

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, И.В. КОРЫТЦЕВ, канд. техн. наук,
С.А. ШЕЙКО, канд. техн. наук, В.Н. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук,
О.В. ЗУБКОВ, канд. техн. наук, С.И. БАБКИН, канд. техн. наук*

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ И ИЗМЕРЕНИЯ ИХ КООРДИНАТ

Введение

Оптико-электронные обнаружители воздушных объектов обеспечивают возможность распознавания этих объектов на фоне различных оптических засветок, точного измерения дальности до объектов и определения угловых координат. Перспективными являются пассивные проективные методы, базирующиеся на применении видео камер с фоточувствительными матрицами дневного, ночного и теплового видения.

Оптико-электронные методы (ОЭМ) в режимах измерений характеризуются высокой точностью, что обуславливает их успешную интеграцию с радиоэлектронными комплексами разного назначения. Данный анализ проведен с целью выбрать и исследовать ОЭМ, способный решать задачи обнаружения и определения координат малых беспилотных летательных аппаратов. Интерес представляют методы, позволяющие автоматизировать процессы обнаружения воздушных объектов и измерения их координат. Для конкретики рассмотрим различные ОЭМ измерения дальности до объектов. Эти ОЭМ можно классифицировать по физическому принципу следующим образом (рис. 1):

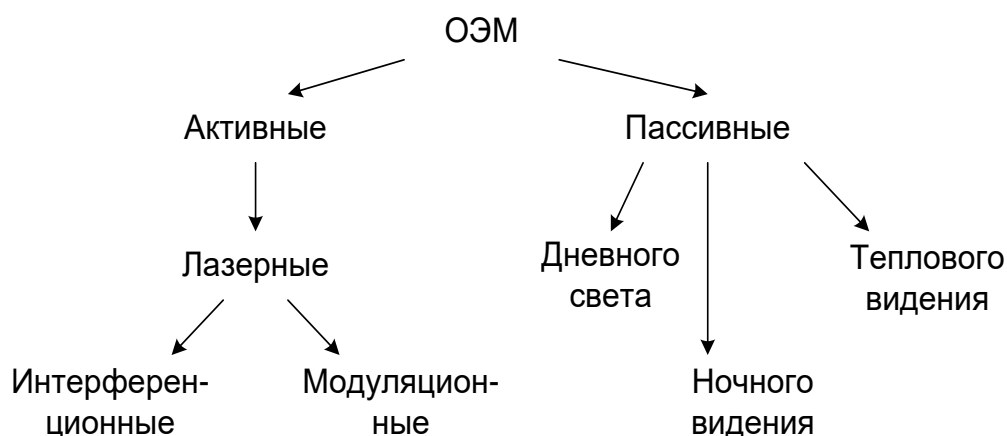


Рис. 1. Классификация ОЭМ по физическому принципу

1. Активные ОЭМ измерения дальности

Активные ОЭМ представляются, в основном, большой группой лазерных методов. Активные светолучевые методы уступают лазерным по всем показателям и более не используются. Лазерные ОЭМ оперируют с направляемым на объект лазерным лучом или с лучом, сканирующим пространство по определенному закону [1 – 3]. Отраженный объектом принимаемый сигнал позволяет обнаружить объект и по своему запаздыванию определить дальность до него.

Интерференционные методы измерения дальности D базируются на подсчете числа целых фазовых циклов N и дробной части цикла Δ в принимаемом сигнале [4, 5]

$$D = \lambda(N + \Delta)/2, \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения.

Измерения проводят дискретно специальными счетчиками фазовых циклов [6, 7]. Системы, реализующие интерференционные методы, обладают высокой точностью, необходимостью создания опорного оптического канала, их максимальная дальность действия составляет всего несколько десятков метров. Для ее увеличения применяют многочастотные лазеры [8].

Модуляционные ОЭМ используют импульсную, частотную либо фазовую модуляцию лазерного излучения.

В *импульсных* дальномерах излучение является прерывистым, применяют твердотельные рубиновые и неодимовые лазеры. Дальность определяется путем измерения времени t , затраченного излученным импульсом на прохождение двойного расстояния:

$$D = ct/2n \approx cm/2nf_{ки}, \quad (2)$$

где c – скорость света; n – показатель преломления среды; m и $f_{ки}$ – число калибровочных временных импульсов, зарегистрированных в мерном интервале t , и их частота следования.

