

НОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЗАЩИЩЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Рассмотрена задача непосредственного преобразования акустических сигналов в световые сигналы, что позволяет существенно повысить защищенность входных и выходных цепей волоконно-оптических линий связи. Показано, что существуют разные технологии такого преобразования, проанализированы достоинства и недостатки каждой из них. Основные усилия специалистов направлены сейчас на преодоление технологических проблем, вызванных прежде всего необходимостью обеспечения стабильности работы преобразователей и повышения отношения сигнал – шум. Сделан вывод, что работы, проводимые в области создания акусто-оптических преобразователей подошли к этапу широкого внедрения в промышленное производство.

Ключевые слова: волоконно-оптические линии связи, защита информации, акусто-оптическое преобразование, микрофоны.

Введение

К преимуществам волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), обычно относят: широкополосность, обусловленную чрезвычайно высокой несущей частотой; очень малое затухание светового сигнала в волокне (0,2...0,3 дБ на 1 км при длине волны 1,55 мкм); устойчивость к электромагнитным помехам и погодным условиям; высокий уровень защиты от несанкционированного доступа; электробезопасность; малый вес и объем; невысокую стоимость; долговечность (срок службы ВОЛС составляет не менее 25 лет) [1,2].

Как недостатки ВОЛС можно отметить: относительно высокую стоимость сварки оптических волокон. Для сварки волокон ВОЛС требуется прецизионное, а поэтому дорогое, технологическое оборудование; относительно высокую стоимость активных элементов ВОЛС, преобразующих электрические сигналы в свет и свет в электрические сигналы.

В последние годы чрезвычайно актуальной является задача непосредственного преобразования акустических сигналов в свет и наоборот, что позволяет существенно повысить защищенность входных и выходных цепей ВОЛС [3 – 10].

Целью настоящей работы является анализ известных принципов конструирования преобразователей акустических сигналов в световые сигналы (оптических микрофонов) и поиск путей их дальнейшего совершенствования.

Основная часть

Непосредственными предшественниками оптических микрофонов являются электродинамические, пленочные и пьезоэлектрические микрофоны [11, 12].

Электродинамические микрофоны появились сравнительно поздно из-за отсутствия достаточно мощных постоянных магнитов.

Первый электродинамический ленточный микрофон был создан Г. Олсоном примерно в 1930 г. Промышленный образец появился в 1942 г. в компании RCA. В нем использовалась металлическая слегка гофрированная лента, которая перемещалась под воздействием звуковой волны в магнитном поле, создаваемом полюсами постоянных магнитов. При этом в ленте индуцировался переменный электрический ток. Микрофоны такого типа выпускаются до настоящего времени в достаточно больших количествах.

Первые конструкции электродинамического катушечного микрофона были созданы А. Блюмлайном в 30-х гг. XX века на фирме EMI, а с 1936 г. модель такого микрофона NB1A начала применяться на практике. Позднее с появлением мощных постоянных магнитов начался их промышленный выпуск на фирмах AKG, Neumann и др., и в настоящее время это один их самых массовых типов микрофонов.

Принцип действия катушечных микрофонов основан на том, что при воздействии звуковой волны на легкую диафрагму она начинает колебаться и приводит в движение

связанный с ней проводник (звуковую катушку), который помещен в постоянное магнитное поле. При движении проводника с током в магнитном поле в нем индуцируется электрический сигнал, который затем усиливается и передается для дальнейшей обработки.

Электродинамические микрофоны обладают рядом преимуществ: устойчивостью к перегрузкам, стабильностью работы в различных климатических условиях, прочностью конструкции и др.

Пленочные электретные микрофоны были созданы Сесслером и Вестом в 1962 г. на фирме Bell Labs (США). Для подвижной диафрагмы в них использовалась металлизированная тонкая пленка из стабильного диэлектрика (например, из тефлона), способная накапливать и удерживать заряд. Это позволяло отказаться от устройств, обеспечивающих высокое постоянное напряжение на пластинах конденсатора и значительно упрощала технологию их изготовления. Пленочные электретные микрофоны также нашли в настоящее время широкое применение.

Еще один физический эффект использован при создании пьезоэлектрического микрофона (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид пьезоэлектрического микрофона

Акустические волны заставляют колебаться тонкую диафрагму, соединенную с пьезоэлектрическим кристаллом.

Пьезоэлектрический кристалл поляризуется под воздействием акустического давления (рис. 2).

Такие колебания напряжения, возникшие в результате периодического сжатия кристалла, и позволяют получать полезный сигнал с микрофона.

