УДК 629.13

В. В. ЩЕРБИНИН, Е. В. ШЕВЦОВА, Ю. С. ВАСИЛЬЕВА, О. М. ЧИЖЕВСКАЯ

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦВЕТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Современные высокоточные системы навигации летательных аппаратов базируются на комплексировании инерциальных навигационных систем с системами коррекции. Одним из видов систем коррекции является цветная оптическая корреляционно-экстремальная система навигации.

Статья посвящена разработке алгоритма учета состояния атмосферы в момент получения цветных фотоснимков для формирования эталонного изображения (ЭИ) и алгоритма синтеза ЭИ одного сезона по имеющимся цветным фотоснимкам другого для цветной оптической корреляционно-экстремальной системы навигации.

Введение

Современные высокоточные системы навигации летательных аппаратов (ЛА) базируются на комплексировании инерциальных навигационных систем (ИНС) с системами спутниковой коррекции или с системами навигации по геофизическим полям (ГФП) Земли (корреляционно-экстремальными системами) [1]. Использование для коррекции ИНС спутниковых навигационных систем – достаточно простой и эффективный способ. Однако он имеет ряд недостатков, заключающихся в низкой помехоустойчивости систем коррекции и неавтономности функционирования комплексированной навигационной системы. Этих недостатков лишены корреляционно-экстремальные системы [2], осуществляющие периодическое определение местоположения ЛА в местной системе координат путем сравнения эталонного изображения (ЭИ), которое сформировано заранее по исходной видеоинформации (например, аэро- или космический фотоснимок), с текущим изображением (ТИ), формируемым в полете ЛА. В этом заключается большое преимущество системы навигации по ГФП – они вычисляют местоположение ЛА относительно реальной поверхности Земли, а не относительно ее математической модели, которая используется в инерциальных и спутниковых системах навигации.

Перспективным направлением развития оптических корреляционно-экстремальных систем навигации (КЭСН) горизонтально летящего ЛА является использование спектральных отражательных характеристик местности для формирования эталонного и текущего изображений местности. Одной из форм использования спектральных отражательных характеристик местности является

Щербинин Виктор Викторович. Доктор технических наук, начальник научно-технического направления ОАО «ЦНИИАГ» (Москва). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Шевцова Екатерина Викторовна. Кандидат технических наук, доцент МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Васильева Юлия Сергеевна. Инженер ОАО «ЦНИИАГ».

Чижевская Оксана Михайловна. Инженер ОАО «ЦНИИАГ».

формирование цветных изображений с применением аддитивной цветовой модели RGB (традиционная и широко распространенная форма цветной фотографии). В этом случае [3] цветные (RGB) текущие изображения формируются на борту ЛА с помощью бортовой цветной видеокамеры, а в качестве изображений, предназначенных для формирования ЭИ, используются цветные (RGB) фотоснимки, полученные с помощью космической или аэрофотоаппаратуры. Тогда соответствие ТИ для *k*-й зоны коррекции определенному участку ЭИ той же зоны коррекции устанавливают по экстремуму функционала, связывающего информативные параметры изображений

$$R\left(\Delta_x,\Delta_y\right)=\sum_i\sum_j\left(\overline{e}_{(i+\Delta_x)(j+\Delta_y)}*\overline{t}_{ij}\right), \qquad (1)$$

где $\left(\Delta_x,\Delta_y\right)$ – координаты верхнего левого угла ТИ; $\overline{e}_{(i+\Delta_x)(j+\Delta_y)}$ – значение информативного параметра $\left(i+\Delta_x\right)\left(j+\Delta_y\right)$-го пикселя ЭИ; $\overline{t}_{ij}$ – значение информативного параметра ij -го пикселя ТИ.

Информативный параметр (ИП) цветной оптической КЭСН, синтезированный в соответствии с методологией [4] и являющийся инвариантным к суточным изменениям местности – уровню освещенности, спектральному составу падающей радиации и состоянию подстилающей поверхности,– представляет собой трехкомпонентный вектор [3]

$$\left(r_н,g_н,b_н\right)=\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{r}{r_0}\right)^2+\left(\frac{g}{g_0}\right)^2+\left(\frac{b}{b_0}\right)^2}}\left(\frac{r}{r_0},\frac{g}{g_0},\frac{b}{b_0}\right). \qquad (2)$$

Здесь r,g,b – компоненты вектора $\left(r,g,b\right)$ изображения поверхности (где *r* – *Red*-цветовая координата модели (системы) *RGB*, *g* – *Green*-цветовая координата модели *RGB*, *b* – *Blue*-цветовая координата модели *RGB*); r_0,g_0,b_0 – компоненты вектора изображения некоторого эталонного отражателя (например, лист белой бумаги); $r_н,g_н,b_н$ – нормированные компоненты вектора.

Теоретические исследования и результаты математического моделирования показывают, что использование КЭСН данного типа для навигации ЛА позволяет уменьшить (по сравнению с черно-белой оптической КЭСН) размеры текущего изображения при сохранении заданных точностных характеристик определения местоположения ЛА; идентифицировать на ТИ площадные помехи (облачность, туманы и др.) и исключить их из корреляционного сравнения эталонного и текущего изображений; синтезировать эталонные изображения одного сезона по фотоснимкам местности другого сезона.

Однако для реализации данных преимуществ цветной оптической КЭСН необходимо учитывать влияние атмосферы на формирования изображений в различных каналах (*R, G, B*). Алгоритм формирования корректирующих коэффициентов, зависящих от коэффициентов прозрачности атмосферы и яркости воздушной дымки, предложен в работе [3].

