

УДК 53.072; 681.3

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКА

А.В. Демин, К.В. Константинов

В статье предложен метод имитационного моделирования оптико-электронного комплекса для измерения высоты нижней границы облаков способом просмотра активностей. Разработана и апробирована имитационная модель измерения высоты нижней границы облаков.

**Ключевые слова:** имитационная модель, высота нижней границы облаков.

### Введение

Одним из важных режимов обеспечения безопасности полетов является обеспечение безаварийной посадки летательных аппаратов (ЛА) на аэродром, которая, помимо технического состояния ЛА, определяется метеорологической обстановкой в зоне посадки ( $МО_{Ар}$ ). Контроль за  $МО_{Ар}$  обеспечивается аэродромным оборудованием, важным компонентом которого является система измерения высоты нижней границы облаков (НГО) в зоне посадки. Качество и достоверность работы измерительного комплекса (ИК) во многом определяется выбранной моделью облака и, в частности, моделью НГО. Процесс измерения высоты НГО может быть представлен в виде следующей последовательности: ИК $\Rightarrow$ атмосфера $\Rightarrow$ НГО $\Rightarrow$ атмосфера $\Rightarrow$ ИК.

Наряду с известными методами определения высоты НГО, наиболее объективным является ИК, выполненный как оптико-электронный комплекс (ОЭК<sub>НГО</sub>).

### Постановка задачи

Представление процесса измерения высоты НГО математической моделью является одним из важных моментов как при проектировании, так и при последующей эксплуатации ОЭК<sub>НГО</sub>. Целью настоящей статьи является построение имитационной модели процесса измерения высоты НГО «атмосфера $\Rightarrow$ НГО $\Rightarrow$ атмосфера» для оценки ожидаемых показателей работы ОЭК<sub>НГО</sub> в процессе проектирования и их корректировки при эксплуатации. На рис. 1 представлена структурная схема ОЭК<sub>НГО</sub>, оптическая схема которого выполнена по коаксиальной схеме, т.е. объектив излучателя и объектив приемной системы выполнены как общий для обоих каналов. Лазерный излучатель с  $\lambda=0,9$  мкм имеет дополнительную оптическую систему для изменения угловой расходимости и систему модуляции излучения. Перед фотоприемным устройством (ФПУ) установлен интерференционный фильтр с  $\lambda=(0,9\pm 0,05)$  мкм, тем самым обеспечивается минимизация воздействия на ФПУ постороннего излучения. Контроллер выполняет функцию программного управления комплексом в соответствии с математической моделью функционирования ОЭК<sub>НГО</sub> в параметрической или аналитической форме. Блок обработки данных выполняет функцию расчета высоты НГО.

### Метод моделирования

Из всех известных методов моделирования был выбран метод имитационного моделирования, основанный на моделировании непосредственно алгоритмами функционирования подсистем моделируемой системы, или имитационное моделирование системы способом просмотра активностей его подсистем (ИМ<sub>АК</sub>). Метод позволяет реализовать моделирование любой системы, особенностью которой является то, что функциональные действия каждой из ее подсистем различны, причем для выполнения дей-

ствий каждой из них требуется выполнение своих условий и ограничений. Эти условия и ограничения, как правило, известны и могут быть представлены в одной из форм, приемлемой для моделирования и реализации их в контроллере.



Рис. 1. Структурная схема оптико-электронного измерительного комплекса высоты нижней границы облака

На рис. 2 представлена имитационная модель измерения высоты нижней границы (ИМ<sub>НГО</sub>) в виде активируемых блоков, где приняты следующие символичные и функциональные обозначения:  $АБ_1$  – модель измерителя;  $АБ_2$  – модель атмосферы между НГО и ОЭЖ<sub>НГО</sub>, а именно, модельное или параметрическое представление (метеосводка, географическое место проведения ИМ ОЭЖ<sub>НГО</sub>, время суток, месяц, год, высота светила);  $АБ_3$  – модель помехи и возмущения, а именно, описание влияния атмосферы и приемопередающей аппаратуры на оптический сигнал ОЭЖ<sub>НГО</sub>;  $АБ_4$  – модель НГО.

