

УДК 004.932

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО ОБЪЕКТА ДЛЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

*Корепанов С.Е., к.т.н., ассистент каф. Автоматики и информационных технологий в управлении (АИТУ)  
Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ), e-mail: aitu@rsreu.ru;  
Смирнов С.А., к.т.н., доцент каф. АИТУ РГРТУ, e-mail: aitu@rsreu.ru;  
Стротов В.В., к.т.н., доцент каф. АИТУ РГРТУ, e-mail: aitu@rsreu.ru.*

## ALGORITHM FOR DETERMINING THE DISTANCE TO OBJECT FOR REAL-TIME STEREOSCOPIC TECHNICAL VISION SYSTEM

*Korepanov S.E., Smirnov S.A., Strotov V.V.*

*In this work we present the algorithm for determining the distance to object by using real-time stereoscopic technical vision system (TVS). We use the correlation based algorithms for estimating the position of the object. The choice of the algorithm for the current observation conditions is based on performance indicators. The results of experimental research performed using synthesized videos are presented.*

**Key words:** stereoscopic system, the object coordinate estimation algorithm, SAD criterion, vision systems, performance indicators, disparity, distance.

**Ключевые слова:** стереоскопическая система технического зрения, алгоритм измерения координат объектов, разностная критериальная функция, системы обработки изображений, критерии работоспособности, диспаратность, дальность.

### Введение

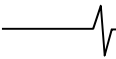
Благодаря значительному прогрессу в электронике и компьютерных системах индустрия беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) получила значительное развитие за последнее десятилетие. БПЛА активно применяются для аэрофотосъемки, патрулирования, мониторинга различных объектов, доставки грузов, тушения пожаров и т.п.

Развитие технологий приводит к значительному удешевлению производства БПЛА и, как следствие, к увеличению их количества. Появление большого количества БПЛА, а так же тот факт, что в большинстве стран использование БПЛА практически не регламентируется, приводит к возникновению проблем, связанных с их эксплуатацией и обеспечением безопасности полетов. При этом должны быть решены такие задачи, как автономная навигация БПЛА, предотвращение столкновений, автономная посадка [1-5]. Данные задачи могут быть решены при помощи радиолокационных систем, однако данный класс аппаратуры ориентирован на крупногабаритные летательные аппараты, оснащенные мощными двигателями. В то же время, массовый сегмент современных БПЛА в основном включает в себя малоразмерные аппараты. Большинство таких БПЛА оснащены высококачественными видеодатчиками, позволяющими формировать изображения высокого контраста и с хорошим пространственным разрешением. При этом характеристики

*Рассмотрен алгоритм определения дальности до объекта для стереоскопической системы технического зрения (СТЗ) реального времени. Для определения положения объекта в разных каналах СТЗ используются корреляционные алгоритмы измерения координат. Для выбора наиболее подходящего для текущих условий наблюдения алгоритма предложен критерий работоспособности. Представлены результаты экспериментальных исследований, выполненные с использованием синтезированных видеосюжетов.*

современной элементной базы позволяют реализовать на борту летательного аппарата достаточно сложные алгоритмы анализа изображений [6]. В частности, использование современных ПЛИС в качестве вычислительного ядра позволяет использовать конвейерный подход к обработке поступающих изображений.

Для решения многих из перечисленных задач необходимо определять дальность до препятствий или объектов. Сделать это можно с использованием монокулярной или бинокулярных (стереоскопических) систем технического зрения (СТЗ). В случае монокулярной СТЗ определение дальности осуществляется при условии поступательного движения БПЛА за счет анализа последовательности видеок кадров, сформированной единственным видеодатчиком. При этом обязательным условием является наличие информации о скорости движения БПЛА, его координатах и ориентации в пространстве, углах поворота оптико-механической системы относительно носителя [7]. Точность определения дальности будет зависеть от датчиков углов поворота оптико-механической системы, датчиков высоты, ориентации носителя, ошибки сопоставления ключевых элементов на опорных кадрах, а также от удаленности друг от друга точек пространства, соответствующих моментам формирования опорных кадров. В стереоскопической СТЗ



используется информация от двух видеодатчиков, разнесенных между собой на некоторое базовое расстояние [5, 8]. Анализ двух изображений одного и того же объекта, позволяет определить диспаратность, т.е. величину сдвига в пикселях между изображениями объекта, формируемыми двумя камерами. Точность определения дальности зависит от характеристик камеры, базового расстояния и ошибки определения диспаратности [9].