Задачи исследований

Задачами настоящих исследований являются проверка работоспособности предложенного алгоритма учета влияния атмосферы; сравнительная оценка минимальных длин ТИ для цветной и черно-белой оптической КЭСН; проверка метода и алгоритмов синтеза ЭИ одного сезона по фотоснимку другого сезона.

Аналитические оценки в теории корреляционно-экстремальных систем были получены в 1960–1970 гг. для стационарных случайных полей и моделей возмущений типа «белый шум». Так как оптические ГФП представляют собой нестационарные неэргодические случайные поля и нет математических моделей, описывающих их реальные возмущения [4], то основным методом оценки характеристик оптических КЭСН в настоящее время является имитационное моделирование по банкам фотоснимков реальных местностей. Поэтому были проведены исследования для двух разнотипных местностей, моделирующие процессы получения исходных аэрофотоснимков, необходимых для подготовки ЭИ, и формирования ТИ с помощью макета КЭСН.

Эксперименты для получения исходных видеоизображений

Летные испытания проводились в окрестностях аэродрома «Сельцо» Ленинградской области и г. Таганрога (типы ландшафта соответственно – тайга с примесью широколиственных пород и черноземная степь (по классификации Л.С.Берга, 1913); степной и широколиственно-лесной (по классификации А.Г.Исаченко, 1991) [5]). Исходные видеоизображения для подготовки ЭИ были сформированы из серии высотных фотоснимков, а исходные видеоизображения для подготовки ТИ – из серии фотоснимков местности, полученных при проведении летных испытаний макета цветной оптической КЭСН на высотах 250…350 м. Характеристики исходных видеоизображений приведены в табл. 1 и 2. На рис. 1, 2 непосредственно представлены исходные видеоизображения для подготовки ЭИ и ТИ.

Таблица 1

Характеристики видеоизображений для подготовки ЭИ		
Номер варианта	1	2
Район съемки	Район г. Таганрог	аэродром «Сельцо» Ленинградской обл.
Дата съемки	23 июля 2010 г.	12 мая 2010 г.
Высота съемки, м	450	2000
Пространственное разрешение фотоснимка, м/пиксел	1,4	2,1
Размеры видеоизображений, м	810,6 × 1327,2	1877,4 × 3227,7
Номер рисунка	рис. 1, *а*	рис. 1, *б*

а) *б)*

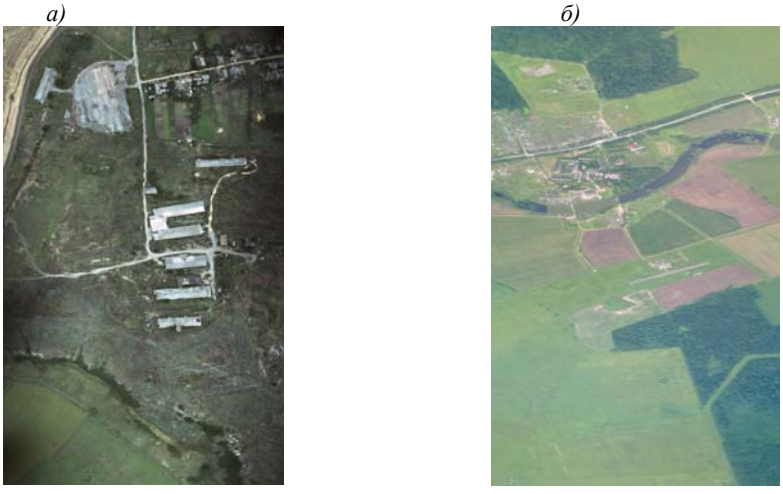


Рис. 1. Исходные видеоизображения для подготовки ЭИ:
а – район г. Таганрог, *б* – район аэродрома «Сельцо» Ленинградской обл.

Таблица 2

Характеристики видеоизображений для подготовки ТИ		
Номер варианта	1	2
Район съемки	район Таганрога	аэродром «Сельцо» Ленинградской обл.
Дата съемки	23 июля 2010 г.	12 мая 2010 г.
Высота съемки, м	350	250
Пространственное разрешение фотоснимка, м/пиксел	1,4	2,1
Размеры видеоизображений, м	368,2 × 1052,8	270,9 × 747,6
Номер рисунка	рис. 2, *а*	рис. 2, *б*

а) *б)*

Рис. 2. Исходные видеоизображения для подготовки ТИ:
а – район г. Таганрога, *б* – район аэродрома «Сельцо» Ленинградской обл.

На ЭИ была введена локальная система координат *OXY* с началом отсчета в верхнем левом углу. Положение текущего изображения относительно ЭИ при поиске экстремума функционала (1) определялось координатами верхнего левого угла ТИ. Варьируемым параметром являлось соотношение длины $l_{\text{ти}}$ к длине эталонного изображения при фиксированном соотношении их поперечных размеров.

Ошибка определения координат ТИ вычислялась по формуле

$$\Delta = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2}\,, \qquad (3)$$

где δx – ошибка определения координат ТИ по оси *OX*; δy – ошибка определения координат ТИ по оси *OY*.

Предварительно была проведена привязка ТИ к ЭИ (включающая поворот и изменение масштаба изображений). Это позволило оценить уровень геометри-

ческих искажений (среднеквадратическое отклонение), который составил ~ 10 м для исходных видеоизображений района г. Таганрога и около 4 м для исходных видеоизображений района аэродрома «Сельцо» Ленинградской обл.