Пьезоэлектрические микрофоны имеют невысокую чувствительность, поэтому их необходимо размещать как можно ближе к источнику акустического сигнала, в идеале – вплотную. И поэтому, а также в силу своих малых размеров, они часто используются для снятия акустического сигнала прямо с излучающего элемента. Из-за значительной неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) пьезоэлектрические микрофоны редко используются в качестве основного источника акустического сигнала. Чаще такие микрофоны используются для "подкрашивания" сигнала, снятого динамическим или конденсаторным микрофоном.

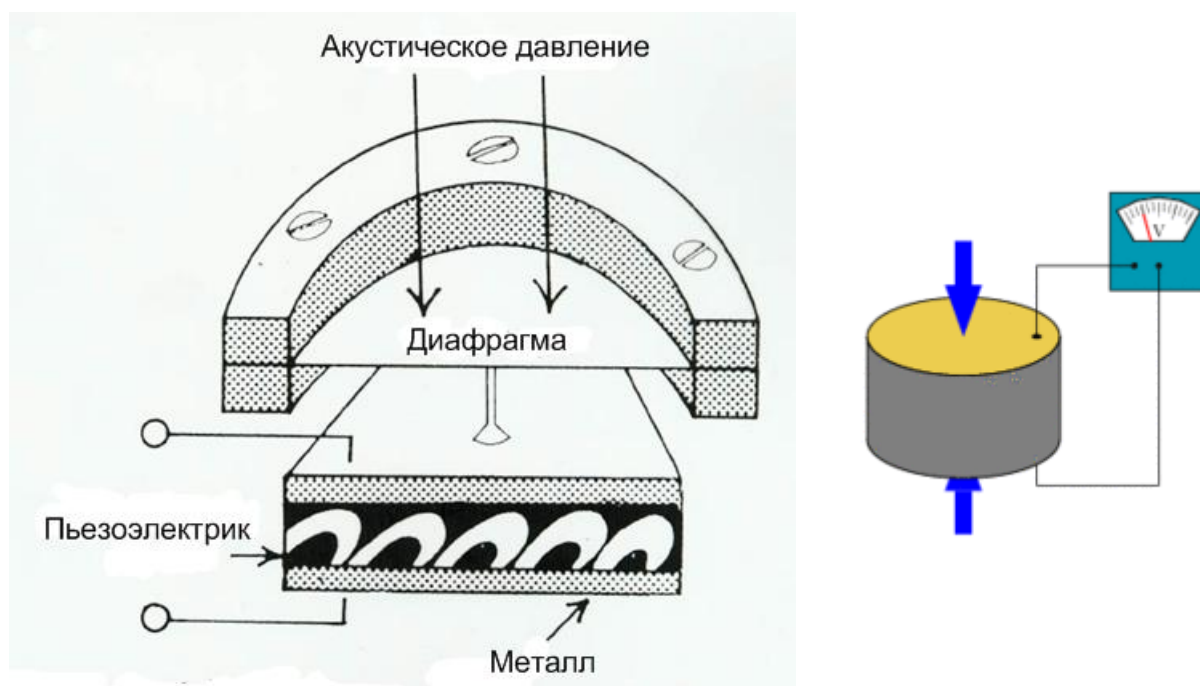


Рис. 2. Принцип работы пьезоэлектрического микрофона

Таким образом, к концу XX в. в электроакустике использовались в основном микрофоны следующих типов: конденсаторные, электретные, динамические катушечные и ленточные, пьезоэлектрические. В оптоволоконных линиях связи они не использовались вообще. Однако поиски новых принципов преобразования акустического сигнала в оптический все время продолжают [13].

Одним из наиболее перспективных направлений, которым на протяжении последних десятилетий занимаются фирма Sennheiser совместно с израильской фирмой Phone-Or, является создание оптических микрофонов [14-19].

Следует правда отметить, что такие микрофоны используются достаточно давно, однако исключительно для разведывательных целей [20-24].

Оптические микрофоны используют принцип модуляции интенсивности лазерного светового луча (рис.3).



Рис. 3. Принцип работы оптического микрофона

Луч света от лазерного источника направляется по оптоволокну и освещает мембрану. При колебаниях мембраны световой поток модулируется (по интенсивности) и проходит по другому оптоволокну, попадая на фотодиод, который преобразует сигнал в переменный ток (рис. 3). При таком принципе действия отсутствует преобразование колебаний мембраны

непосредственно в электрический сигнал как в обычных микрофонах. Мембрана может быть вообще размещена на расстоянии нескольких десятков (сотен) метров от источника света и фотодиода из-за низких потерь сигнала в оптоволокне (потери сигнал/шум составляют меньше 2 дБ на 1 км оптоволокну). Микрофон не излучает электромагнитные волны (ни за счет капсуля, где в других типах микрофонов обычно размещен предусилитель, ни за счет кабелей), и сам нечувствителен к электромагнитным полям. Из-за малых размеров может быть размещен в любом труднодоступном месте (при этом его сложно обнаружить известными методами) и может работать в сильных магнитных, электрических или радиополях.