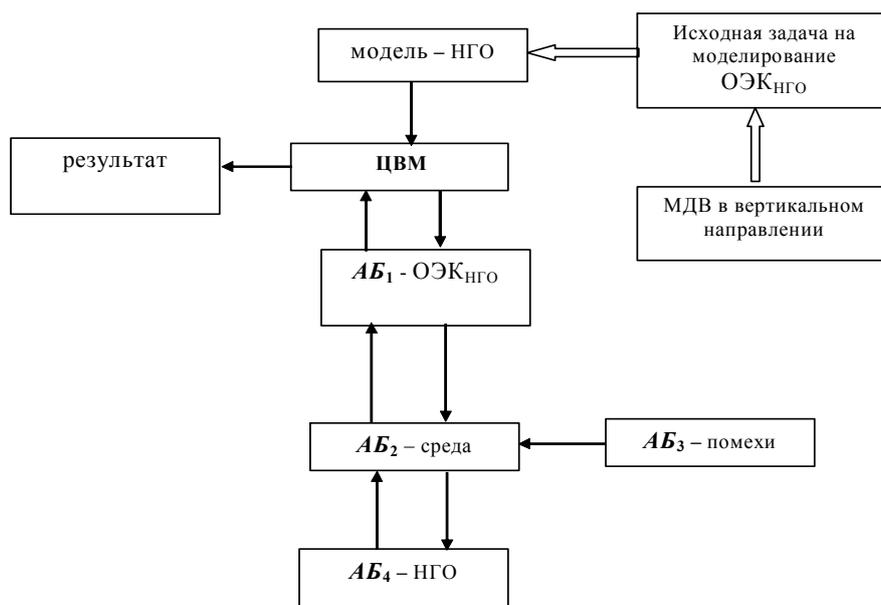


Рис. 2. Имитационная модель измерения высоты нижней границы облаков

Особенностью ИМ<sub>АК</sub> является то, что все функциональные действия подсистем могут быть синхронизированы и рассмотрены в процессе моделирования независимо друг от друга и в реальном масштабе времени [1].

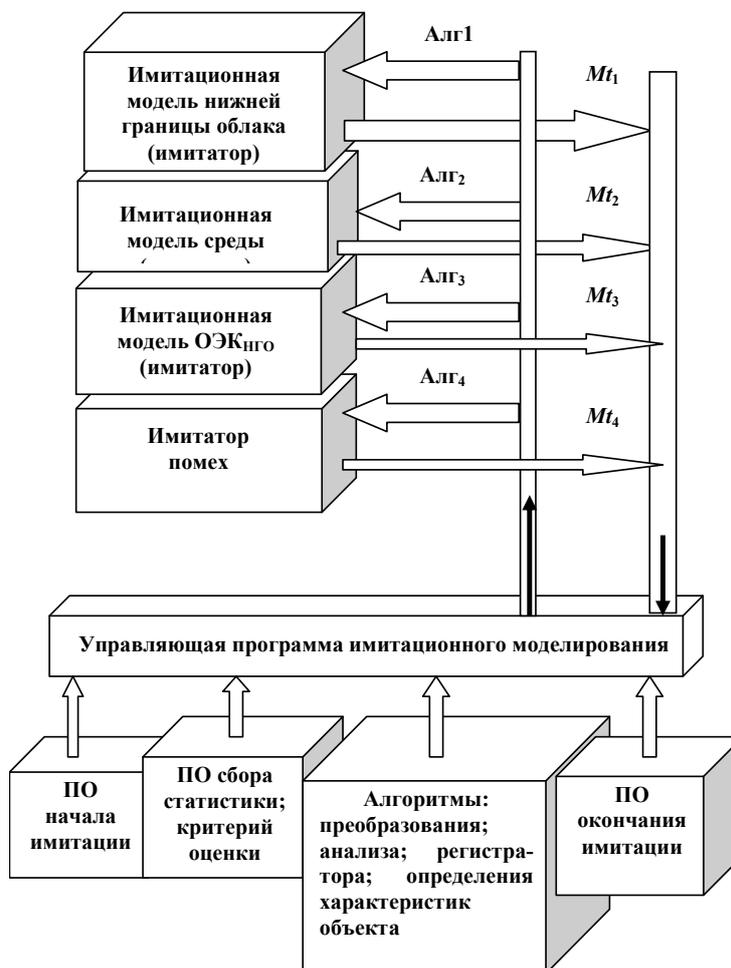


Рис. 3. Блок-схема имитационного моделирования опико-электронного комплекса измерения высоты нижней границы облака способом просмотра активностей

В соответствии с ИМ<sub>НГО</sub> на рис. 3 представлена блок схема имитационного моделирования ОЭЖНГО, где приняты обозначения:  $M_t$  – модельное время имитируемого блока; Алг – алгоритм имитации (математическая модель) имитируемого блока; ПО – программное обеспечение имитационного моделирования по принятым аналитическим соотношениям. Начало имитации обусловлено установкой значений начальных состояний компонентов модели. Проверка выполнимости условия инициализации активностей выполняется либо путем определения параметров модели, либо путем вычисления момента активизации блока или параметров модели, либо путем вычисления момента активизации блока. Поскольку все функциональные действия в подсистемах ИМ<sub>ИУС</sub> происходят независимо друг от друга, то и модельное время  $M_t$  для каждого АБ<sub>*i*</sub> разное.

