

УДК 534.2

© Н. П. Красненко, А. С. Раков, Д. С. Раков

МОЩНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ ДЛЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Приведено описание и показано применение мощных излучающих антенных решеток в различных атмосферных приложениях, таких как распространение звуковых волн, оповещение и звуковое вещание, акустическое воздействие на биообъекты, акустическое зондирование атмосферы. Приведены характеристики изделий наиболее известных зарубежных производителей. Рассмотрены отечественные разработки и исследования мощных акустических антенных решеток. Приведены их характеристики.

Кл. сл.: антенная решетка, диаграмма направленности, звуковое давление, дальность действия, звуковое вещание

ВВЕДЕНИЕ

В различных атмосферных приложениях существует потребность в разработке и использовании мощных акустических излучателей [1]. Они используются для исследования распространения звуковых волн, акустического зондирования атмосферы [2, 3], звукового оповещения и вещания на большие расстояния и (или) акустического воздействия на биообъекты [4, 5].

Увеличение дальности действия различных акустических систем требует создания мощных направленных звуковых пучков. Это реализуется с помощью акустических излучающих систем на основе многоэлементных антенных решеток, состоящих из многих отдельных излучателей. Антенная решетка (АР) представляет собой совокупность дискретных элементов, каждый из которых осуществляет когерентно по отношению к остальным излучение (или прием) акустических волн. Форма АР может быть прямоугольной, круглой, шестигранной или любой другой и определяется требованиями к диаграмме направленности (ДН) и конструктивными особенностями системы. Диаграмма направленности антенной решетки формируется в результате интерференции волн, излучаемых отдельными элементами. Достоинством антенной решетки является то, что она позволяет значительно увеличить мощность акустического излучения за счет сложения мощностей единичных излучателей, из которых она состоит. Также она позволяет реализовать требуемую форму диаграммы направленности и малый уровень боковых лепестков (УБЛ). Антенные решетки могут быть достаточно компактными, по сравнению, напри-

мер, с зеркально-параболическими и рупорными антеннами. Также на них можно осуществлять электронное сканирование лучом диаграммы направленности антенны или создавать многолучевые системы.

ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

В области акустического зондирования атмосферы существует ряд разработок систем зондирования (акустических локаторов или содаров) с приемо-передающими антеннами на базе антенных решеток. Например, содар DSDPA.90-24 фирмы Metek [6] (Германия) имеет АР с 64 элементами. Полоса рабочих частот 1000–3000 Гц, максимальная высота измерения — 1000 м, максимальная потребляемая мощность — 800 Вт.

Производится ряд содаров фирмой REMTECH (Франция) с антенными решетками акустической мощности 5–25 Вт, частотой излучения 2500–5000 Гц, числом элементов 25–192. Также имеются и другие разработки содаров, использующие фазированные АР с числом элементов от 32 до 104 и акустической мощностью от 25 до 100 Вт.

Интересны разработки антенных решеток содаров серии FAS фирмой Scintec (Германия). Они предназначены для дистанционного измерения профиля скорости ветра и турбулентности в нижних слоях атмосферы. У трех моделей серии FAS: SFAS, MFAS и XFAS максимальный диапазон измерения может достигать от нескольких сотен метров до километра. Здесь в качестве отдельных элементов решеток (источников и приемников)

Табл. 1. Акустические установки звукового вещания и акустического воздействия

Характеристика	Модель				
	LRAD 1000x	Wattre HS24	Wattre HS60	IMCORP SC3600	MAHD-R
Максимальное относительное звуковое давление на расстоянии, дБ/1 м	152	153	182	134	151
Ширина диаграммы направленности на уровне – 3 дБ, градус	30	10	10	30	30
Диапазон рабочих частот, Гц	720–6600	375–19000	210–10000	500–6500	20–20000
Потребляемая электрическая мощность, максимальная, Вт	900	900	3000	–	2000

использованы пьезоэлектрические преобразователи звука. Особенностью этих содаров являются эффективные антенные решетки, защищенные от осадков, объединяющие частотное и фазовое сканирование ДН с цифровой обработкой сигналов.