При оценке точностных характеристик КЭСН в дальнейшем принято, что $r_0 \approx g_0 \approx b_0$, так как время получения фотоснимков для формирования ЭИ и ТИ в каждой местности мало различалось и было близко к полудню. Поэтому формула (2) приобрела вид

$$(r_н, g_н, b_н) = \frac{1}{\sqrt{r^2 + g^2 + b^2}}(r, g, b). \quad (4)$$

Оценка влияния состояния атмосферы на точность определения местоположения ЛА с помощью КЭСН

Влияние состояние атмосферы при съемке кадров для ЭИ и ТИ на точность определения местоположения ЛА с помощью КЭСН заметно по результатам обработки экспериментальных данных. Оценки, проведенные по формуле (1), показали, что ошибки определения координат для видеоизображений *варианта 1* принимали значения не более нескольких метров, а для *варианта 2* – превысили несколько сот метров.

Для оценки влияния каждого канала *R, G* и *B* на точность определения координат был проведен анализ функционирования КЭСН по каждому из каналов по формуле

$$R'(\Delta_x, \Delta_y) = \sum_i \sum_j \left| e_{(i+\Delta_x)(j+\Delta_y)} - t_{ij} \right|, \quad (5)$$

где (Δ_x, Δ_y) – координаты верхнего левого угла ТИ; $e_{(i+\Delta_x)(j+\Delta_y)}$ – значение скалярного информативного параметра $(i+\Delta_x)(j+\Delta_y)$-го пикселя ЭИ ($r_{(i+\Delta_x)(j+\Delta_y)}$ или $g_{(i+\Delta_x)(j+\Delta_y)}$, или $b_{(i+\Delta_x)(j+\Delta_y)}$); t_{ij} – значение скалярного информативного параметра ij-го пикселя ТИ (соответственно r_{ij} или g_{ij}, или b_{ij}).

Ниже (рис. 3) приведены графики ошибок определения координат по каждому из каналов при использовании ЭИ и ТИ из *вариантов 1* или *2*.

а) *б)*

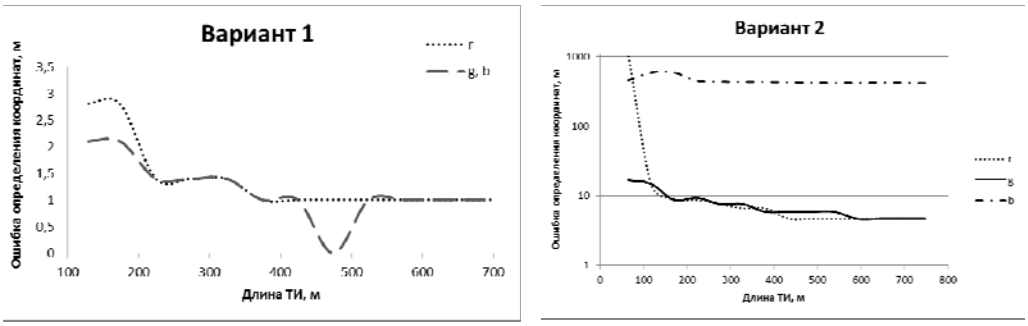


Рис. 3. Зависимость ошибки определения координат от длины ТИ для каналов *R*, *G*, *B*:
а) район г. Таганрога; *б*) район аэродрома «Сельцо» Ленинградской обл.

Видно, что для *варианта 1* ошибка определения координат по каждому из каналов *R*, *G* и *B* не превышает 3 м для $l_{\text{ТИ}} > 150$ м , что меньше уровня геометрических искажений. Заметим, что фотоснимки для подготовки ЭИ были получены на высоте 450 м; для подготовки ТИ – на высоте 350 м.

Для *варианта 2* ошибки определения координат по каналам *R* и *G* не превышают 10 м практически для всех длин ТИ. Однако по каналу *B* даже при максимальной длине ТИ ошибки достигают 400 м. Это объясняется большой разностью высот получения фотоснимков для формирования ЭИ и ТИ. Фотоснимки для подготовки ЭИ были получены на высоте 2000 м; для подготовки ТИ – на высоте 250 м. Для сравнения, разница высот получения фотоснимков для подготовки ЭИ и ТИ *варианта 1* составила 100 м.

Сильные искажения по каналу *B* объясняются следующим образом. При прохождении солнечной радиации через атмосферу её спектральный состав претерпевает изменения. Яркость точки фотоизображения объекта представляет собой сумму яркости воздушной дымки и истинной яркости объекта, взятой с коэффициентом прозрачности атмосферы [6]:

$$B' = B \cdot T_z + B_{\text{д}}, \tag{6}$$

где B' – яркость точки фотоизображения объекта; B – истинная яркость точки объекта; T_z – прозрачность атмосферы, безразмерный коэффициент; $B_{\text{д}}$ – яркость воздушной дымки, Вт/м^2·мкм·стер.

Прозрачность атмосферы T_z – величина, обратно пропорциональная оптической толщине τ_λ атмосферы для длины волны λ [6]

$$\tau_\lambda = \tau_{\text{м}\,0{,}55}\left(\frac{0{,}55}{\lambda}\right)^4 + \tau_{a\,0{,}55}\left(\frac{0{,}55}{\lambda}\right) \tag{7}$$

Здесь τ_λ – оптическая толщина атмосферы для длины волны λ, мкм; $\tau_{\text{м}\,0{,}55}$ и $\tau_{\text{а}\,0{,}55}$ – молекулярная и аэрозольная толщина атмосферы для опорной длины волны $\lambda = 0{,}55$ мкм.

Из формулы (7) видно, что оптическая толщина атмосферы максимальна для синей части спектра.