В данной работе предложен алгоритм определения дальности до объекта для решения задачи относительной навигации двух не кооперируемых летательных аппаратов. Решение данной задачи является сложным как для БПЛА, так и для пилотируемой техники. Для определения относительного положения БПЛА относительно другого летательного аппарата необходимо сначала обнаружить данный воздушный объект, а затем осуществить слежение за ним в процессе сближения в широком диапазоне дальностей. Вопросы обнаружения и прослеживания воздушных объектов широко освещены в научной литературе, например [10-12]. В данной работе используется многоэтапный алгоритм, подробно описанный в [13].

Бортовая система управления БПЛА для предотвращения столкновения с не кооперируемым воздушным объектом должна постоянно получать информацию о дальности до объекта, т.е. задача должна решаться в режиме реального времени. Следовательно, для решения данной задачи на БПЛА должна быть установлена стереоскопическая СТЗ.

Как было отмечено выше, для определения дальности необходимо вычислить сдвиг в пикселях между изображениями объекта, полученными видеодатчиками СТЗ. Для определения диспаратности в данной работе в качестве базового алгоритма используется корреляционный алгоритм измерения координат с двумерной критериальной функцией [14]. Данный алгоритм позволяет измерять положение объекта с большой точностью, но при этом имеет высокую вычислительную сложность, и при больших размерах наблюдаемого объекта выдача информации в режиме реального времени невозможна. Ввиду того, что зачастую сближение осуществляется в хороших погодных условиях, воздушный объект будет наблюдаться на фонах с относительно равномерной яркостью. Данный факт позволяет для вычисления диспаратности использовать алгоритм, основанный на корреляционном совмещении одномерных функций. Данный алгоритм является гораздо более выгодным с точки зрения вычислений, но показывает неудовлетворительный результат при условии малого отличия средней яркости объекта от средней яркости фона. Таким образом, необходимо автоматически выбирать алгоритм вычисления диспаратности. Для автоматизации выбора будет введен критерий работоспособности для алгоритма, основанного на корреляционном совмещении одномерных функций.

#### Алгоритм вычисления дальности до объекта

Пусть на БПЛА установлена стереоскопическая СТЗ, включающая систему обработки изображений и два видеодатчика с идентичными параметрами. Датчики удале-

ны друг от друга на базовое расстояние, при этом их оси расположены параллельно. В поле зрения датчиков наблюдается один воздушный объект. Фон, на котором наблюдается объект, может представлять собой ясное облачное или звездное небо. Левый и правый датчики одновременно формируют два изображения  $l_1(i, j, n)$  и  $l_2(i, j, n)$  одинакового размера. На основании этих изображений на  $n$ -м кадре вычисляется дальность до объекта по формуле [13]:

$$D(n) = \frac{B \cdot Z}{2 \cdot Q(n) \cdot \operatorname{tg}(f/2)}, \quad (1)$$

где  $B$  – база стереосистемы в метрах,  $Z$  – разрешение изображения по горизонтали в пикселях,  $Q(n)$  – значение диспаратности в пикселях, вычисленное на  $n$ -м кадре,  $f$  – ширина поля зрения камеры в градусах.

Для определения диспаратности, т.е. сдвига изображения объекта, необходимо измерить координаты объекта на изображениях с левого и правого видеодатчика. В процессе сближения с объектом изображение с левого видеодатчика используется для его обнаружения и прослеживания. На  $n$ -м кадре в качестве координат объекта можно использовать координаты, полученные от многоэтапного алгоритма [13]. Данный алгоритм, помимо координат, выдает информацию о текущих размерах объекта. Таким образом, можно сформировать эталонное изображение объекта  $h_1(i, j, n)$  в левом изображении,  $(i, j) \in l_1$ . Поиск объекта корреляционным алгоритмом измерения координат на изображении, сформированным правым видеодатчиком, заключается в минимизации двумерной разностной критериальной функции:

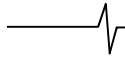
$$F_n(\alpha, \beta) = \sum_{(i, j) \in H} |l_2(i + \alpha, j + \beta, n) - h_1(i, j, n)|, \quad (2)$$

где  $H$  – множество точек эталонного изображения объекта,  $(\alpha, \beta)$  – параметры, характеризующие смещение объекта вдоль осей ординат. Значение  $\alpha^*(n)$  в паре  $(\alpha^*(n), \beta^*(n))$ , при котором достигается глобальный минимум критериальной функции (2), принимается в качестве величины, характеризующей смещение эталонного изображения объекта  $h_1(i, j, n)$  относительно правого изображения

$$(\alpha^*(n), \beta^*(n)) = \arg \min_{\alpha, \beta} (F_n(\alpha, \beta)). \quad (3)$$

Значение  $\beta^*(n)$  при этом может быть использовано для оценки разъюстировки видеодатчиков. Используемые в стереоскопической СТЗ видеодатчики устанавливаются таким образом, чтобы наблюдаемый объект находился на одной и той же строке на разных изображениях, т.е. при значительном отклонении  $\beta^*(n)$  от нулевого значения данные измерения дальности могут быть забракованы.