Содар фирмы ART (Atmospheric Research Technology, США) Model VT-1 [7] представляет моностатическую систему акустического зондирования. Содар обеспечивает дистанционные измерения профиля скорости ветра до высоты 300 м. Система состоит из 48-элементной акустической антенны, электронного модуля и переносного компьютера с программным обеспечением. Минимальная высота зондирования — 15 м, разрешение по высоте — от 20 м, несущая частота сигнала — 4504 Гц, длительность импульса сигнала — 10 ± 200 мс (регулируемая). Диапазон измерения скорости ветра — 0 ± 25 м/с. Погрешность измерения скорости ветра — ± 0.25 м/с. Погрешность измерения направления ветра — $\pm 2^\circ$.

Излучающие акустические антенные решетки, как уже говорилось выше, используются в научных исследованиях закономерностей распространения звуковых волн в атмосфере, для звукового оповещения и вещания на дальнее расстояние, дистанционного акустического воздействия на биообъекты (человека, животных, в частности для отпугивания птиц в аэропортах). Создан ряд таких установок. Наибольшую известность в мире получила система LRAD 1000 [8] (и ее разновидности) — акустическая система предупреждения и реагирования, производимая компанией American

Technology Corporation (США). Аббревиатура названия установки расшифровывается как "long range acoustic hailing device" — оповещающее устройство дальнего действия. Заявляемое максимальное акустическое давление, приведенное к расстоянию 1 м, составляет 151 дБ, диапазон рабочих частот — от 720 до 6600 Гц, максимальная потребляемая мощность — 480 Вт. В качестве элементов решетки используются рупорные излучатели в количестве 85 шт. Диаметр излучающей системы — 838 мм, толщина — 155 мм. Вес излучающей системы без дополнительных устройств составляет 20.4 кг. Дальность действия — до 1000 м. Широко известность данное устройство получило после рекламы его применения для борьбы с нападением пиратов на судно у берегов Сомали.

Пожалуй, наиболее мощной из рекламируемых известных акустических излучающих систем является акустическая система HS-60 (Hyperspike) компаний Wattre Inc. и Ultra Electronics (США) [9]. В ней, вероятно, применяются электродинамические громкоговорители. Заявляется уровень звукового давления в 182 дБ на расстоянии одного метра от апертуры, а на ста метрах — в 140 дБ. Ширина основного лепестка ДН составляет 10° на частоте 1 кГц. Диапазон частот — $210 \div 10\,000$ Гц. Максимальная потребляемая мощность составляет 3 кВт. Однако эти данные вызывают большое сомнение.

В табл. 1 представлены сравнительные характеристики некоторых из названных моделей



Рис. 1. Акустические излучатели.
а — АИ-40, б — АИ-91М

для звукового вещания и акустического воздействия.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Авторские разработки акустических излучающих систем имеют аналогичные характеристики, а некоторые и превосходят зарубежные изделия. Данные разработки предназначены для проведения различных научных и прикладных исследований в решении задач атмосферной акустики. Были разработаны несколько образцов мобильных излучающих звуковых установок направленного действия. В качестве единичных элементов антенных решеток использованы пьезоэлектрические преобразователи (громкоговорители), развивающие максимальное акустическое давление на резонансной частоте до 115 дБ на расстоянии 1 м. Выбор преобразователей обусловлен такими достоинствами пьезоэлектрических громкоговорителей по сравнению с электродинамическими, как меньшая масса и больший КПД. Недостатками пьезоэлектрических громкоговорителей являются высокочастотность и неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), но даже при использовании широкополосных сигналов в системах звукового вещания они нивелируются с расстоянием фильтрующими свойствами самой атмосферы.

На рис. 1 показан внешний вид двух установок АИ-40, АИ-91М.

Разработанная 40-элементная антенная решетка

АИ-40 предназначена для отработки технических и программных решений по созданию антенных решеток с управляемой характеристикой направленности. Модель излучающей системы АИ-40 состоит из 40 электроакустических излучателей с индивидуальными усилителями. В качестве системы управления было написано специальное программное обеспечение для ПК, а также использованы следующие электронные модули: отладочная плата AD5380 Evaluation Board и отладочная плата Altera Cyclone II FPGA Starter Development Kit. В разработанном макете акустической антенной решетки с электронным управлением лучом диаграммы направленности был использован метод с применением линии задержки.