Для повышения точности и дальности измерений используют некогерентное накопление принимаемых сигналов [9, 10]. Максимальная дальность действия импульсных лазерных дальномеров может составлять, в условиях ясного неба, 20 – 30 км при абсолютной погрешности $\pm 0,5$ м.

Частотная модуляция лазерного излучения реализуется путем изменения параметров оптического резонатора лазера [11] по симметричному пилообразному закону, при этом формируется непрерывный лазерный луч постоянной интенсивности, но с изменяющейся по такому же закону частотой. Отраженный объектом сигнал детектируется, усиливается, подвергается частотному анализу на каждом полупериоде модулирующего сигнала с периодом T_m и сравнивается в частотном плане с текущим модулирующим сигналом [12, 13]. Появление разностной частоты f_p обусловлено наличием цели на определенной дальности, и сигнал приходит от нее с определенным значением частоты, преодолев двойную дальность. Наличие нескольких разностных частот указывает на присутствие нескольких объектов на соответствующих дальностях

$$D = cT_m f_p / 4n(f_{max} - f_{min}), \quad (3)$$

где f_{max} и f_{min} – соответственно максимальная и минимальная частоты модулирующего сигнала.

Совместная суммарно-разностная обработка разностных сигналов по полупериодам позволяет отдельно оценить дальности до целей и их радиальные скорости. Однозначное измерение дальности и скорости возможно в интервале

$$\Delta D = c T_m / 8. \quad (4)$$

В *фазовых лазерных дальномерах* используется метод сравнения фаз принимаемого и излучаемого световых потоков:

$$D = c\varphi / 4\pi f_m, \quad (5)$$

где φ – разность фаз; f_m – частота модуляции.

Разность фаз должна быть меньше 180° для устранения неоднозначности оценки дальности, что обеспечивается надлежащим выбором частоты модуляции. Обычно используют несколько модулирующих частот [8, 14]. Однозначная оценка дальности может быть также получена подсчетом полных циклов N изменения фазы модулирующего сигнала и дробной части цикла Δ на интервале запаздывания отраженного сигнала:

$$D = c(N + \Delta) / 2nf_m. \quad (6)$$

Количество циклов определяют, в основном, методом кратных частот, когда при сравнении фаз используется не одно модулирующее колебание, а несколько с кратными убывающими частотами [15, 16].

Частотный и фазовый методы лазерного измерения дальности обладают высокой точностью, абсолютная погрешность измерения не хуже $\pm 10^{-2}$ м. Дальность действия обычно не превышает 1 км.

Рассмотренные активные методы обладают высокой точностью, но требуют значительных энергетических затрат и не обеспечивают скрытность работы.

2. Пассивные ОЭМ измерения дальности

2.1. Особенности матричных фоточувствительных сенсоров

Особый интерес представляют методы, не требующие участия зрительного аппарата человека в снятии измерительных отсчетов и обеспечивающие полную автоматизацию принятия решения [17]. Этому способствует прогресс в технологиях создания фоточувствительных сенсоров в виде матриц, чувствительных в области дневного света 0,4 – 0,7 мкм [18 – 20], ночного видения 0,7 – 1,4 мкм – это диапазон ближнего инфракрасного (ИК) света [21 – 23] и теплового видения 1 – 20 мкм [24, 25]. Объективом проецируется изображение объекта на фоточувствительную матрицу, отображающую его конфигурацию и являющуюся, дополнительно, точным двумерным цифровым устройством для определения линейных размеров объекта. Наибольшее применение находят ПЗС (приборы с зарядовой связью) и микроболометрические матрицы; КМОП-матрицы (комплементарный металл-оксид-полупроводник) обладают высоким уровнем шума, поэтому в оптических обнаружителях объектов и измерителях их координат они не используются.

В диапазоне белого света эффективно работают кремниевые ПЗС-матрицы, максимум их спектральной характеристики находится в области 1,1 мкм. Поэтому они находят применение, как в оптических измерительных системах дневного света, так и системах ночного видения в ближнем ИК диапазоне [22, 23]. Системы очень чувствительные, и в системах дневного света перед ПЗС матрицей устанавливается оптический фильтр, отсекающий излучения с длинами волн более 0,7 мкм.