Поиск эталонного изображения по всему кадру  $l_2(i, j, n)$  является нецелесообразным. Обычно формируется некоторая зона поиска, координаты центра которой соответствуют центру объекта в левом изображении, а размеры выбираются из расчета предполагаемого максимального смещения объекта. При приближении к объекту диспаратность увеличивается и, как следствие,



необходимо увеличивать зону поиска, что ведет к увеличению вычислительной сложности и невозможности работы в режиме реального времени. Для того чтобы не увеличивать зону поиска, необходимо задавать положение зоны поиска с учетом диспаратности, полученной на предыдущем кадре.

Оценивание диспаратности  $\alpha^*(n)$  производится с точностью до целого пикселя, однако возможно субпиксельное уточнение найденных значений. Для чего производится параболическое интерполирование разностной критериальной функции (2) в ближайшей окрестности точки минимума [15]:

$$Q(n) = x - \frac{1}{2} \times \frac{F_n(x+1, y) - F_n(x-1, y)}{F_n(x+1, y) + F_n(x-1, y) - 2 \cdot F_n(x, y)}, \quad (4)$$

где  $x = \alpha^*(n)$ ,  $y = \beta^*(n)$ .

Таким образом, алгоритм вычисления дальности до объекта по поступающей паре изображений состоит из следующих шагов:

- формирование эталонного участка изображения на левом изображении;
- формирование зоны поиска эталонного участка изображения объекта интереса на правом изображении;
- вычисление целочисленной величины диспаратности с учетом диспаратности, рассчитанной на предыдущем шаге  $Q(n-1)$ , на основе корреляционного алгоритма измерения координат с двумерной критериальной функцией. На первом кадре  $Q(n-1)$  задается нулевым значением;
- субпиксельное уточнение полученного сдвига с использованием параболического интерполирования разностной критериальной функции в окрестности минимума;
- вычисление дальности до объекта по формуле (1).

**Алгоритм вычисления диспаратности, основанный на корреляционном совмещении одномерных функций**

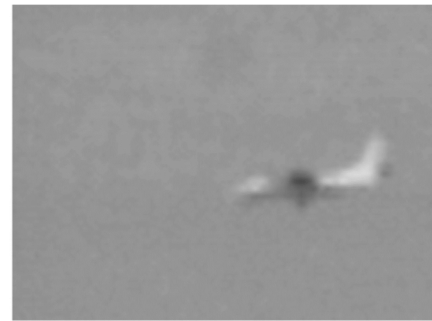
Недостатком предложенного подхода к вычислению дальности до объекта является использование корреляционного алгоритма измерения координат с двумерной критериальной функцией для определения диспаратности. Вычислительная сложность данного алгоритма растет пропорционально увеличению размера эталонного изображения объекта. При реализации алгоритма в бортовой системе обработки изображений реального времени аппаратные ресурсы ограничены количеством доступных элементов и объемом блочной памяти кристалла ПЛИС. Таким образом, при достижении размера эталона  $N \times N$  пикселей выдача информации о дальности до объекта в режиме реального времени становится невозможна. В таком случае, при вычислении дальности происходит пропуск кадров и необходимо переходить к прогнозированию дальности, что ведет к снижению точности.

Относительная навигация летательных аппаратов обычно осуществляется в относительно хороших погодных условиях. Таким образом, на изображениях средняя яркость наблюдаемого воздушного объекта будет отличаться от средней яркости фона. При таких фоно-

целевых условиях для определения значения  $\alpha^*(n)$  вместо двумерной критериальной функции (2) можно использовать одномерную:

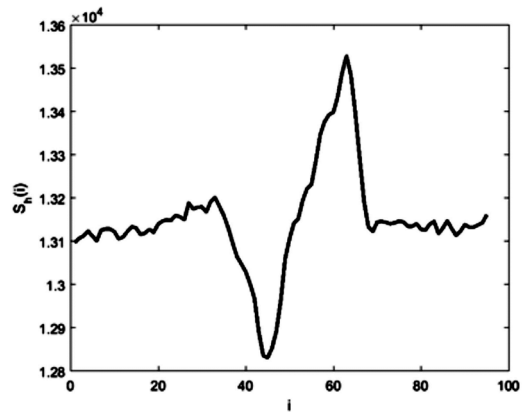


а) эталонное изображение, сформированное левым датчиком

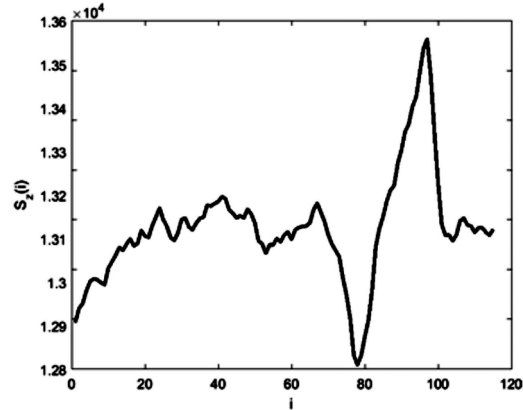


б) изображение зоны поиска, сформированное правым датчиком

Рис. 1. Изображения, формируемые датчиками стереоскопической СТЗ



а) для эталонного изображения



б) для изображения зоны поиска

Рис. 2. Результат суммирования яркостей изображений, представленных на рис. 1 по оси ординат

$$G_n(\alpha) = \sum_{i \in H} |S_z(i + \alpha, n) - S_H(i, n)|, \quad (5)$$

где  $S_z(i, n) = \sum_{j \in Z} l_2(i, j)$  и  $S_H(i, n) = \sum_{j \in H} h_1(i, j)$  – одно-

мерные функции, формируемые на основе суммирования изображения зоны поиска  $Z$  и эталонного изображения  $h_1$  соответственно вдоль оси ординат. На рис. 1,а приведен пример эталонного изображения, сформированного левым видеодатчиком, а на рис. 1,б – изображения зоны поиска, сформированного правым видеодатчиком. На рис. 2,а и 2,б приведены функции  $S_H(i, n)$  и  $S_z(i, n)$  для этих изображений, соответственно.

Преимуществом данного алгоритма является возможность конвейеризации операции суммирования изображения, что позволяет производить данную операцию одновременно с получением изображения из видеодатчика.

### Критерий работоспособности

Использование одномерной критериальной функции (5) значительно сокращает количество вычислительных операций, что позволяет производить вычисление диспаратности по формуле (3) в режиме реального времени. Однако, несоответствие текущих условий наблюдения описанным фоноцелевым условиям, приведет к неработоспособности алгоритма, основанного на корреляционном совмещении одномерных функций и, как следствие, ошибочному определению дальности. Кроме этого невозможно применение одномерной критериальной функции (5) при слежении за малоразмерным объектом.

Для вычисления диспаратности при наблюдении объекта, размеры которого не превышают  $N \times N$  пикселей, целесообразно использовать корреляционный алгоритм измерения координат с двумерной критериальной функцией (2). При размерах объекта более чем  $N \times N$  пикселей необходимо на каждом кадре оценивать работоспособность алгоритма, основанного на корреляционном совмещении одномерных функций, и осуществлять переключение между алгоритмами вычисления диспаратности. В случае, если оценка работоспособности алгоритма, основанного на корреляционном совмещении одномерных функций показывает его несостоятельность, необходимо продолжить использование алгоритма измерения координат с двумерной критериальной функцией, несмотря на невозможность работы в режиме реального времени. Недостающие оценки дальности должны быть получены с использование методов экстраполяции.

Оценить эффективность алгоритма можно, введя критерий работоспособности, который будет служить индикатором качества оценки величины сдвига объекта и при этом не будет опираться на эталонные данные о местоположении объекта [16].