На рис. 2 представлена блок-схема осуществления управления лучом диаграммы направленности.

Система управления лучом диаграммы направленности предназначена для формирования 40 независимых сигналов в полосе 1–3 кГц и состоит из отладочной платы AD5380 Evaluation Board [10], отладочной платы Altera Cyclone II FPGA Starter Development Kit [11] и компьютера управления. Управление работой системы производится с компьютера через порт RS-232 (Serial Port). Генерация сигнала, задержка сигнала во времени и управление ЦАП осуществляются в микросхеме ПЛИС Altera Cyclone II EP2C20. Преобразование 14-битных цифровых данных в аналоговую форму происходит в микросхеме ЦАП AD5380. Для проверки акустической решетки в качестве источника сигнала используется генератор гармонических

колебаний с частотой 1–3 кГц на основе алгоритма Direct Digital Synthesis (DDS). Линия задержки сигнала генератора реализована на регистре сдвига с изменяемой длиной, что позволяет изменять вносимую задержку в диапазоне 0–400 мкс. Все сорок цифровых потоков с линий задержки объединяются в один, т. к. микросхема AD5380 использует мультиплексированную 14-битную шину данных для загрузки значений всех сорока каналов ЦАП. Аналоговые сигналы с сорока каналов ЦАП

выдаются на разъем IDC40, что позволяет использовать стандартный 40-проводный шлейф от жесткого диска типа IDE/ATA.

В качестве примера на рис. 3 показаны результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов для двух частот и разных углов поворота луча диаграммы направленности. Как видно из приведенных ниже графиков, способ поворота луча диаграммы направленности, осуществленный с помощью линии задержки, дал