В системах ночного видения ближнего ИК диапазона применяют кремниевые ПЗС-матрицы с ИК-подсветкой объекта, что делает систему уже активной, либо кремниевые ПЗС-матрицы с электронными умножителями. При кратности умножения выходного сигнала 10^3 система обнаруживает воздушный объект при его освещенности естественным светом ночного звездного неба $5 \cdot 10^{-4}$ лк [23]. Разрешение ПЗС матриц уже превышает величину, определяемую стандартом 4К, что наряду с высоким качеством изображения и точностью измерения линейных размеров объектов вызывает также необходимость передачи и обработки высокоскоростных информационных потоков.

Микроболометрические матрицы включают в себя активные элементы, сопротивление которых изменяется под действием тепла слабого оптического излучения [26, 27]. Особый интерес представляют матрицы диапазона 7 – 14 мкм, совпадающего с окном прозрачности в нижней атмосфере и с максимумом излучательной способности воздушных объектов в диапазоне температур от -50 °С до $+500$ °С. Температурная чувствительность матриц уже ниже 10 мК, а количество элементов разрешения достигло 1024 x 768. Эти матрицы могут обеспечить работу оптико-электронных систем во всех диапазонах дневной и ночной освещенностей и даже в условиях тумана, дымки, а также при постановке искусственных помех – засветок, задымления [28].

Рассмотренные фоточувствительные сенсоры, выявляющие воздушные объекты, как днем, так и ночью имеют матричную структуру и могут быть интегрированы в единую оптико-электронную систему обнаружения и измерения дальности.

2.2. ОЭМ измерения дальности с использованием матричных сенсоров

ОЭМ с матричными сенсорами подразделяются на однокамерные и стереоскопические.

Однокамерные ОЭМ. Метод измерения дальности до объектов по их изображениям, рассмотренный в работе [29], предполагает получение оптического изображения движущегося воздушного объекта из одной точки измерений, его преобразование в цифровое, распознавание объекта по оцифрованному изображению и определение дальности до движущегося объекта по формуле

$$D = FL/l, \quad (7)$$

где F – фокусное расстояние оптической системы, L – фактический линейный размер распознанного объекта по базе данных, l – соответствующий линейный размер изображения движущегося воздушного объекта на фоточувствительной матрице с учетом проекционных искажений.

Этот метод обладает низкой точностью, так как используется фактический линейный размер объекта, определяемого по распознаванию, а объект может быть не распознан, распознан ошибочно либо распознан правильно, но с другой модификацией. К тому же, учет проекционных искажений соответствующего линейного размера изображения требует знания многих параметров полета объекта (азимут, высота и углы тангажа, крена, рыскания), что делает задачу трудновыполнимой и решаемой с большим приближением.

Способ измерения дальности до объекта по его изображениям из двух точек [30] одной камерой с фокусным расстоянием объектива F включает измерение размеров A_1 изображения объекта и координат его центра X_1, Y_1 в 1-й точке, перемещение средства наблюдения под углом к оптической оси на определенное расстояние S , измерение размеров изображения объекта A_2 и координат центра изображения объекта X_2, Y_2 во второй точке, в процессе перемещения ориентацию камеры не меняют, а после перемещения измеряют сдвиг изображения B по выражению

$$B = [(Y_1 - Y_2)^2 + (X_1 - X_2)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

Затем сравнивают сдвиг изображения B и изменения размеров изображения объекта $\Delta A = A_2 - A_1$, и в случае, если отсутствуют условия для измерения угла между направлением перемещения камеры и оптической осью, дальность D определяют по выражению

$$D = S / (1 - K \cos \alpha + K^2)^{1/2}, \quad (9)$$

где $K = A_1/A_2$; α – угол визирования объекта ($\alpha = \arctg(B/F)$); S – величина перемещения камеры.

Стереоскопические ОЭМ. Эти методы связаны с построением более сложных оптико-электронных систем, обеспечивающих более высокую точность измерения дальности при меньших временных затратах.