Кроме того, именно в этой части спектра оказывает наибольшее влияние воздушная дымка. Различают дымку первого рода (молекулярную), возникающую из-за рассеяния излучения на молекулах газов, входящих в состав воздуха. Эту дымку называют «голубой», потому что она принимает наибольшее значение для коротковолнового излучения. Дымка второго рода (аэрозольная) в равной степени рассеивает все видимые лучи. Зависимость яркости дымки от длины волны приведена на рис. 4.

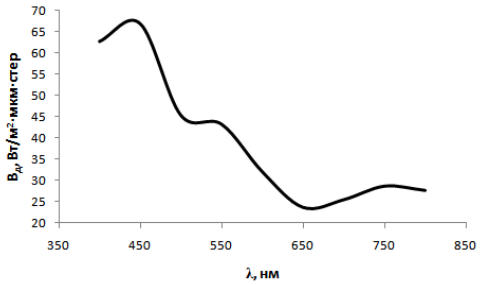


Рис. 4. Зависимость яркости дымки от длины волны

Для расчета корректирующих коэффициентов, учитывающих влияние атмосферы, использовался алгоритм вычислений [3], в который в качестве исходных данных входят следующие параметры:

- визуальная оценка прозрачности атмосферы и видимости;
- время полета или зенитное расстояние Солнца $Z_{\odot}$;
- высота полета над поверхностью Земли.

При этом коэффициенты, учитывающие влияния дымки по каждому из каналов *R, G* и *B,* рассчитываются как результат свертки функции $B_{д}(\lambda)$ и соответствующей весовой функции стандартного пространства RGB (табл. 3)

$$\begin{cases} T_R = \mathbf{f_R} * \mathbf{B_н} \\ T_G = \mathbf{f_G} * \mathbf{B_н} \\ T_B = \mathbf{f_B} * \mathbf{B_н} \end{cases}, \tag{8}$$

где $\mathbf{B}_{\text{н}} = \dfrac{\mathbf{B}}{\max(B)}$.

Таблица 3

Весовые функции стандартного пространства RGB			
λ, нм	$f_R(\lambda)$	$f_G(\lambda)$	$f_B(\lambda)$
380	0.002	-0.0013	0.0084
390	0.004	-0.0036	0.0261
400	0.0129	-0.0122	0.0876
450	0.1587	-0.2157	2.2759
470	-0.1674	-0.086	1.6324
500	-0.6703	0.7303	0.2590
520	-0.9892	1.5189	0.0888
530	-0.8063	1.739	0.0457
550	-0.0747	0.6535	-0.2252
600	2.8193	0.1839	-0.0852
630	1.8918	-0.1407	-0.0214
650	0.8542	-0.0323	0.0063
700	0.0347	-0.004	0.0002
730	0.0051	-0.0016	0.00004
750	0.0000	-0.00008	0.0000

Ошибки определения координат до и после учета влияния атмосферы для *варианта 2* представлены на рис. 5.

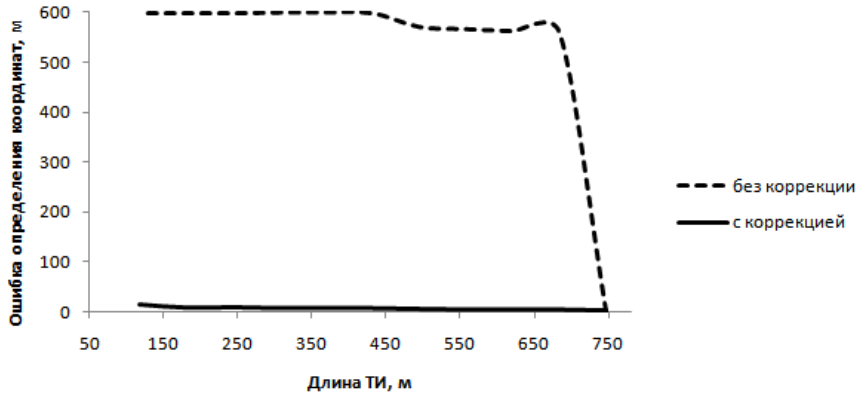


Рис. 5. Зависимость ошибки определения координат от длины ТИ до и после учета влияния атмосферы (вариант *2* - район аэродрома «Сельцо» Ленинградской обл.)

Ошибка определения координат после учета влияния атмосферы не превышает 10 м для всех длин ТИ более 150 м. При длине ТИ, равной 118 м, ошибка составляет 15 м. Ошибки определения координат по каналу *B* в этом случае становятся сравнимы с ошибками определения координат по другим каналам (рис. 6).

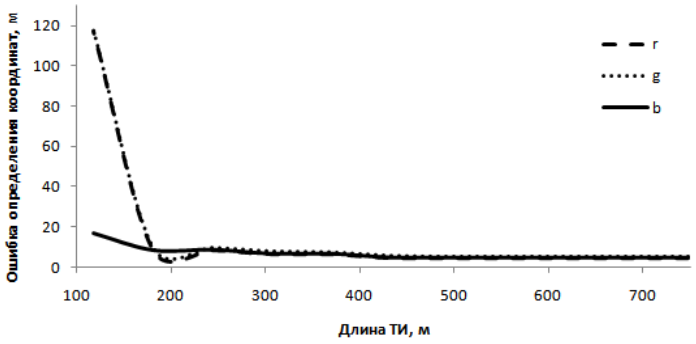


Рис. 6. Зависимость ошибки определения координат от длины ТИ для каналов *R*, *G*, *B* после учета влияния атмосферы (вариант *2* - район аэродрома «Сельцо» Ленинградской обл.)