Эффективность применения алгоритма вычисления диспаратности, основанного на корреляционном совмещении одномерных функций, зависит от того насколько средняя яркость объекта отличается от сред-

ней яркости фона. Поэтому, в качестве критерия работоспособности можно рассматривать величину определяемую выражением:

$$KF = \begin{cases} 1, & \text{если } m_\phi + k \cdot \sigma_\phi < m_o - k \cdot \sigma_o, m_\phi < m_o \\ 1, & \text{если } m_\phi + k \cdot \sigma_\phi > m_o - k \cdot \sigma_o, m_\phi > m_o \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (6)$$

где  $m_\phi, m_o$  – математическое ожидание множества точек фона и объекта,  $\sigma_\phi, \sigma_o$  – среднеквадратичное отклонение соответствующих множеств,  $k$  – коэффициент, подбираемый экспериментальным путем (на практике используется  $k = 3$ ). Математическое ожидание и СКО рассчитываются для левого изображения. При этом в качестве множества, содержащего точки объекта, рассматривается эталонное изображение  $h_1(i, j, n)$ . В качестве множества точек фона рассматривается разность между множеством эталонных точек и множеством точек, принадлежащих области, центр которой соответствует центру эталона, а размеры равны размерам зоны поиска.

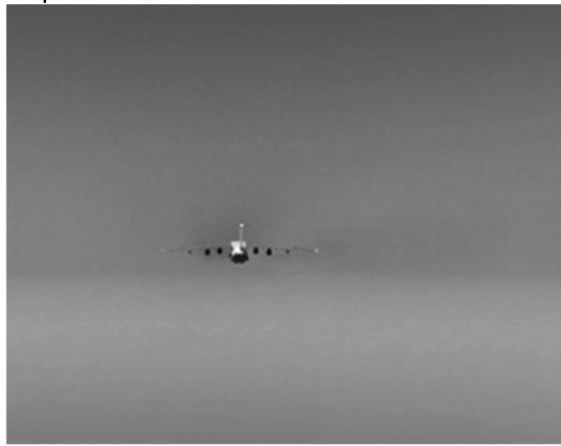
В случае, когда критерий работоспособности  $KF$  принимает единичное значение, измерение диспаратности осуществляется алгоритмом, основанном на корреляционном совмещении одномерных функций.

### Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований использовалось двенадцать синтезированных видеопоследовательностей. Сюжеты сформированы в видимом диапазоне стереоскопической СТЗ с стереобазой 25 см. Размер обрабатываемых изображений составлял  $720 \times 576$  пикселей. Сюжеты содержат запись сближения БПЛА с воздушным объектом. В процессе сближения габариты наблюдаемого объекта меняются от  $7 \times 7$  пикселей до размеров, при которых объект выходит за пределы поле зрения видеодатчика. Воздушный объект на сюжетах наблюдается на фоне ясного, облачного или звездного неба. Для синтеза видеопоследовательностей использовались среды моделирования Orbiter и DCS. Формирование сюжетов для экспериментальных исследований в среде моделирования позволяет получить информацию об эталонной дальности до воздушного объекта. На рис. 3 приведены примеры кадров синтезированных сюжетов.

Для оценки эффективности предлагаемого подхода оценивалась относительная ошибка определения дальности. Относительная ошибка вначале усреднялась на интервалах равных 100 метрам для каждого сюжета. После этого производилось усреднение значений ошибок на интервалах по всему набору сюжетов. В табл. 1 приведены результаты исследований определения дальности с тремя способами вычисления диспаратности использованием:

- корреляционного алгоритма измерения координат с двумерной критериальной функцией (способ № 1);
- алгоритма, основанного на корреляционном совмещении одномерных функций (способ № 2);
- переключения между способом № 1 и способом № 2 (способ № 3).



а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Примеры кадров из тестовых сюжетов: а), б) на фоне ясного неба, в), г) на фоне ночного неба

Таблица 1. Относительная ошибка определения дальности до объекта

Дальность, в метрах	Относительная ошибка определения дальности, в %		
	Способ № 1	Способ № 2	Способ № 3
900-1000	6	16	6
800-900	9,6	13	9,6
700-800	5	8	5
600-700	6	7,5	6
500-600	5,3	5,7	5,7
400-500	4,9	5,3	5,3
300-400	3,6	4,1	4,1
200-300	2,5	2,9	2,9
100-200	1,7	1,9	1,9
50-100	1	1,5	1,5

### Заключение

Результаты исследования эффективности предлагаемого алгоритма позволяют сделать вывод, что определение дальности с использованием алгоритма вычисления диспаратности, основанного на корреляционном совмещении одномерных функций, при дальностях не более 600 метров не значительно уступает в точности по сравнению с алгоритмом, в котором для вычисления диспаратности используется корреляционный алгоритм измерения координат с двумерной критериальной функцией. Использование переключения между алгоритмами вычисления диспаратности позволяет без существенной потери точности в режиме реального

времени определить дальность до объекта. Исследования выполнены при использовании Стипендии Президента РФ СП-2598.2016.5.