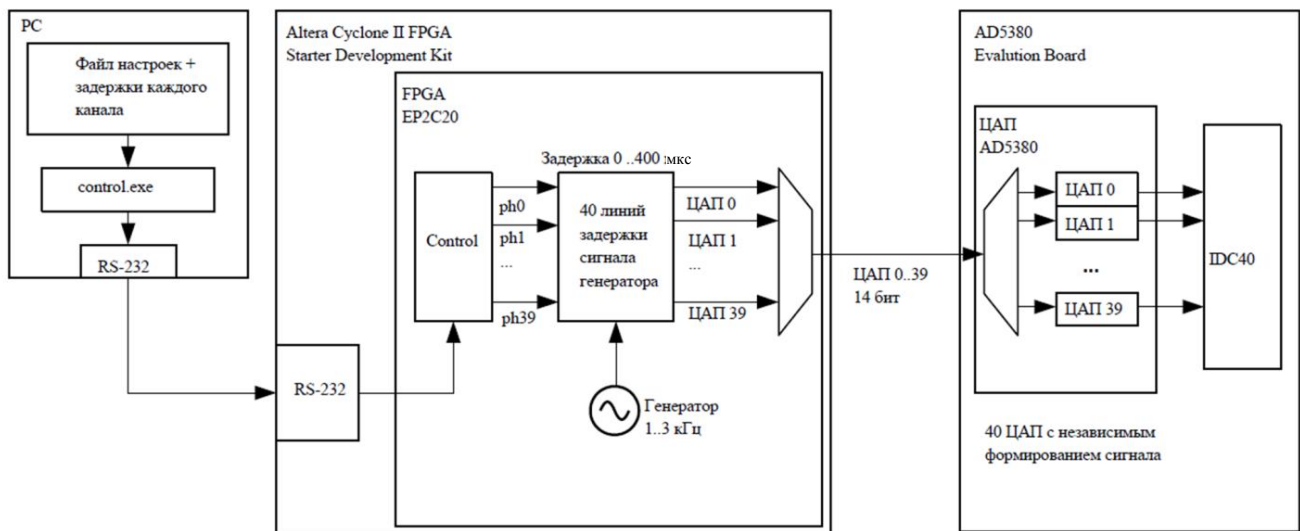


Рис. 2. Структурная схема управления лучом диаграммы направленности

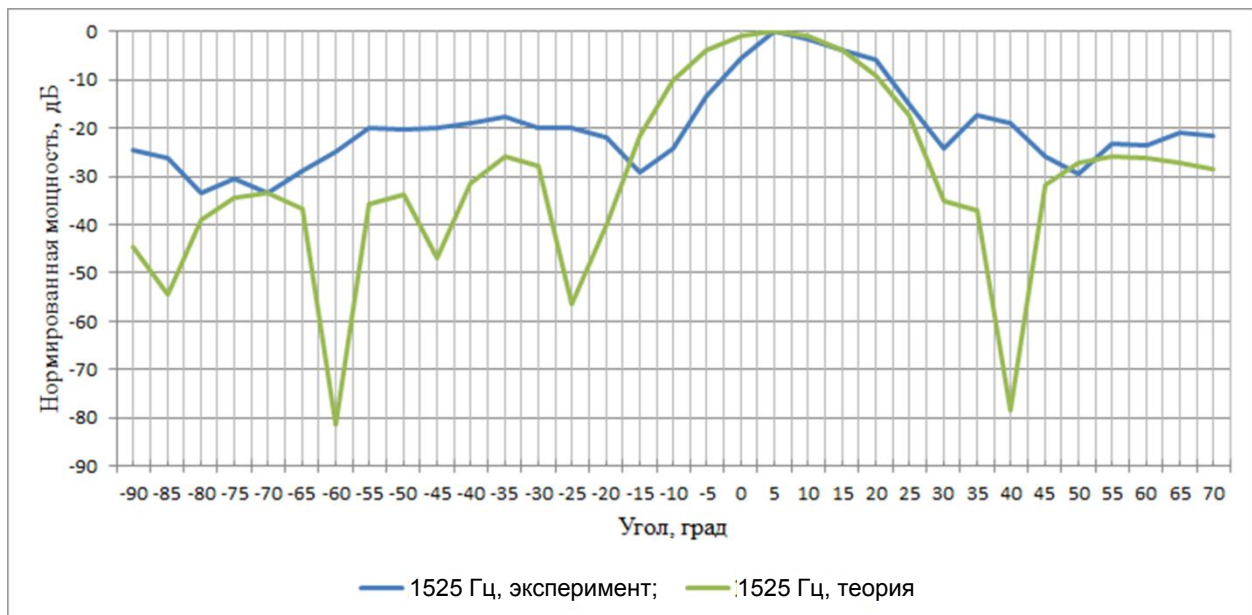


Рис. 3. Сравнение теоретических и экспериментальных исследований угла поворота луча диаграммы направленности решетки для частоты 1525 Гц и угла поворота 13 градусов



Рис. 4. Структурная схема антенной решетки АИ-91М

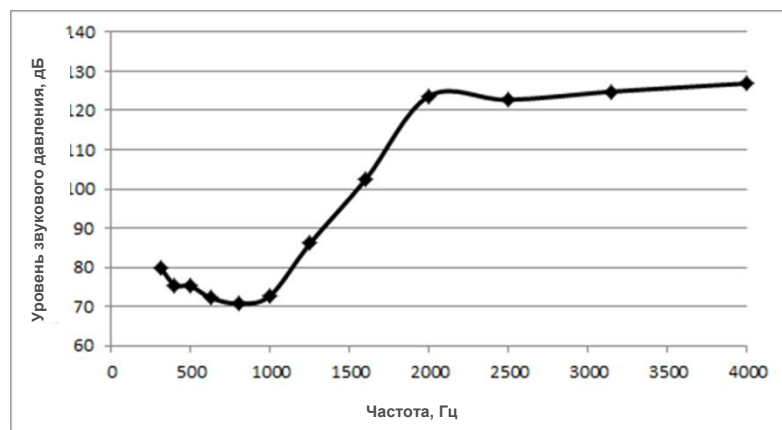


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика излучателя АИ-91М

хорошее согласование теоретических и экспериментальных данных.

Акустический излучатель АИ-91М обеспечивает большую мощность излучения и генерацию узконаправленного луча звуковых волн с максимумом излучения в области частот 2000–3000 Гц. В его состав, кроме непосредственно излучающей системы, входят также портативный компьютер и источник питания. Портативный компьютер (ноутбук) используется для управления в качестве задающего генератора сигналов для тестирования работоспособности излучателя [12] и других дополнительных функций. Использование оригинального программного обеспечения позволяет генерировать различные виды непрерывных и импульсных сигналов, а также изменять их параметры. Для передачи речевых сообщений также может использоваться микрофон. Источником питания для мобильных установок служит аккумуляторная батарея 12 (24) В, обеспечивающая возможность непрерывной работы в течение часа. В стационарных условиях эксплуатации имеется

возможность подключения к сети 220 В. Обобщенная структурная схема АИ-91М представлена на рис. 4.

