



УДК 535.8:681.7  
ГРНТИ 78.25.32

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ И МАТРИЧНЫХ КАМЕР ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ВОЗДУШНОЙ РАЗВЕДКИ

*О.В. БАЗАРСКИЙ, доктор физико-математических наук, профессор  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
Д.А. МИНАКОВ, кандидат физико-математических наук, доцент  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
В.Н. ФЁКЛИН, кандидат физико-математических наук  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье проведен сравнительный анализ эффективности использования линейных и матричных камер для целей воздушной разведки в условиях низкой освещенности сцены. Рассмотрены вопросы информационной ёмкости оптических систем и возможности перераспределения временных и пространственных степеней свободы оптического поля при синтезе изображения с использованием линейной камеры. Показано, что для целей воздушной разведки в условиях низкой освещенности наиболее перспективными являются линейные камеры с функцией TDI.

*Ключевые слова:* воздушная разведка; беспилотные летательные аппараты; разрешающая способность; линейные и матричные камеры; освещенность сцены.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF LINEAR AND MATRIX CAMERAS EFFICIENCY FOR THE AERIAL RECONNAISSANCE PURPOSE

*O.V. BAZARSKIJ, Doctor of Physical-mathematical Sciences, Professor  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)  
D.A. MINAKOV, Candidate of Physical-mathematical Sciences, Associate Professor  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)  
V.N. FYOKLIN, Candidate of Physical-mathematical Sciences  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*

The article provides a comparative analysis of the linear and matrix cameras use effectiveness for aerial reconnaissance in low-light scenes. The capacity information problems of optical systems and the optical field freedom temporal and spatial degrees redistribution possibility in the synthesis of images using a linear camera are considered. It is shown that for the purposes of aerial reconnaissance in low light conditions, the most promising are linear cameras with the TDI function.

*Keywords:* aerial reconnaissance; unmanned aerial vehicles; resolution; linear and matrix cameras; scene illumination.

**Введение.** Оптические технологии дистанционного зондирования с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) являются технологиями двойного назначения. Получаемая информация является либо пространственной – фотографирование [1, 2], либо временной – спектральные исследования [3]. Т.е. информация содержится в пространственно-временных характеристиках отраженного электромагнитного поля. В настоящее время техника оптического зондирования получила широкое развитие, и ее весогабаритные и информационные характеристики открывают возможность эффективного применения на легких малозаметных БПЛА. Проблемой, ограничивающей использование оптической воздушной разведки, является невозмож-



ность получения разведывательной информации в условиях низкой освещенности в плохих метеоусловиях и ночью. Решение проблемы заключается в накоплении сигнала в условиях низкой освещенности, чему препятствует необходимость движения БПЛА, обеспечивающая производительность воздушной разведки. Решение этого противоречия возможно за счет перераспределения степеней свободы отраженного поля с уменьшением детальности получаемой информации, которая для низких высот работы БПЛА является избыточной. И здесь важен оптимальный выбор комплекса используемой аппаратуры, позволяющей эффективно перераспределять степени свободы принимаемого сигнала в процессе его накопления при движении БПЛА.

Цель работы – решение противоречия между необходимостью накопления слабого оптического сигнала, получаемого в условиях низкой освещенности, и движением БПЛА с достаточно высокой скоростью, обеспечивающей требуемую производительность воздушной разведки, и выбор камеры, решающей это противоречие.

**Потенциальная информационная емкость оптических систем.** В монографии [4] приведены две фундаментальных теоремы.

Теорема 1. Фундаментальным инвариантом информационной емкости оптической системы является число  $N_0$  полных степеней свободы электромагнитного поля – пространственных, временных и поляризационных. Никакими методами невозможно реализовать большую информационную емкость, чем та, которая определяется полным числом информационных степеней свободы поля.

Теорема 2. В пределах полного числа информационных степеней свободы поля можно взаимно менять соотношение между пространственными, временными и поляризационными степенями свободы сохраняя при этом полное число степеней свободы  $N_0$ .