### Построение математической модели тракта «атмосфера⇒НГО⇒атмосфера»

Предполагаем, что функционирование ОЭЖНГО можно описать линейным оператором. Рассмотрим основы для построения математической модели тракта «атмосфера⇒НГО⇒атмосфера» как наиболее важного звена в общей модели процесса измерения НГО при определении параметров комплекса.

Известно, что совокупность атмосферных аэрозолей следует рассматривать как систему твердых или жидких дисперсных частиц в воздухе, размеры которых в зависимости от высоты и температуры в месте их локализации возможны в пределах  $10^{-3}$ – $10^2$  мкм. Совокупность атмосферных аэрозолей можно классифицировать на характерные типы – облака, туманы, дымки, осадки, ядра конденсации. При этом аэрозоль – одна из наиболее оптически активных и наименее изученных составляющих атмосферы – присутствует практически на всех высотах [2].

Выделяются следующие источники аэрозоля в атмосфере:

- морская, океаническая и земная поверхность;
- вторичная генерация в атмосфере за счет фотохимических реакций;
- продукты индустриальной и хозяйственной деятельности;
- продукты вулканической деятельности (газ, пыль), дым лесных пожаров;
- космическая пыль и продукты сгорания метеоров.

Облака бывают капельножидкими и кристаллическими. Капельножидкие облака состоят из сферических частиц, кристаллические облака имеют частицы неправильной формы – кристаллики льда.

Основные процессы, регулирующие распределения аэрозоля в атмосфере:

- турбулентная диффузия и конвективный перенос аэрозольных частиц;
- синоптические факторы – циклонные факторы, температурные инверсии, осадки;
- микромасштабные процессы – коагуляция, седиментация, абсорбция водяного пара.

Решить задачу о вертикальном распределении аэрозольных частиц в атмосфере можно, только зная источники и процессы, регулирующих их эволюцию.

Одним из факторов обеспечения безопасности при взлете–посадке является высота НГО, которые формируются из атмосферных аэрозолей размером от 0,5 мкм до 10 мкм [3]. Возможно следующее представление моделей НГО [3]:

- моделирование оптических свойств атмосферы путем задания моделей микроструктуры атмосферных аэрозолей;
- в соответствии с теорией Ми.
- представление НГО как объекта, обладающего определенными оптическими и микрофизическими свойствами.

Учитывая, что облака представимы набором атмосферных аэрозолей в форме сферических частиц, построение модели НГО, под которой будем понимать упорядоченный по высоте и спектру частот числовой массив объемных коэффициентов взаимодействия и компонент матрицы рассеяния, невозможно осуществить без достоверной количественной информации о микрофизических свойствах ансамбля аэрозольных частиц, статистически обоснованного для заданной геофизической ситуации.

Концентрация и функция распределения аэрозольных частиц по размерам, форме частиц и их химическому составу, как правило, известны на основе экспериментальных измерений. Опираясь на экспериментальные данные по аэрозолям, модель НГО можно представить в виде целочисленной модели:

$$N_{обл} = \left[ K_{\sigma} \times K_{\alpha} \times \left( \frac{\pi \times r^2 \times h}{V_{\text{аэр}}} \right) \right] + 1, \quad (1)$$

где  $N_{обл}$  – число аэрозолей в НГО, необходимое для регистрации в ОЭЖ<sub>НГО</sub>;  $r$  – радиус светового пучка на высоте  $H$  (радиус облучаемого участка облака);  $K_{\sigma}$  – коэффициент, определяющий рассеяние излучения в НГО;  $K_{\alpha}$  – коэффициент, определяющий ослабление излучения по трассе;  $V_{\text{аэр}}$  – объем аэрозоля;  $h$  – глубина облачного слоя.

Поскольку для регистрации высоты НГО в измерителе необходимо выдерживать определенное отношение сигнал/шум при заданной мощности и расходимости излу-

ния, то в зависимости от концентрации аэрозолей в облаке глубина облачного слоя, а также рассеяние и ослабление излучения могут быть различны. Тем самым возникает неопределенность в определении высоты НГО, которая может уменьшаться двумя путями – либо повышением мощности излучения, либо изменением размера зоны облученности. Безусловно, разумное сочетание мощности и размера зоны облучения, а также учет возможного значения коэффициентов рассеяния и ослабления определяют некий оптимум параметров ОЭК<sub>НГО</sub>.