Для *варианта 1* учет влияния атмосферы не оказал сильного влияния на ошибки определения координат, которые и до того были относительно небольшими.

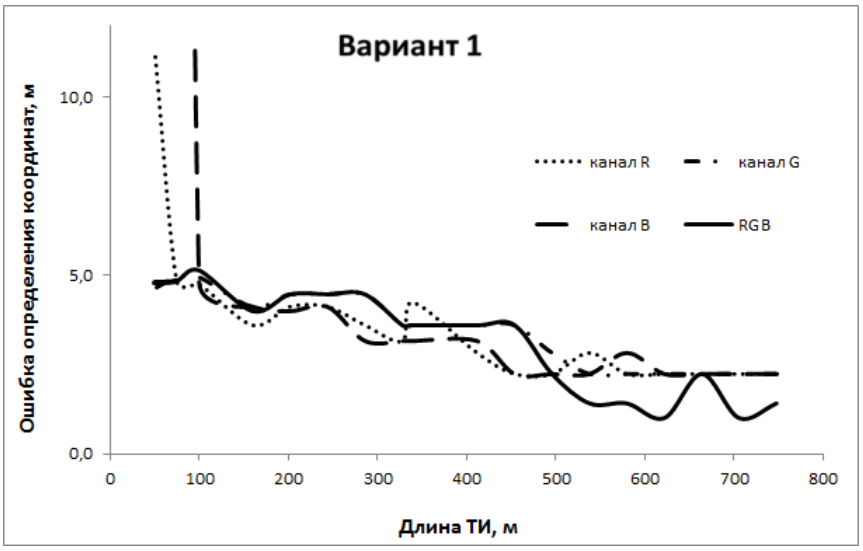
Сравнительная оценка точностных характеристик для цветной и черно-белой оптической КЭСН

После проведения коррекции видеоизображений в целях исключения влияния атмосферы на точностные характеристики цветной оптической КЭСН была осуществлена сравнительная оценка точностных характеристик для цветной и черно-белой оптической КЭСН.

На рис. 7, *а* приведены графики ошибок определения координат после учета влияния атмосферы для каждого из каналов *R, G, B* черно-белой оптической КЭСН (5) и цветной (RGB) оптической КЭСН ((1) и (2)) для *варианта 1*,

на рис. 7, *б* – соответствующие графики для *варианта 2*. Нижняя граница диапазона длин ТИ была принята равной 50 м, что соотносится со значениями уровня геометрических искажений полученных изображений. Минимально допустимым значением считалась длина $l_{\min}$, при которой начинался «резкий рост» ошибок определения координат.

а)



б)

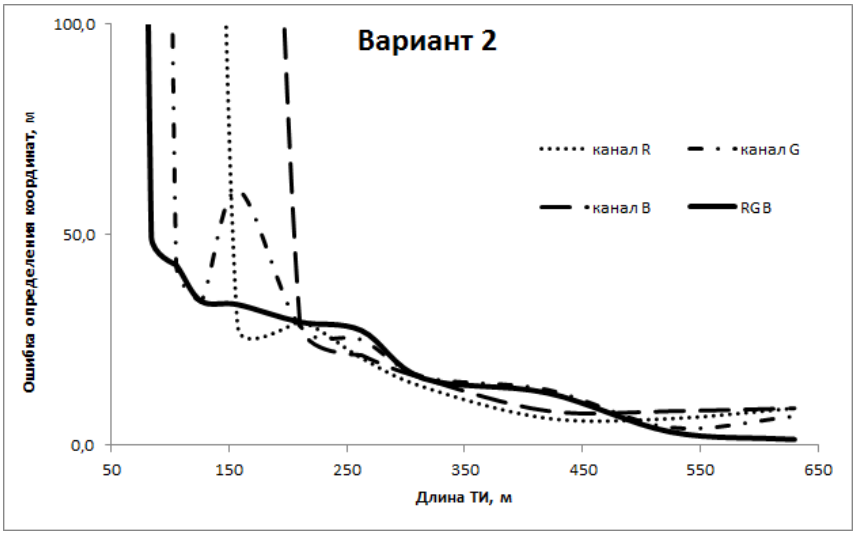


Рис. 7. Зависимость ошибки определения координат от длины ТИ для каналов *R*, *G*, *B* черно-белой оптической КЭСН и цветной оптической КЭСН (обозначенной RGB) после учета влияния атмосферы: *а*) вариант 1 - район Таганрога; *б*) вариант 2 - район аэродрома «Сельцо» Ленинградской обл.

По результатам обработки полученных данных видно, что при уменьшении длины ТИ ошибка определения координат по отдельному каналу возрастает быстрее, чем ошибка определения координат для цветной оптической КЭСН.

1. Для *варианта 1* в диапазоне длин 50–700 м минимально допустимая длина $l_{\min}$ для каналов *R* и *B* черно-белой оптической КЭСН в 1,5–2 раза больше, чем для цветной оптической КЭСН. Для канала *G* черно-белой КЭСН и для цветной оптической КЭСН минимально допустимая длина ТИ менее 50 м.

2. Для *варианта 2* минимально допустимая длина $l_{\min}$ для цветной оптической КЭСН ~ 75 м. Для каналов *R, G* и *B* черно-белой оптической КЭСН – в 1,5–2 раза больше.

Следует сказать, что данные оценки являются предварительными и должны быть уточнены по результатам полунатурного моделирования и статистической обработки экспериментальных данных по различным типам ландшафтов.