Максимальное число пространственных степеней свободы ограничивается числом элементов приемной матрицы  $n \cdot m$  по координатам  $x, y$ . Если период следования элементов  $T_x = T_y = T_c$ , то площадь матрицы  $l_x \cdot l_y = n \cdot T_c \cdot m \cdot T_c = n \cdot m \cdot T_c^2$ .

Тогда размер наблюдаемой сцены  $L_x = l_x M = l_x H / F = n T_c H / F$ , где  $M$  – коэффициент масштабной трансформации (уменьшения) изображения,  $H$  – высота полета носителя,  $F$  – фокусное расстояние объектива. Соответственно  $L_y = m T_c H / F$ .

Оценим число возможных пространственных степеней свободы  $N_{x,y} = N_x N_y$ .

Согласно критерию Рэля, разрешение по сцене  $\Delta x = 1,22 \lambda H / D$ , где  $\lambda$  – длина волны излучателя,  $D$  – апертура объектива. Объектив должен обеспечивать разрешающую способность по изображению, соответствующую периоду матрицы, т.е.  $T_c H / F = 1,22 \lambda H / D$ , откуда получаем  $D_x = D_y = 1,22 \lambda F / T_c$ . Т.е. апертура объектива не зависит от высоты полета БПЛА, а определяется длиной волны излучателя и параметрами объектива и матрицы. Так, для среднефокусного объектива с фокусным расстоянием 50 мм и периоде матрицы 7 мкм необходимая апертура объектива для зеленой части спектра равна 35 мм. В этом случае для максимальной высоты полета БПЛА  $H = 500$  м разрешение по сцене равно 6,4 см, что обеспечивает достаточно высокое качество изображения. При этом линейный размер поля зрения по наблюдаемой сцене при  $n = m = 4 \cdot 10^3$  приблизительно равен  $L_x = L_y = 280$  м.

Различные элементы разрешения сцены могут иметь различные яркости. Число воспроизводимых матрицей градаций к яркости определяется яркостью сцены  $V$  и чувствительностью матрицы детекторов  $V_0$ , т.е.  $k = V / V_0$ . В цифровых матрицах число градаций яркости определяется в двоичном коде. Поэтому число яркостных степеней свободы элементов разрешения по сцене можно записать следующим образом  $N_j = \text{Log}_2 k$ .

Тогда число пространственных степеней свободы поля равно  $N_{x,y} = N_x N_y N_j = m \cdot n \cdot \text{Log}_2 k$ . Для средних уровней освещенности  $k = 1024$ ,  $N_{x,y} = 18 \cdot 10^6 \cdot 10 = 1,8 \cdot 10^8$ .

Оценим теперь число временных степеней свободы поля. Оно определяется выражением  $N_t = 2(1 + \Delta \nu T)$ , где  $\Delta \nu$  – полоса принимаемых частот,  $T$  – время наблюдения (выдержки). Для идеального монохроматического сигнала  $\Delta \nu = 0$  и  $N_t = 2$ , т.е. фиксируется только амплитуда и фаза сигнала. Квазимонохроматический сигнал представляется набором гармоник с длительно-



стью излучения  $\Delta\tau=10^{-9}$  с. В этом случае излучается линия с основной частотой  $\nu_0$  и полосой частот, определяемой из выражения  $\Delta\nu_{\text{л}}\Delta\tau = 1$ , откуда для гармонической составляющей получаем  $\Delta\nu_{\text{л}}=10^9$  Гц. Основная частота для зеленой области спектра  $\nu_0=5,6 \cdot 10^{14}$  Гц. Для гармонического сигнала  $N_t=2(1+\Delta\nu_{\text{л}}\Delta\tau) = 4$ . Т.е. фиксируется амплитуда сигнала, соответствующая основной частоте линии, и две частоты  $\nu_1$  и  $\nu_2$ , определяющие ширину ее полосы.