Стереоскопический ОЭМ измерения дальности с использованием матричных сенсоров приведен в работе [31]. Метод базируется на использовании двух цифровых камер, разнесенных в пространстве по горизонтали на известное расстояние. Дальность до объекта вычисляется путем определения сдвига между изображениями по положению максимального значения двумерной нормированной корреляционной функции в субпиксельном диапазоне. При этом левая и правая камеры установлены на внутренних рамах своих кардановых подвесов, каждый из которых содержит внешнюю и внутреннюю рамы, на осях которых установлены датчики угла поворота рам подвеса. Кроме того, левая и правая камеры, а также датчики угла поворота рам подвеса выполнены с возможностью передачи в вычислительный блок видеоданных и данных о текущей пространственной ориентации камер. Дальность до выделенной области объекта определяют из выражения, учитывающего отклонение от горизонтальной линии положения двух цифровых фотокамер:

$$D = \frac{fB}{\Delta l_z} \cos \left(\arctg \frac{\Delta l_z}{\Delta l_x} \right), \quad (10)$$

где B – расстояние между точками съемки в пространстве, f – фокусное расстояние фотокамер, Δl_{Γ} – сдвиг между изображениями объекта по горизонтальной оси, $\Delta l_{\text{В}}$ – сдвиг между изображениями объекта по вертикальной оси. Вычислительный блок содержит обрабатывающую систему, являющуюся удаленным компьютером, таким как ноутбук или персональный компьютер (рабочая станция), и пользовательский интерфейс, обеспечивающий выбор пользователем изображений и ввод команд обработки. Технический результат заключается в возможности изменения параметров рабочей зоны и в уменьшении суммарного времени на предварительную настройку дальномера и процесс измерений. Однако взаимная двухмерная корреляционная обработка областей изображений, занимаемых объектом, требует значительных массивов данных и становится невозможной для малых удаленных объектов. К тому же требование присутствия оператора также не является положительным фактором метода.

В работе [32] представлен метод определения дальностей до объектов в пассивных системах оптического, инфракрасного и теплового видения предназначенных для наблюдения за малоразмерными объектами. В системах оптического и инфракрасного диапазонов сигналы отражения и излучения от объектов проходят через оптические линзы, преобразуются в уровни амплитуды и отображаются на матрицах двух камер, взаимно удаленных в пространстве и образующих стереопары кадров изображений объекта. Полученные изображения объектов в k -х матрицах ($k=1, 2$) сегментируются выделением однородных по амплитуде подобластей с помощью известных операций сегментации, например [33], и каждый сегмент представляется вектором параметров, включающим координаты центра сегмента, среднюю амплитуду и геометрические характеристики. Для измерения дальности до объекта рассматривается пара сопряженных точек $V_k=(x_k, y_k, 1)$, $k=1, 2$ – центров сегментов, отображающих центр объекта в прямоугольных координатах двух матриц оптического изображения (единица замещает неизвестную третью координату). Для известных матриц внутренних параметров камер A_k , $k=1, 2$, зависящих от фокусных расстояний f_k , устанавливается связь $Z_k V_k = A_k M_k$ [1], где M_k – центр объекта в прямоугольной системе k -й камеры, совмещенной с ее оптическим центром. Для найденных центров m сегментов определяют орты $a_1(i)$ векторов i -х направлений на центры объектов первой камеры и орты $a_2(j)$ векторов j -х направлений на центры объектов второй камеры, затем для всех m вариантов соединения ортов $a_1(i)$ и $a_2(j_i)$ в m неповторяющихся сопряженных парах, где $j_i \in \{1, 2, \dots, m\}$ находят оценки дальностей $r_1(i)$ и $r_2(j_i)$ по критерию минимума квадрата евклидовой нормы вектора e_i ошибок сопряжения ортов:

$$J(r_1(i), r_2(j_i)) = \|e\|^2 = \|r_1(i)a_1(i) - r_2(j_i)Pa_2(j_i) - b\|^2, \quad (11)$$

на этапе расчетов выполняют операции минимизации функции $J(r_1, r_2)$ в (11) по r_1 и r_2 .

Из m вариантов соединения ортов в m неповторяющихся пар $a_1(i)$ и $a_2(j_i)$, $j_i \in \{1, 2, \dots, m\}$ выбирают вариант с наименьшим значением показателя правильности сопряжения.