Проверка метода и алгоритмов синтеза ЭИ одного сезона по фотоснимку другого сезона

Для экспериментальной проверки метода и разработанных алгоритмов синтеза ЭИ одного сезона по фотоснимку другого сезона использовались экспериментальные данные, полученные в ходе летных испытаний макета КЭСН в районе Таганрога.

Для проведения математического моделирования алгоритма функционирования цветной оптической КЭСН были взяты следующие исходные фотоснимки (рис. 8):

фотоснимок местности в районе Таганрога, сделанный весной, по которому синтезировалось ЭИ, соответствующее летнему периоду времени (рис. 8, *а*).

фотоснимок той же местности, сделанный летом (рис. 8, *б*). Данный фотоснимок необходим для оценки качества синтезированного ЭИ путем проведения математического моделирования процесса функционирования КЭСН.

а)

Весенний фотоснимок
Место проведения испытания: район г. Таганрога
Дата съемки: 12.05. 2010 г.
Высота съемки: 450 м
Размер изображения: 686,7×231,7 м

б)

Летний фотоснимок
Место проведения испытания: район г. Таганрога
Дата съемки: 23.07. 2010 г.
Высота съемки: 450 м
Размер изображения: 686,7×231,7 м

Рис. 8. Исходные фотоснимки для проверки метода и алгоритмов синтеза ЭИ одного сезона по фотоснимку другого сезона

На фотоснимке (рис. 8, *а*) выявлено множество объектов (поля, дома, луга, дороги, деревья и др.), так называемые «фации» [7]. «Фации» представляют собой устойчивые однородные по составу природные или искусственные образо-

вания, имеющие практически однородные спектральные отражательные характеристики.

Различают два типа «фаций»:

устойчивые – фации, спектральные характеристики которых остаются неизменными при изменении сезона года (крыши домов, дороги, бетонная площадка и т.п.);

неустойчивые – фации, спектральные характеристики которых изменяются от сезона к сезону (лиственные деревья, поля, луга и др.).

Процедура синтеза ЭИ одного сезона по фотоснимку местности и базе данных значений ИП цветной оптической КЭСН [3] включает следующие этапы.

Этап синтеза № 1 «Разбиение исходного изображения на фации».

Данный этап может осуществляться как в ручном, так и в автоматизированном режиме (соответствующие алгоритмы построены на основе методов кластерного анализа). В данной работе выделение фаций осуществляется оператором в ручном режиме.

Оператор очерчивает границы неустойчивых фаций (рис. 9). При выделении фации программа позволяет автоматически определить значения параметров φ и λ (сферические координаты единичного вектора фации в пространстве RGB) в градусах. Эти параметры являются характеристиками, соответствующими определенной фации для конкретного сезона года.

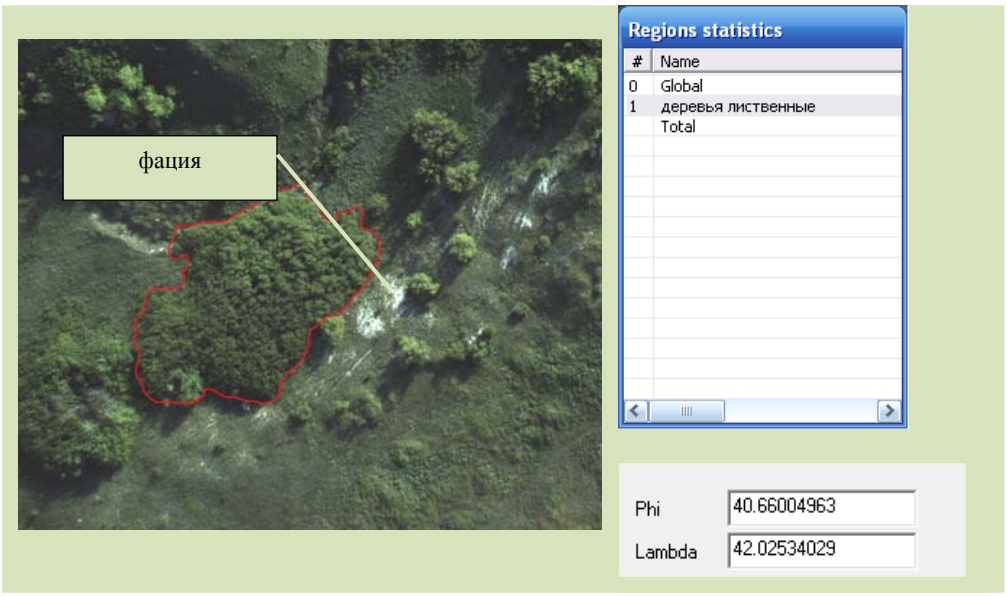


Рис. 9. Выделение фации на весеннем фотоснимке

Этап синтеза № 2 «Идентификация фации».

На данном этапе оператор определяет тип фации в соответствии с классификацией по выбранной базе данных. При наличии базы данных ИП фаций для различных сезонов на этом этапе возможна автоматизация процесса идентификации фаций. В автоматизированном варианте происходит автоматическое сравнение значений параметров φ и λ выделенной фации на фотоснимке со значениями φ и λ фаций, имеющимися в созданной базе данных, и определяется тип фации.

Одним из путей создания такой базы данных может быть использование базы данных спектральных коэффициентов яркости (СКЯ) природных и искусственных образований. СКЯ представляет собой отношение яркости данной поверхности к яркости идеального рассеивателя, находившегося в тех же условиях освещения.