Реально используется широкополосное излучение множества гармоник с широкой полосой  $\Delta\nu$ , где время обработки сигнала определяется инерционностью элементов матрицы или временем опроса  $T_0$ . Тогда  $N_t=2(1+\Delta\nu \cdot T_0)$ . Если матрица детекторов принимает излучение с длинами волн от 200 нм до 1000 нм, то полоса частот излучения  $\Delta\nu=1,2 \cdot 10^{15}$  Гц. При инерционности элементов матрицы  $T_0 = 1$  мкс,  $N_t = 2,4 \cdot 10^9$ .

Полное число степеней свободы поля теперь можно записать следующим образом:  $N_0=2 \cdot m \cdot n \cdot \text{Log}_2 k \cdot 2 \cdot (1+\Delta\nu \cdot T_0) = 4 \cdot m \cdot n \cdot \text{Log}_2 k \cdot (1+\Delta\nu \cdot T_0)$ . Здесь дополнительно учтены две независимые степени свободы ортогональных поляризаций света, которые можно выделить из неполяризованного естественного света.

Сравнивая величины  $N_t$  и  $N_{x,y}$  видим, что для реальной матрицы  $N_t \gg N_{x,y}$ . Следовательно можно увеличивать время наблюдения (выдержку)  $T > T_0$ , т.е. накапливать сигнал. При этом для сохранения инварианта  $N_0$  можно:

- Уменьшать спектральное разрешение, объединив элементы матрицы, отвечающие за прием сигнала различных частот. Современные матрицы имеют спектральную разрешающую способность до 1 нм. Поэтому в диапазоне работы матрицы от 200 нм до 1000 нм можно оставить только четыре поддиапазона R,G,B и ближний инфракрасный. Если пренебречь спектральной информацией, объединив все элементы матрицы и существенно увеличив время накопления сигнала  $T$ , то получим черно-белое изображение при низкой освещенности сцены, что легко делается при неподвижном объекте наблюдения.

- Уменьшить пространственное разрешение за счет накопления сигнала в процессе движения БПЛА. При этом время выдержки  $T \gg T_0$ . Тогда элемент разрешения по сцене будет равен  $\Delta x = V \cdot T$ , где  $V$  – скорость движения БПЛА. При этом время накопления (выдержка)  $T = \Delta x / V$ . Ухудшив пространственное разрешение до 10 см при скорости движения БПЛА 10 м/с имеем  $T = 10^{-2}$  с, т.е. увеличиваем число принятых реализаций поля в  $10^4$  раз, улучшая отношение сигнал/шум. В этом случае по полю зрения будем иметь 2800x2800 элементов разрешения, что вполне достаточно для распознавания малоразмерных целей.

Указанные меры по перераспределению степеней свободы волнового поля частично применяются при фотосъемке в условиях низкой освещенности, объединяя сигналы трех диапазонов R,G,B. Однако полноценной теории увеличения отношения сигнал/шум в динамическом процессе перераспределения всех возможных степеней свободы поля при работе в условиях низкой (ночной) освещенности не существует.

Кроме того, эффективность работы в условиях низкой освещенности зависит от типа используемой камеры: матричной, линейной или TDI.

**Аппаратура перспективная для целей воздушной разведки в условиях низкой освещенности.** Рассмотрим три больших класса доступных камер, с различными характеристиками.

1) Линейные камеры машинного зрения. Характеристики нескольких линейных камер, широко представленных на рынке систем машинного зрения, производимых фирмой TeledynDalsa, даны в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики линейных камер

Модель	Тип сенсора	Формат сенсора	Разрешение	Размер пикселя	Частота линий	Динамический диапазон	Интерфейс
LA-CM-04K08A Монохромная	CMOS	28,8 мм	4096 x 1	7,04 мкм	80 кГц	60 дБ	CameraLink
LA-CC-04K05B Цветная	CMOS	28,84 мм	4096 x 2	7,04 мкм	48 кГц	60 дБ	CameraLink