### Литература

1. Tirri A.E., Fasano G., Accardo D. et al. Advanced Sensing Issues for UAS Collision Avoidance // International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems, 12-19 (2012).
2. Lai J.S., Mejias L., Ford J.J. Airborne vision based collision detection system // Journal of Field Robotics №28(2), 137-157 (2010).
3. Richard K. Smith. Seventy-Five Years of Inflight Refueling // OhneVerlagsangabe. Washington. – 1998. – 86 p.
4. Li B., Mu C., Wu B. A survey of vision based autonomous aerial refueling for Unmanned Aerial Vehicles // Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), 2012 Third International Conference on. – IEEE, 2012. – pp. 1-6.
5. Старовойтов Е. Современные технические средства пассивной оптической локации // Современная электроника. – 2011. – №2. – С. 40-43.
6. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.
7. Балашов О.Е. Алгоритм обнаружения наземных препятствий при маловысотных полетах // Цифровая обработка сигналов. – 2015. – №3. – С. 15-19.

8. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Ососков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.

9. Карташев В.А., Ефимов С.С. Исследование погрешностей измерения положения объекта стереосистемой с малой базой. Труды конференции «Техническое зрение в системах управления -2012»// М.: Изд. ИКИ РАН, 2012. – С. 170-172.

10. Nussberger A., Grabner H., Gool L.V. Aerial Object Tracking from an Airborne Platform // International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 1284-1293, 2014.

11. Kovács L., Benedek C. Visual real-time detection, recognition and tracking of ground and airborne targets, Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging, Computational Imaging IX, vol. 7873, 1-12 (2011).

12. Balashov O., Muraviev V., Strotov V. Aerial vehicles

collision avoidance using monocular vision // Proc. SPIE 9988, Electro-Optical Remote Sensing X, 99880T

13. Alpatov B., Korepanov S., Strotov V. A composite algorithm for variable size object tracking for high performance FPGA-based on-board vision systems // SPIE Remote Sensing. – International Society for Optics and Photonics, 2014. – С. 92470A-92470A-8

14. Баклицкий В.К., Бочкарёв А.М. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. – М.: Радио и связь, 1986. – 216 с.

15. Деренченко Л.П., Троицкий В.И. Повышение точности корреляционно-экстремальных систем методом интерполяции целевой функции. // Вопросы радиоэлектроники: Сб. науч. тр. – М., 1992. – с. 16-18.

16. Корепанов С.Е., Смирнов С.А., Стротов В.В. Сравнение трех критериев работоспособности многоэталонного алгоритма оценки координат объектов // Цифровая обработка сигналов. – 2016. №3. – С.15-18.

## НОВЫЕ КНИГИ



**Бартенев В.Г. Избранные труды (2006-2016 гг.) – М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2016 г. -478 с.: ил.**

В сборник включены основные публикации за период 2006-2016 гг. Владимира Григорьевича Бартенева – доктора технических наук, профессора кафедры теоретической радиотехники и радиофизики МТУ (МИРЭА). Публикуемые труды сгруппированы по освещенной в них тематике в три раздела, представляющие основные направления научных интересов автора. Первый раздел посвящен теории и практике радиотехнических систем, во втором разделе размещено описание энергосберегающих проектов, третий раздел – это история отечественной радиоэлектроники.

Издание может быть интересно как специалистам, так и широкому кругу читателей.



**Антенны и радары с электронным лучом / Под ред. А.И. Синани, Г.В. Кауфмана – М.: Изд-во «Радиотехника», 2016 г. – 234 с.: ил.**

Рассмотрены наиболее значительные результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области антенной техники. Показана эффективность электронного управления лучом в радаров различного назначения. Проанализированы основные направления развития технологии антенных систем с электронным управлением лучом.

Для научных работников, аспирантов, инженеров-практиков, преподавателей и студентов радиотехнических специальностей.



**Антипенский Р.В., Ложкин К.Ю., Поддубный В.Н., Тюлин А.Е. Аналитические сигналы в статистической радиотехнике – М.: «Радиотехника», 2016 г. – 176 с.: ил.**

Рассмотрены теоретические основы и практическое применение аналитических (гильбертовских) сигналов, использование которых является развитием символического метода анализа радиотехнических процессов и цепей.

Изложены основные понятия, определения и свойства гильбертовских сигналов, даны примеры вычисления прямого и обратного преобразования Гильберта, найдены спектральные функции аналитических сигналов.

Для инженеров, научных работников, специализирующихся в области радиотехники и связи, преподавателей, аспирантов и адъюнктов.