На рис. 5 приведена АЧХ АИ-91М, измеренная на расстоянии 10 м от излучателя.

Разработанные излучатели использовались при проведении экспериментальных исследований по приземному распространению звуковых волн. Формирование направленного излучения и его калибровка проводится на основе работы [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны зарубежные и отечественные разработки мощных акустических излучающих установок на основе антенных решеток. Приведенные авторские разработки излучающих антенных решеток являются мобильными и автономными устройствами. Их характеристики приведены в табл. 2. В их состав, кроме непосредственно излучающей системы, входят также портативный компьютер и источник питания. Обладая такими достоинствами,

Табл. 2. Характеристики акустических излучателей

Характеристика	Акустический излучатель	
	АИ-40	АИ-91М
Число элементов	40	91
Потребляемая электрическая мощность, Вт	450	1000
Максимальное акустическое давление, дБ/1м	145	155
Габариты, мм	1000 × 1000 × 300	1237 × 1392 × 296
Ширина ДН	15° ... 7° (2000 ... 5000 Гц)	15° ... 7° (2000 ... 5000 Гц)
Резонансная частота, Гц	2350 Гц	2350 Гц
Минимальная рабочая температура, °С	–30 °С	–30 °С
Масса, кг	40	60
Расположение элементов	Квадратная сетка	Гексагональная сетка
Дальность вещания	Не менее 1000 м	Не менее 1500 м

как малые вес, размеры и энергопотребление, мобильность и быстрая разворачиваемость на местности, предложенные модели могут успешно использоваться для дальней звуковой связи в атмосфере, при проведении экспериментов по распространению звука в приземном слое атмосферы в различных метеорологических условиях и при различной подстилающей поверхности, а также для зондирования атмосферы.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 5.3279.2017/4.6) и Сибирского отделения Российской академии наук (проект программы фундаментальных исследований № IX.138.2.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: Водолей, 2001. 278 с.
2. Красненко Н.П., Раков А.С., Раков Д.С., Сандуков Ц.Д. Мощные акустические антенные решетки // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 3. С. 129–130.
3. Красненко Н.П., Раков А.С., Сандуков Ц.Д. Излучающие акустические антенные решетки для атмосферных приложений // Методы и устройства передачи и обработки информации. Межвузовский сборник научных трудов. М., 2009. Вып. 11. С. 164–172.
4. Красненко Н.П., Абрамочкин В.Н., Бухлова Г.В. и др. Звуковое вещание в приземной атмосфере и его прогнозирование // Сб. тр. XV сессии Российского акустического общества "Акустические измерения и стандартизация. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана". М., 2004. Т. 2. С. 110–113.
5. Красненко Н.П. Дальнее звуковое вещание: проблемы, итоги, возможности // Сверхширокополосные сигналы в радиолокационных и акустических системах. Конспекты лекций / Науч. совет по распространению радиоволн. Муром. ин-т Влад. гос. ун-та. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2006. С. 96–115.
6. SODAR DSDPA.90-24. URL: http://www.electrotekintl.com/pdf/Metek%20products/Doppler_Sodar_-24.pdf (дата обращения: 25.05.2018).
7. Model VT-1 Specifications. URL: <http://www.sodar.com/products/Model%20VT1%20Specs.html> (дата обращения: 25.05.2018).
8. LRAD 1000 Specifications. URL: https://www.lradx.com/lrad_products/lrad-1000/#get_a_quote (дата обращения: 25.05.2018).
9. Most powerful electro-acoustic speaker. URL: <http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/most-powerful-electro-acoustic-speaker> (дата обращения: 25.05.2018).
10. Cyclone II FPGA Starter Development KitURL. URL: <http://www.altera.com/products/devkits/altera/kit-cyc2->

2C20N.html (дата обращения: 25.05.2018).