2) Линейные камеры машинного зрения с функцией TDI (TimeDelay&Integration). Сенсоры в данных камерах обеспечивают четкие и яркие изображения даже при низкой освещенности и высокоскоростной съемке за счет многократного измерения яркости сцены по строке в пределах заданного элемента разрешения. Об особенностях работы данных матриц можно узнать из следующих материалов [5,6]. Характеристики некоторых современных камер с функцией TDI представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики линейных камер с функцией TDI

Модель	Тип сенсора	Формат сенсора	Разрешение	Размер пикселя	Частота линий	Динамический диапазон	Интерфейс
HS-80-04K40	CCD	28,8 мм	4096 x 96	7 мкм	68 кГц	63 дБ	CameraLink
HS-S0-12K40	CCD	62 мм	12000 x 256	5,2 мкм	90 кГц	500:1	HSLink

3) Матричные камеры на примере обычного зеркального фотоаппаратура NikonD5200.

Разрешение матрицы: 4000 x 6000 пикселей; размер пикселя около 3,8 мкм; тип матрицы CMOS (КМОП), скорость съемки 5 кадров/с, минимальная выдержка 1/4000 с; максимальная частота кадров видеоролика 60 кадров/с.

**Результаты сравнительного анализа и их обсуждение.** Рассчитаем число пространственных степеней свободы поля для различных камер: линейных, с функцией TDI и матричных в случае средних уровней освещенности ( $k=1024$ ).

$$N_{x,y} = N_x N_y N_z = m \cdot n \cdot \text{Log}_2 k = 4,1 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10 = 4,1 \cdot 10^4 \text{ – для линейной монохромной камеры;}$$

$$N_{x,y} = N_x N_y N_z = m \cdot n \cdot \text{Log}_2 k = 4,1 \cdot 10^3 \cdot 96 \cdot 10 = 4 \cdot 10^6 \text{ – для линейной камеры с функцией TDI;}$$

$$N_{x,y} = N_x N_y N_z = m \cdot n \cdot \text{Log}_2 k = 6 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 10 = 2,4 \cdot 10^8 \text{ – для матричной камеры.}$$

При этом число временных степеней свободы поля  $N_t = 2(1 + \Delta v T_0)$  для указанных камер равно:

$$N_t = 2(1 + \Delta v \cdot T_0) = 3,0 \cdot 10^{10} \text{ – для линейной монохромной камеры;}$$

$$N_t = 2(1 + \Delta v \cdot T_0) = 3,5 \cdot 10^{10} \text{ – для линейной камеры с функцией TDI;}$$

$$N_t = 2(1 + \Delta v \cdot T_0) = 4,0 \cdot 10^{13} \text{ – для матричной камеры.}$$

Спектральный диапазон чувствительности кремниевых детекторов лежит в пределах от 200 нм до 1100 нм. При расчетах всех типов камер анализируемый спектральный диапазон выбран аналогичным, так как в пределах этого диапазона лежит полоса пропускания используемой оптики. Следует, однако, отметить, что на массовых фотоаппаратах, как правило, стоит фильтр, который отсекает ИК излучение. Это не приемлемо с точки зрения воздушной разведки, особенно в условиях плохой видимости, где ИК излучение часто играет определяющую роль. Тем не менее, на рынке есть монохромные матрицы и фотоаппараты, поэтому в данном случае при расчетах мы использовали весь спектральный диапазон чувствительности кремниевых датчиков и полосы пропускания оптики.

Полное число степеней свободы поля:

$$N_0 = 4 \cdot m \cdot n \cdot \text{Log}_2 k \cdot (1 + \Delta v \cdot T_0) = 12,3 \cdot 10^{14} \text{ – для линейной монохромной камеры;}$$

$$N_0 = 4 \cdot m \cdot n \cdot \text{Log}_2 k \cdot (1 + \Delta v \cdot T_0) = 14,0 \cdot 10^{16} \text{ – для линейной камеры с функцией TDI;}$$

$$N_0 = 4 \cdot m \cdot n \cdot \text{Log}_2 k \cdot (1 + \Delta v \cdot T_0) = 9,6 \cdot 10^{21} \text{ – для матричной камеры.}$$

Другими словами, полное число степеней свободы для матричной камеры примерно на 5 порядков больше по сравнению с линейной камерой с функцией TDI и на 7 порядков больше по сравнению с линейной камерой. Но это относится только к стационарному неподвижному объекту съемки. Из линейных камер предпочтительнее камера с функцией TDI, где увеличение числа степеней свободы происходит за счет многократного опроса элемента разрешения сцены с частотой  $\nu_0 = 68/4096$  кГц.