Не умаляя общности, определим коэффициент рассеяния излучения из условия, что НГО может быть представлена как совокупность аэрозолей сферической формы. Тогда, согласно теории рассеяния электромагнитных волн аэрозольными частицами, для частиц сферической формы выражение для объемного коэффициента рассеяния имеет вид

$$\sigma(\lambda) = N \int_0^{\infty} \pi r^2 \cdot K_p(r, m, \lambda) f(r) dr, \quad (2)$$

где  $N$  – число аэрозольных частиц в единице объема;  $K_p(r, m, \lambda)$  – фактор эффективного рассеяния излучения с длиной волны  $\lambda$  на частице радиусом  $r$ , имеющей комплексный показатель преломления  $m$ ;  $f(r)$  – функция распределения аэрозольных частиц по размерам.

Представим соотношение (2) в следующем виде:

$$K_{\sigma} = N(h) \times \left( \frac{d_{\text{аэр}}}{d_{\text{л}}} \left[ +1 \right] \right), \quad (3)$$

где  $d_{\text{аэр}}$  – среднее значение диаметра аэрозольной частицы;  $d_{\text{л}}$  – диаметр пучка отраженных от частицы лучей, возвращающихся в ОЭК<sub>НГО</sub> (не более  $0,25 d_{\text{аэр}}$ );  $N(h)$  – количество частиц аэрозоля в НГО в зависимости от высоты (рассчитанное из экспериментальных данных).

Под коэффициентом аэрозольного ослабления понимается величина  $\alpha_a(\lambda)$ , зависящая от длины волны  $\lambda$  и определяемая из закона Бугера в дифференциальной форме. В этой связи коэффициент аэрозольного ослабления примем равным баллу видимости в вертикальном направлении на момент измерения высоты НГО.

Излучение на выходе ОЭК<sub>НГО</sub> также представим в виде набора дискретных лучей, предельное значение которого будет равно

$$\max \{ N_{\text{изл}} \} = \left[ \frac{(D_{\text{вых.зр.}})^2}{(\lambda)^2} \right] + 1, \quad (4)$$

где  $D_{\text{вых.зр.}}$  – диаметр выходного зрачка объектива ОЭК<sub>НГО</sub>. Для обеспечения необходимого отношения сигнал/шум  $\eta$  число «единичных лучей» требуемой мощности ( $W_{\text{у.е.}}$  – отношение мощности вышедшего излучения к минимальной мощности, определяемой приемником) может быть определено следующим выражением:

$$N_{\text{изл}W} = \eta \times \left( \left[ \frac{K_{\sigma} \times K_{\alpha}^{-1} \times (\pi \times r^2) \times d_{\text{аэр}}}{V_{\text{аэр}}} \right] + 1 \right) \times W_{\text{у.е.}}, \quad (5)$$

где  $K_{\alpha}$  – коэффициент аэрозольного ослабления.

В соответствии с соотношением (4) значение  $D_{\text{вых.зр.}}$  как оценка будет определяться выражением

$$D_{\text{вых.зр.}} = \left| \lambda \times \sqrt{N_{\text{изл}W}} \right|. \quad (6)$$

Таким образом, из соотношения (6) получаем диаметр выходного зрачка  $D_{\text{вых.зр.}}$ . Однако, как следует из соотношений (3), (5), этот диаметр зависит от числа аэрозолей в момент измерения, т.е. от метеоусловий (типа оптической погоды). Поэтому расчет  $D_{\text{вых.зр.}}$  производится по средним условиям, а нужное количество излучаемых лучей  $N_{\text{изл}}$  обеспечивается с помощью подбора числа зондирований. В дальнейших исследованиях будет представлена целочисленная модель излучающей и приемной части оптико-электронного комплекса измерителя высоты нижней границы облаков.

### Заключение

Предложен метод имитационного моделирования способом просмотра активностей. Разработана целочисленная модель «атмосфера $\Rightarrow$ НГО $\Rightarrow$ атмосфера», на основании которой получены соотношения для определения параметров оптико-электронного комплекса в общей модели процесса измерения высоты НГО.

### Литература

1. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. – СПб: Гидрометеоздат, 1992.
3. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). – М.: Сов. радио, 1977.

*Демин Анатолий Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, dav\_60@mail.ru

*Константинов Константин Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, const\_cv@mail.ru