\lambda}{a} + 3,91 \frac{\left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^{0,585} \sqrt[3]{S_M}}{S_M} (1 + (10\beta_1 - 1) \exp(-5\beta_1)). \quad (15)$$

На основе полученных значений $K_{0\lambda}$ и значений угла ν_p между направлениями «объект наблюдения – Солнце» и «объект наблюдения – БПЛА съемная система», зависящего от координат БПЛА, объекта наблюдения, даты и времени наблюдения, определяются:

индикатриса рассеяния $x_{p\lambda}$, выражение (16) [2]:

$$x_{p\lambda} = \frac{0,75 \frac{\alpha_\lambda}{\alpha} (1 + \cos^2 \nu_p) + B_\lambda (10\beta_1 - 1) \exp(-5\beta_1) x_A}{K_{0\lambda}}, \quad (16)$$

где x_A – табулированный параметр, зависящий от ν_p и S_M , B_λ – величина, определяемая соотношением (17):

$$B_\lambda = 3,91 \frac{\left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^{0,585} \sqrt[3]{S_M}}{S_M}; \quad (17)$$

спектральный коэффициент пропускания атмосфера $\tau_{a\lambda}$ в направлении «объект наблюдения – Солнце» [2]

$$\tau_{a\lambda} = \exp \left(- \frac{K_{0\lambda}}{\sin H_c} \right), \quad (18)$$

где H_c – относительная высота Солнца.

По значениям $x_{p\lambda}$, $\tau_{a\lambda}$, τ_λ определяется спектральный коэффициент яркости дымки L_λ по выражениям вида [2]:

$$L_\lambda = x_p L_{1\lambda} + L_{2\lambda}, \quad (19)$$

$$L_{1\lambda} = \frac{(1 - \tau_\lambda \tau_{a\lambda}) \sin H_c}{4(\sin H_c + \cos \psi)}, \quad (20)$$

$$L_{2\lambda} = (C_\lambda - 3Q_\lambda \cos \psi)(1 - \tau_\lambda) + (3 - x_1) \times \quad (21)$$

$$Q_\lambda K_{0\lambda} \tau_\lambda + (x_1 \cos \psi \sin H_c - 3 \sin^2 H_c) L_{1\lambda},$$

$$Q_\lambda = \frac{(1 - A_\lambda) P_\lambda \sin H_c}{(8 - 2K_{0\lambda}(3 - x_1)(1 - A_\lambda))}, \quad (22)$$

$$P_\lambda = 1 + 1,5 \sin H_c + \tau_{a\lambda} (1 - 1,5 \sin H_c), \quad (23)$$

$$C_\lambda = 0,5(1 + 1,5 \sin H_c) \sin H_c - 2Q_\lambda, \quad (24)$$

где ψ – угол визирования объекта наблюдения из точки расположения «БпЛА съемная система», x_1 – табулированный параметр индикатрисы рассеяния, зависящий от s_m , A_λ – спектральное значение альbedo подстилающей поверхности.

В результате χ_λ можно определить на основе выражения (25) [2]:

$$\chi_\lambda = (1 - A_\lambda) L_\lambda \frac{1 - \exp(-0,13 H)}{4Q_\lambda \tau_\lambda K_{обл}}, \quad (25)$$

где $K_{обл}$ – табулированный коэффициент облачности, зависящий от характеристик облачности и высоты Солнца.

Учет (25) в (7) позволит оценить влияние атмосферной дымки на величину линейного разрешения на местности съемной системы, установленной на БпЛА.

2. Апробация модели

Апробация представленной модели осуществлена по результатам экспериментальной оценки линейного разрешения на местности

цифровой камеры EXMOR, установленной на БПЛА Phantom-4. Для этого изготовлена радиальная тридцатишести секторная тест-мира, осуществлена ее серийная (30 снимков) съемка с высоты 100 метров в метеорологических условиях – малооблачно, дымка видимость 4 километра. В результате статистической обработки результатов эксперимента получено: оценка среднего значения линейного разрешения на местности цифровой камеры составила 42 мм.

Расчетное значение линейного разрешения на местности цифровой камеры EXMOR, применительно к указанным выше условиям, составило 36 мм.

Относительная погрешность расчетной оценки линейного разрешения на местности съемной системы, установленной на БПЛА, по отношению к экспериментальной оценке не превышает 15%.

Заключение

Таким образом, на основе выполненной работы и полученным результатам можно сделать следующие выводы.

1. Представленная математическая модель учета влияния атмосферной дымки на линейное разрешение на местности съемной системы, установленной на БПЛА, построенная на основе математических моделей оценки разрешающей способности на местности съемной системы и оценки спектрального коэффициента задымленности, показала удовлетворительные результаты. Относительная погрешность расчетной оценки линейного разрешения на местности съемной системы, установленной на БПЛА, по отношению к экспериментальной оценке не превышает 15%.

2. Математическая модель может быть использована для решения задач связанных с выбором эффективной высоты полета БПЛА на аэро-видеосъемку объектов наблюдения, в зависимости от линейных размеров, технических характеристик БПЛА, съемной системы и метеорологической дальности видимости в районе мониторинга.

3. Математическая модель может быть реализована в пакете прикладных программ поддержки принятия решения, предназначенных операторам БПЛА и руководителей подразделений БПЛА.

Список литературы

1. Алтыпов А.Е. Расчет пространственного разрешения съемной системы / А.Е. Алтыпов, М.Н. Севостьянова, С.А. Серебрянский. – М.: МИИГАиК, 2019. – 26 с.

2. Верба В.С. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами / В.С. Верба, Б.Г. Татарский – В 2-х книгах. – М.: Радиотехника, 2016. – 1325 с.

3. Атмосфера. Справочник / Ю.С. Седунов [и др] ; отв. Ред Ю. С. Седунов – Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. – 510 с.