Оценим теперь статическое пространственное разрешение неподвижных камер, а также их поле зрения исходя из следующих уравнений:



$$\Delta = \Delta l \cdot \frac{H}{F} \quad (H \gg F)$$

$$L = \Delta l \cdot \frac{H}{F} \cdot n$$

здесь  $\Delta$  – линейное разрешение по изображению сцены, а  $\Delta l$  – размер пикселя матрицы используемой камеры,  $F$  – расстояние от фокальной плоскости объектива до детектора при условии  $H \gg F$ ,  $H$  – расстояние от фокальной плоскости объектива до сцены,  $n$  – число пикселей по одной координате,  $L$  – линейный размер сцены по одной из осей. Под статическим разрешением понимается способность оптической системы различать два соседних элемента изображения сцены при неподвижном расположении камеры относительно сцены.

Возьмем высоту расположения БПЛА в подоблачном слое равную 500 метрам над поверхностью, объектив с фокусным расстоянием 50 мм. Тогда для стандартного размера пикселя  $\Delta l = 7$  мкм, разрешение  $\Delta = 7$  см, а поле зрения для  $n = 2048$  равно 143 м. Т.е. в статическом режиме съемки матричная камера с сенсором 2048x2048 пикселей обеспечивает разрешение 7 на 7 см с полем зрения 143 на 143 м, что вполне достаточно для распознавания малоразмерных целей. При этом в условиях малой освещенности порядка  $10^{-3}$  люкс необходимое время экспозиции 0,05 секунды [7] для лучших матричных камер, построенных по технологии КМОП. Однако при движении БПЛА даже с минимальной скоростью равной 20 м/с возникает смаз изображения, равный 1 м, что препятствует применению матричных камер для целей воздушной разведки в условиях низкой освещенности.

Рассмотрим теперь динамическое разрешение линейных камер, согласно схеме, приведенной на рисунке 1.

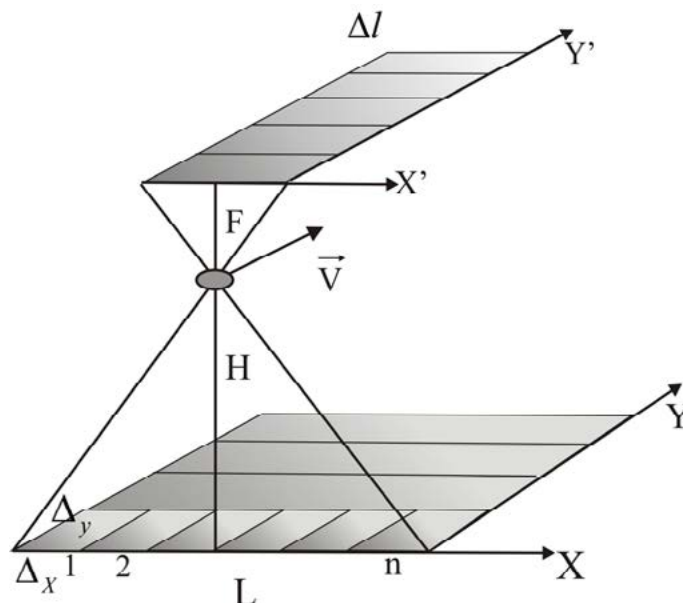


Рисунок 1 – Схема полета разведчика, оснащенного линейной камерой.  $H$  – высота полета,  $F$  – фокусное расстояние объектива,  $\Delta l$  – период следования элементов матрицы линейки,  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  – элементы разрешения по сцене,  $L$  – линейное поле зрения объектива,  $V$  – скорость полета БПЛА,  $n$  – число элементов линейки