Многолетние исследования в нашей стране и за рубежом позволили получить спектральные кривые значительного количества фаций в разные сезоны, что обусловливает возможность осуществления процедуры синтеза разносезонных изображений. В ОАО «ЦНИИАГ» создана база данных СКЯ [4] на основе атласа Е.Л. Кринова [8]. Данный атлас содержит результаты спектральной съемки для 370 элементов ландшафта в различные сезоны. Спектральная характеристика каждого элемента справочника представляет собой набор значений СКЯ величиной от 0 до 1 в диапазоне длин волн от 400 до 900 нм с шагом 10 нм.

База данных ИП природных и искусственных образований может быть получена при помощи функции свертки (9) спектральных кривых яркости и соответствующей весовой функции стандартного пространства RGB (табл. 3) с последующим преобразованием значений ($r_{\text{фац}}$, $g_{\text{фац}}$, $b_{\text{фац}}$) для 370 фаций, указанных в атласе Кринова, в параметры $\varphi_{\text{фац}}$ и $\lambda_{\text{фац}}$:

$$\begin{aligned} r_{\text{фац}} &= \int_{\lambda=400\text{нм}}^{\lambda=900\text{нм}} f_R(\lambda) r(\lambda) d\lambda, \\ g_{\text{фац}} &= \int_{\lambda=400\text{нм}}^{\lambda=900\text{нм}} f_G(\lambda) r(\lambda) d\lambda, \\ b_{\text{фац}} &= \int_{\lambda=400\text{нм}}^{\lambda=900\text{нм}} f_B(\lambda) r(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \tag{9}$$

где $r(\lambda)$ – СКЯ данной фации; $f_R(\lambda)$, $f_G(\lambda)$, $f_B(\lambda)$ – соответствующие весовые функции стандартного пространства RGB.

Другим вариантом создания базы данных ИП фаций является проведение фотосъемки отдельных природных или искусственных образований в заданной местности в различные сезоны (рис. 10). Такая съемка была проведена в период лётных испытаний весной и летом в районе г. Таганрог.

Рис. 10. Съемка фаций с использованием листа белой бумаги в качестве идеального отражателя

В созданной базе данных имеется информация о фациях, о сезонах их съемки и параметрах φ и λ. Пример фрагмента базы данных приведен в табл. 4.

Таблица 4

Значения спектральных характеристик, град	Наименование фации	Местность съемки	Сезоны съемки	
			весна	лето
φ	**Крыша домов**	**Район Таганрога**	**36.13**	**37.58**
λ			**46.09**	**47.17**
φ	**Дорога грунтовая**	**Район Таганрога**	**35.91**	**34.44**
λ			**43.34**	**41.75**
φ	Деревья лиственные	Район Таганрога	40.86	46.70
λ			43.17	40.46
φ	Трава	Район Таганрога	40.72	39.07
λ			30.67	44.49

Таким образом, значения φ и λ выделенной фации на рис. 9 соответствуют фации: деревья лиственные в весенний период.

Данные, приведенные в таблице, подтверждают вывод о правильности гипотезы о существовании устойчивых фаций (значения φ и λ для крыш и дорог практически не изменяются от сезона к сезону).

В табл. 5 представлены результаты сравнения значений φ и λ различных природных и искусственных образований на фотоснимке, сделанном с высоты 450 м, и на наземных фотографиях для одной и той же местности в одинаковые сезоны. Из таблицы видно, что значение параметров φ и λ практически совпадают.

Таблица 5

Значения спектральных характеристик, град	Наименование фации	Сезон съемки	Способ съемки	
			С высоты 450 м	Наземная съемка
φ	Крыша домов	Лето	36.48	35.47
λ			48.34	46.59
φ	Трава	Лето	38.32	39.07
λ			46.40	44.49
φ	Трава сухая	Лето	36.50	36.47
λ			40.25	39.45

Этап синтеза № 3 представляет собой заключительный этап процедуры синтеза. В программе заменяются значения φ и λ, соответствующие выделенной фации на фотоснимке в весеннем сезоне, на значения φ и λ в летнем сезоне. Происходит так называемая «заливка цветом» фации (рис. 11). Заливку можно осуществлять как с сохранением фактуры (рис. 11, *а*), так и без сохранения (рис. 11, *б*).

а) *б*)

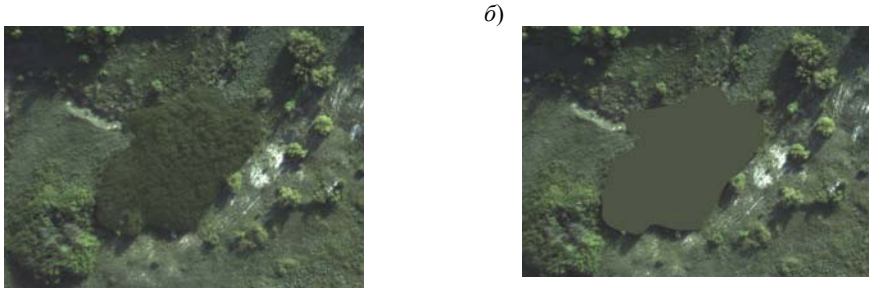


Рис. 11. Замена коэффициентов φ и λ на весеннем фотоснимке – «заливка цветом»: с сохранением фактуры (*а*), без сохранения фактуры (*б*)

На рис. 12 представлены для наглядного сравнения изображения местности: исходный фотоснимок, сделанный весной в ходе лётных испытаний, по которому проводились операции синтеза изображения (рис. 12, *а*); изображение, полученное в ходе применения процедуры синтеза и предназначенное для подготовки эталонного изображения для моделирования функционирования КЭСН в летний сезон (рис. 12, *б*); летний фотоснимок, который необходим для оценки качества синтезированного изображения путем математического моделирования процесса функционирования КЭСН (рис. 12, *в*).