При этом получают оценки дальностей

$$\hat{r}_1(i) \text{ и } \hat{r}_2(j_i), \quad i = 1 \dots m. \quad (12)$$

Затем вычисляют оценки пространственных координат m объектов в системах координат двух камер

$$\bar{M}_1(i) = \hat{r}_1(i)a_1(i), \quad \bar{M}_2(j_i) = \hat{r}_2(j_i)a_2(j_i), \quad i = 1 \dots m. \quad (13)$$

Рассмотренный метод позволяет обрабатывать изображения множества воздушных объектов, получаемых двумя неидентичными видеокамерами, разнесенными на определенное расстояние друг от друга и без жесткой связи между ними, но требуется предварительное определение внутренней и внешней матриц параметров камер с высокой точностью, поскольку они неоднократно участвуют в вычислительной процедуре. Этот метод является также очень вычислительноемким, дважды используется критериальный

подход к определению промежуточных величин – при выборе сопряженных точек и оценок дальностей до объекта. Не показано, как это влияет на точность определения дальности и на оперативность работы систем.

Выводы

ОЭМ измерения дальности до воздушных целей являются очень эффективными, обеспечивая измерения максимальной дальности от 100 – 200 м до 20 – 30 км с абсолютной погрешностью измерений от $\pm 10^{-2}$ м до 0,5 м соответственно.

Наибольшие значения максимальной дальности обеспечиваются импульсными лазерными дальномерами, а в области средних и малых дальностей широко используются частотные и фазовые методы лазерной дальнометрии. Для выполнения конкретных задач лазерные дальномеры хорошо интегрируются с радиоэлектронными комплексами обнаружения и распознавания воздушных целей.

Ограничивающими факторами использования лазерных методов являются наличие низкой облачности, тумана и осадков, а также низкая степень скрытности работы измерительных систем.

Пассивная область оптических безокулярных дальномеров развивается на основе использования матриц дневного, ночного и теплового видения. При этом используются изощренные алгоритмы обработки цифровых изображений, что требует увеличения времени для принятия решений.

Достоинством матричных ОЭМ является возможность одновременного использования всех трех датчиков дневного, ночного и теплового видения, что позволит проводить надежное обнаружение, распознавание и измерение координат малых воздушных объектов.

Список литературы:

1. Аснис Л.А., Васильев В.П. и др. Лазерная дальнометрия. Москва : Радио и связь, 1995. 256с.
2. Бокшанский В.Б., Бондаренко Д.А. и др. Лазерные приборы и методы измерения дальности. Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 92 с.
3. Hammer M., Hebel M., Laurenzis M., Arens M. Lidar-based detection and tracking of small UAVs // International Society for Optics and photonics, 2018. Vol. 10799. P. 107990.
4. Evenson K., Wells J., Speed of light from direct frequency and wavelength measurement of the methane stabilized laser // Phys Rev.Lett. 1972. Vol. 29, No. 19. P. 1346–1349.
5. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. Ленинград : Машиностроение, 1976. 296 с.
6. Bercovich G., Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements // Adv. Opt. Photonic. 2012. P. 441–473.
7. Wu H., Zhang F., Liu T., Absolute distance measurements by chirped pulse interferometry using a femtosecond pulse laser // Opt.Express. 2015. Vol. 23, No.24. P. 31582–31593.
8. Baumann E., Comb-calibrated frequency-modulated continuous wave lidar for absolute distance measurements // Opt. Lett. 2013. Vol. 38, No.12. P. 2026 – 2028.
9. Вильнер В., Лаврюшин А., Рудь Е. Оценка возможностей светолокационного измерителя дальности с накоплением // Фотоника. 2007. С. 22–26.
10. Фуфаев А.В., Фёдорцев Р.В. Повышение точности измерения дистанции в дальномерном канале прибора наблюдения с использованием полупроводникового лазера // Приборы и методы измерений. 2013. №2. С. 95-102.
12. Власов В.Г., Лазнева Э.В. Метод гетеродинного приема излучения, амплитудно-модулированного в диапазоне 5 – 50 МГц, с помощью фотодиода // Опт.- мех. пром. 1968. №10. С. 5 – 8.
13. Попов Ю.В., Утенков Б.И. Методы управления режимом работы фотоэлектронных умножителей // Опт.- мех. пром. 1976. №2. С. 65–71.
14. Zhang W. Comb-referenced frequency sweeping interferometry for precisely measuring large stepped structures // Appl. Opt.2018. Vol. 57, No.5. С. 1247–1253.
15. Shihua Zhang, Zheyi Xu, Benyong Chen, Liping Yan, and Jiandong Xie. Shihua Zhang Sinusoidal phase modulating absolute distance interferometer combining frequency sweeping and multiwavelength intrferometry // Optics Express . Vol. 26. Issue 7. Pp. 9273-9284.
16. Gunnar Arisholm . Combined range ambiguity resolution and noise reduction in lidar signal processing // Opt. Eng. 2018. Vol. 57, No.7. P.73 – 103.
17. Медведев А.В., Гринкевич А.В., Князева С.Н. Современные подходы к созданию пассивных дальномеров // Фотоника. 2017. №8/68. С.30 – 37.