11. AD5380 Evaluation Board. URL:

[http://www.analog.com/ru/evaluation/eval-](http://www.analog.com/ru/evaluation/eval-ad5380/eb.html)

[ad5380/eb.html](http://www.analog.com/ru/evaluation/eval-ad5380/eb.html) (дата обращения: 25.05.2018).

12. Патент РФ № 2499302, 2011. 2013.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

(Красненко Н.П., Раков А.С., Раков Д.С.)

Контакты: *Красненко Николай Петрович,*

krasnenko@imces.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск

(Красненко Н.П., Раков А.С.)

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

(Раков Д.С.)

Материал поступил в редакцию 28.06.2018

POWERFUL ACOUSTIC PHASED ARRAY FOR ATMOSPHERIC APPLICATIONS

N. P. Krasnenko^{1,2}, A. S. Rakov^{1,2}, D. S. Rakov^{1,3}

¹*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia*

²*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia*

³*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

Design of high-power radiative antenna arrays is described together with their use for various atmospheric applications, such as sound wave propagation, notification and broadcasting, acoustic impact on biological organisms, and acoustic sounding of the atmosphere. Characteristics of the most known foreign manufacturers are given. Domestic products and high-power acoustic antenna arrays are considered. Their characteristics are given.

Keywords: antenna array, directional pattern, sound pressure, range of action, sound broadcasting

REFERENCES

1. Krasnenko N.P. *Akusticheskoe zondirovanie atmosferno-go pograničnogo sloya* [Acoustic sounding of an atmospheric interface]. Tomsk, Vodoley Publ., 2001. 278 p. (In Russ.).
2. Krasnenko N.P., Rakov A.S., Rakov D.S., Sandukov C.D. [Powerful acoustic antenna lattices]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2012, no. 3, pp. 129–130. (In Russ.).
3. Krasnenko N.P., Rakov A.S., Sandukov C.D. [The radiating acoustic antenna lattices for atmospheric applications]. *Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii* [Methods and devices of transfer and information processing]. Interuniversity collection of scientific works, Moscow, 2009, vol. 11, pp. 164–172. (In Russ.).
4. Krasnenko N.P., Abramochkin V.N., Buhlova G.V. et al. [Sound broadcasting in the ground atmosphere and its forecasting]. *Sbornik trudov XV sessii Rossijskogo akusticheskogo obshchestva "Akusticheskie izmereniya i standartizaciya. Ul'trazvuk i ul'trazvukovye tekhnologii. Atmosfernaya akustika. Akustika okeana", T. II* [Proc. of XVth session of the Russian acoustic society "Acoustic measurements and standardization. Ultrasound and ultrasonic technologies. Atmospheric acoustics. Acoustics of the ocean", V. 2], Moscow, 2004. 110–113 pp. (In Russ.).
5. Krasnenko N.P. [Distant sound broadcasting: problems, results, opportunities]. *Sverchshirokopolosnye signaly v radiolokazionnykh i akusticheskikh sistemakh. Konspekty lekziy* [Superbroadband signals in radar-tracking and speaker systems: abstracts of lectures], Murom, Publishing and printing center of MI VLGU, 2006. 96–115 pp. (In Russ.).
6. SODAR DSDPA.90-24. URL: http://www.electrotekintl.com/pdf/Metek%20products/Doppler_Sodar_-24.pdf (accessed: 25.05.2018).
7. Model VT-1 Specifications. URL: <http://www.sodar.com/products/Model%20VT1%20Specs.html> (accessed: 25.05.2018).
8. LRAD 1000 Specifications. URL: https://www.lradx.com/lrad_products/lrad-1000/#get_a_quote (accessed: 25.05.2018).
9. Most powerful electro-acoustic speaker. URL: <http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/most-powerful-electro-acoustic-speaker> (accessed: 25.05.2018).
10. Cyclone II FPGA Starter Development KitURL. URL: <http://www.altera.com/products/devkits/altera/kit-cyc2-2C20N.html> (accessed: 25.05.2018).
11. AD5380 Evaluation Board. URL: <http://www.analog.com/ru/evaluation/eval-ad5380/eb.html> (accessed: 25.05.2018).
12. Patent RF no. 2499302, 2013. Prioritet 2011. (In Russ.).

Contacts: Krasnenko Nikolay Petrovitch,
krasnenko@imces.ru

Article received in edition 28.06.2018