В результате разработанной процедуры синтеза сформировано летнее изображение, синтезированное по имеющемуся весеннему фотоснимку (рис. 12, *б*), где черным цветом закрашены фации, которые сложно идентифицировать либо неизвестно, как они могут видоизменяться (например, вспаханное поле – весной, засеянное поле – летом).

а)

б)

в)

Рис. 12. Изображения местности района г. Таганрог: весенний фотоснимок (*а*); синтезированное изображения (*б*); летний фотоснимок (*в*)

На рис. 13 приведены результаты моделирования алгоритма функционирования КЭСН для ЭИ, подготовленного по синтезированному (рис. 12 *б*) летнему изображению местности (ЭИ 1) и реальному (рис. 12 *в*) летнему фотоснимку местности (ЭИ 2), сделанному летом, на высоте 450 м: показаны зависимости ошибок определения координат для разных длин текущих изображений.

а)

б)

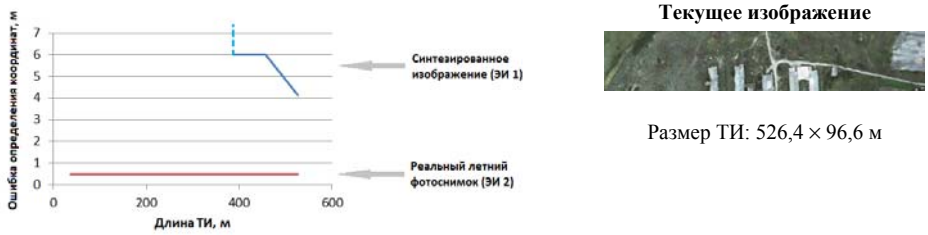


Рис. 13. Зависимость ошибки определения координат от длины ТИ для различных текущих изображений (*а, б*) и ЭИ, подготовленного по синтезированному летнему изображению (ЭИ 1) и реальному летнему фотоснимку (ЭИ 2) местности

В первом случае (рис. 13, *а*) в качестве ТИ использовалась «дорожка», полученная сшивкой фотоснимков, сделанных в ходе летных испытаниях на высоте 350 м, размером 327×135 пиксель (228,9×94,5 м), во втором (рис. 13, *б*) - в качестве ТИ использовалась «дорожка», полученная сшивкой фотоснимков, сделанных в ходе летных испытаниях на высоте 350 м, размером 752×138 пиксель (526,4×96,6 м). Из графиков видно, что: среднее значение ошибки определения координат при использовании для подготовки ЭИ реального летнего фотоснимка составило менее 1 м; среднее значение ошибки определения координат при использовании для подготовки ЭИ синтезированного летнего изображения составило ~2,5 м (рис. 13, *а*), ~5 м (рис. 13, *б*). Пунктиром отмечена критическая длина ТИ (~ 125 м (рис. 13, *а*), ~ 380 м (рис. 13, *б*)), при которой алгоритм становится неработоспособным.

Выводы

Проведенные поисковые исследования показали работоспособность предложенных алгоритмов учета влияния атмосферы и синтеза ЭИ одного сезона по фотоснимку другого.

Сравнительная оценка точностных характеристик для цветной и черно-белой оптической КЭСН показала, что заданный уровень точности обеспечива-

ется для цветной оптической КЭСН при существенно меньшей (1.5 – 2.0 раза) минимально допустимой длине ТИ, чем для черно-белой оптической КЭСН.

Данные оценки являются предварительными и должны быть уточнены по результатам полунатурного моделирования и статистической обработки экспериментальных данных по различным типам ландшафтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Солунин, В.Л**. Корреляционно-экстремальные системы для высокоточной навигации летательных аппаратов и для компьютерной диагностики сложных заболеваний / В.Л.Солунин, Б.Г.Гурский, Э.П.Спирин // Гироскопия и навигация.- 2005.- № 2.- С. 56-62.
2. **Белоглазов, И.Н**. Основы навигации по геофизическим полям / И.Н.Белоглазов, Г.И.Джанджгава, Г.П.Чигин.- М.: Наука, 1985.
3. **Щербинин В.В**. Алгоритмы фрагментации цветных фотоснимков для формирования разносезонных эталонных изображений оптических КЭС навигации ЛА / В.В.Щербинин, Е.В.Шевцова // Изв. ЮФУ. Технические науки.- Таганрог.- 2010.- № 3.
4. **Щербинин, В.В.** Построение инвариантных корреляционно-экстремальных систем навигации и наведения летательных аппаратов. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.- 232 с.
5. **Исаченко, А.Г**. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. – М.: Высшая школа, 1991.- 366 с.
6. **Кучко, А.С.** Аэрофотография (Основы и метрология). - М.: Недра, 1974.- 272 с.
7. **Толчельников, Ю.С.** Оптические свойства ландшафтов. Л.: Наука, 1974. - 252 с.
8. **Кринов, Е.Л.** Спектральная отражательная способность природных образований.- М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1947.- 272 с.

Abstract. Existing high-accuracy aircraft navigation systems are based on inertial navigation systems integrated with aiding systems. An aiding system can be represented by an RGB color vision-based correlation-extremal navigation system (CENS).

The article describes the algorithm for consideration of air condition when making the color photos for reference images and the algorithm for synthesizing the reference images of one season using the color photos of the other season to be applied in color vision-based CENS.

Key words: high-accuracy navigation systems, correlation-extremal navigation systems, color image

Материал поступил 12.07.12