18. Juan Luis Nieves Multispectral synthesis of daylight using a commercial digital CCD // Appl. Opt. 2005. Vol.44, No.27. P. 5696 – 5703.
19. Ямбаев Х.К., Староверов С.З. Особенности фоточувствительных приемников с зарядовой связью и их возможности в геодезии и метрологии // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017.
20. Donald E. Groom. Recent progress on CCDs for astronomical imaging // Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors. 2000. Proc. Vol. 4008.
20. Волков В.Г. Высокочувствительные телевизионные камеры для обеспечения безопасности // Системы управления, связи и безопасности. 2016. №3. С.66 – 94.
21. Night vision technologies handbook. Homeland security. 2013. 34 p.
22. Рева В.П. и др. ПЗС-фотоматрицы с электронным умножением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2017. № 1-2. С.33 – 37.
23. Сизов Ф.Ф., Чувствительность матриц ПЗС с электронным умножением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2018. № 2. С.9 – 14.
24. Стафеев В.И., Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Акимов В.М. и др. Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из Cd_xHg_{1-x}Te // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39, вып. 10. С. 1257-1265.
25. Lohrmann D., Littleton R., Reese C. et al. Uncooled long-wave infrared small pixel focal plane array and system challenges // Opt. Eng. 2013. Vol.52, No.6. 061305.
26. Иванов С. Д., Косцов Э. Г. Автометрия. Тепловые приемники неохлаждаемых многомерных тепловизионных матриц. 2015. Т. 51, № 6. С.79-88.
27. Masafumi Kimata. Uncooled infrared focal plane arrays //wiley.com/doi/full/10.1002/tee. 22563. 2017.
28. Волков В.Г. Тепловизионные приборы для спецтехники //bnti.ru/showart.asp. 2012.
29. Патент RU2680265. Способ определения дальности до движущегося воздушного объекта методом пассивной локации / А.И. Стучилин, заявитель и патентообладатель. 2019.
30. Патент RU 2568335С1. Способ измерения дальности до объекта по его изображениям преимущественно в космосе / А.И. Смирнов, заявитель и патентообладатель. 2015.
31. Патент RU 0002579532 .Оптико-электронный стереоскопический дальномер / А.В. Зубарь, заявитель и патентообладатель. 2016.
32. Патент RU 2681518 Способ определения дальностей до объектов в пассивных системах видения / В.К. Ключко, Нгуен Конг Хоай – авторы. Патентообладатель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Рязанский государственный радиотехнический университет". 2019.

Поступила в редколлегию 16.08.2020

Сведения об авторах:

Карташов Владимир Михайлович – д-р техн. наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедрой медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: volodymyr.kartashov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8335-5373>

Корытцев Игорь Васильевич – канд. техн. наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: igor.koryttsev@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1875-5534>

Шейко Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: sergiy.sheiko@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1638-4478>

Олейников Владимир Николаевич – канд. техн. наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: vladimir.oleinikov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7197-9760>

Зубков Олег Викторович – канд. техн. наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: Oleh.zubkov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8528-6540>

Бабкин Станислав Иванович – канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший научный сотрудник кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: pri.res@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4903-3551>