Под динамическим разрешением понимается минимальный линейный размер элемента сцены, формируемый при движении БПЛА по одной координате, т.е.  $\Delta y = V \cdot t_0$ , где  $V$  – скорость движения БПЛА,  $t_0$  – время опроса пикселей линейной камеры. При использовании линейной камеры:

– по координате  $X$  разрешение аналогично матричной камере, а смаз изображений минимален за счет уменьшения времени опроса на несколько порядков;



– по координате  $Y$  динамическое разрешение  $\Delta y = V \cdot t_0 = V/v$ , где  $v$  – частота опроса линий, из которых синтезируется изображение по координате  $Y$ .

Для существующих линейных камер, например, TeledynDalsa LA-CM-04K08A, частота опроса линий  $v$  равна  $80 \cdot 10^3$  Гц, что обеспечивает динамическое разрешение при  $V = 20$  м/с равное 0,25 мм. Для целей воздушной разведки малоразмерных целей это разрешение является избыточным, и возможно либо увеличение скорости движения БПЛА, либо накопление сигнала.

Основным недостатком стандартных линейных камер для воздушной разведки в условиях малой освещенности является их низкая чувствительность, связанная с большой скоростью опроса отдельных пикселей. Чувствительность линейных камер примерно на 2 порядка ниже, чем матричных [8], что можно увидеть по спецификациям сенсоров. Кроме того, возникает проблема выравнивания разрешения по координатам  $X$  и  $Y$ .

Для ликвидации недостатка чувствительности целесообразно использовать линейные камеры с функцией TDI. В них применяется многократный опрос пикселей камеры со сдвигом во времени  $\Delta t < t_0$ , в результате чего реализуется накопление сигнала. Время  $\Delta t$  определяется временем релаксации светочувствительных элементов линейного сенсора. При этом на каждый пиксель линейки многократно поступают кванты оптического излучения, отраженного элементом разрешения сцены.

Так камера TeledynDalsa HS-80-04K40 с частотой линий 68 кГц, обеспечивает избыточное динамическое разрешение при  $V = 20$  м/с равное 0,3 мм. Из условия равенства статического и динамического разрешений равного 7 см, обеспечиваемого линейной камерой по оси  $X$ , то имеется возможность увеличить уровень сигнала в 230 раз, т.е. чувствительность линейных камер с функцией TDI становится соизмеримой с чувствительностью матричных камер.

**Заключение.** Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что наиболее эффективной для целей оптической воздушной разведки, в условиях низкой освещенности является линейная камера с функцией TDI, поскольку появляется возможность многократного накопления информации от одной и той же области сцены в реальном масштабе времени. Причем для камеры HS-80-04K40 это 230 реализаций, что позволяет существенно увеличить отношение сигнал/шум в условиях плохой освещенности сцены. Чувствительность такой камеры соизмерима с матричной, и может работать при освещении сцены до  $10^{-3}$  люкс. При создании изображения такой камерой можно получить равные статистические и динамические разрешения в 7 см при высоте полета БПЛА в 500 м и скорости его движения до 30 м/с с полем зрения 143 м. Поле зрения можно увеличить расположив в один ряд несколько линеек с их параллельным опросом. Вводя порог обнаружения сигнала, можно избавиться от паразитной засветки камеры, еще улучшив качество изображения.

За счёт синтезирования изображения линейной камерой с функцией TDI реализуется интегрирование сигнала по временным степеням свободы оптического поля и его накопление при уменьшении пространственных степеней свободы оптического поля с ухудшением избыточного пространственного разрешения и увеличением чувствительности камеры.

Таким образом, линейные камеры с функцией TDI обеспечивают гораздо меньший смаз изображения, вызванный движением БПЛА, по сравнению с матричными камерами за счет динамического накопления, а не усиления оптического сигнала. Широко используемые матричные камеры, хотя и обеспечивают большую информационную ёмкость, но разрешающая способность по сцене избыточна. Поэтому для целей обнаружения малозаметных целей в задачах воздушной разведки более перспективными являются линейные камеры с функцией TDI, которые обеспечивают более высокую производительность разведки в условиях низкой освещенности.

Линейные камеры с функцией TDI не производятся отечественной промышленностью. Однако это всего лишь линейка детекторов с управлением их опросов. Защитить сюда паразитную программу («закладку») невозможно. Сброс информации с камеры должен осуществляться на накопитель в процессе полета малозаметного БПЛА типа «Застава», с последующей обработкой информации на земле.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вельцер В. Аэроснимки в военном деле. М.: Воениздат, 1990. 288с.
2. Краснова А.Б. Барьеры воздушной разведки. М.: Воениздат, 1987. 176с.
3. Журкин И.Г., Никишин Ю.А. Расчет параметров формирования изображений, полученных в условиях нестабилизированной гиперспектральной аэросъемки // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». 2011. № 4. С. 47–52.
4. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. М.: Наука, 1971. 616с.
5. Камера IQ. URL: <http://www.cameraiq.ru/catalog/series/5059-lineinye-sensory-DALSA> (дата обращения: 10.11.2017).
6. Камера IQ. URL: <http://www.cameraiq.ru/catalog/series/647-seriia-Piranha-HS-lineinye-kamery-mashinnogo> (дата обращения: 10.11.2017).
7. КМОП-СЕНСОРЫ для научных, профессиональных и специальных применений. URL: [http://www.npk-photonica.ru/images/katalog-gpixel\\_small\\_18-04-16-pdf141604.pdf](http://www.npk-photonica.ru/images/katalog-gpixel_small_18-04-16-pdf141604.pdf) (дата обращения: 2.11.2017).
8. Камеры линейного сканирования Basler. URL: <http://www.baslerweb.com/L800-6622.html> (дата обращения: 2.11.2017).

REFERENCES

1. Vel'tser V. Aehrosnimki v voennom dele. M.: Voenizdat, 1990. 288 s.
2. Krasnova A.B. Bar'ery vozdushnoj razvedki. M.: Voenizdat, 1987. 176 s.
3. ZHurkin I.G., Nikishin YU.A. Raschet parametrov formirovaniya izobrazhenij, poluchennykh v usloviyakh nestabilizirovannoj giperspektral'noj aehros"emki // Izv. vuzov. «Geodeziya i aehrofotos"emka». 2011. № 4. S. 47–52.
4. Soroko L.M. Osnovy golografii i kogerentnoj optiki. M.: Nauka, 1971. 616 s.
5. Kamera IQ. URL: <http://www.cameraiq.ru/catalog/series/5059-lineinye-sensory-DALSA> (data obrashheniya: 10.11.2017).
6. Kamera IQ. URL: <http://www.cameraiq.ru/catalog/series/647-seriia-Piranha-HS-lineinye-kamery-mashinnogo> (data obrashheniya: 10.11.2017).
7. КМОП-SENSORY dlya nauchnykh, professional'nykh i spetsial'nykh primenenij. URL: [http://www.npk-photonica.ru/images/katalog-gpixel\\_small\\_18-04-16-pdf141604.pdf](http://www.npk-photonica.ru/images/katalog-gpixel_small_18-04-16-pdf141604.pdf) (data obrashheniya: 2.11.2017).
8. Kamery linejnogo skanirovaniya Basler. URL: <http://www.baslerweb.com/L800-6622.html> (data obrashheniya: 2.11.2017).

© Базарский О.В., Минаков Д.А., Фёклин В.Н., 2018

Базарский Олег Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор 207 кафедры физики и химии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, arhangelskay49@mail.ru

Минаков Дмитрий Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент 207 кафедры физики и химии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, minakov\_d\_a@mail.ru

Фёклин Виктор Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент 207 кафедры физики и химии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков 54А, Vfek13@mail.ru