Малые размеры мембраны оптического микрофона (1,85 x 1,85 мм), где только небольшая площадь используется для модуляции светового луча диаметром менее 0,5 мм, уменьшают переходные и дифракционные искажения и позволяют получить равномерную АЧХ в широком диапазоне частот от нескольких герц до 10 кГц. При оптическом способе считывания сигнала нет фазовых сдвигов на поверхности мембраны, а форма характеристики направленности сохраняется в широком диапазоне частот. С учетом свойств оптоволокну и специальной силиконовой мембраны микрофон может работать в широком температурном диапазоне от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$. Очевидно, что такой микрофон может иметь большой спрос не только в ВОЛС. При этом по мере развития микрооптических технологий (увеличения мощности лазеров, улучшения параметров оптоволокну и т.д.) его стоимость будет снижаться.

Основные усилия разработчиков направлены сейчас на преодоление технологических проблем, вызванных прежде всего необходимостью обеспечения стабильности работы микрофона и оптимизации отношения сигнал – шум. Источником шума является, в первую очередь, фотодетектор. Для снижения шума следует увеличить мощность источника света (за счет применения диодных лазеров высокой яркости) и увеличить точность детектирования смещений мембраны (которая выполняет роль отражающего зеркала) при колебаниях.

Для этого уже разработана специальная легкая свободно подвешиваемая силиконовая мембрана, обладающая высокой чувствительностью и точностью воспроизведения акустического сигнала (рис. 4, а). Главные требования, предъявляемые к мембране: высокая механическая чувствительность (десятые доли микрометра на один паскаль), повышенная отражающая способность центральной части, высокий уровень линейности (по кривой зависимости смещения от звукового давления), стабильность работы при низких и высоких температурах и высокой влажности. В этой связи мембрана, представляющая собой тонкий слой (0,1 мкм) нитрида кремния была специально гофрирована. Свет отражается от ее центрального участка диаметром 0,5 мм, сформированного путем нанесения золота фотолитографическим методом (рис. 4, б).

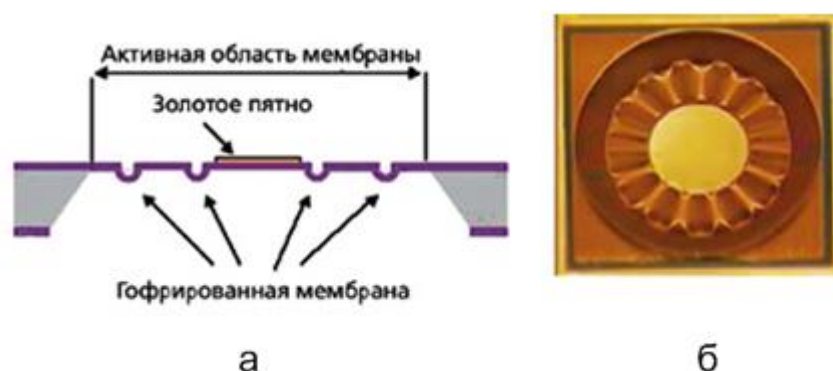


Рис. 4. Конструкция мембраны оптического микрофона

Эта технология изготовления мембраны получила название MEMS (Micro-Electro-Machining System).

Интенсивность модулированного светового луча зависит от геометрии отражающей мембраны, расстояния между концом оптоволокну и поверхностью мембраны и углового положения волокна относительно ее поверхности. Зависимость между интенсивностью отраженного светового луча и расстоянием от конца оптоволокну до поверхности мембраны показана на рис. 5.



Рис. 5. Зависимость интенсивности света от расстояния между мембраной и оптоволокну

В пределах 20...40 мкм она растет относительно линейно, затем достигает максимума (в примере на расстоянии 50 мкм) и начинает спадать. Для сохранения линейности обычно выбирается расстояние на первом участке (порядка 25 мкм). Преобразование механического смещения мембраны в изменение интенсивности света реально происходит не очень эффективно (КПД преобразования не более 5...10%, но у традиционных микрофонов еще меньше).

Принципиально важную роль в повышении интенсивности выходного луча играет выбор углового положения оптоволокну относительно поверхности мембраны.

При создании конструкции оптического микрофона было исследовано два метода детектирования смещений поверхности мембраны: метод контроля бокового смещения светового пятна и конфокальная дефокусирующая схема.

Принцип работы микрофона по первому методу показан на рис. 6.

При колебаниях мембраны происходит боковой сдвиг светового пятна относительно центра принимающего волокна и пропорционально величине этого сдвига уменьшается световая интенсивность в принимающем волокне. Для увеличения точности на оптоволокну со стороны источника устанавливается фокусирующая линза. Угловое расположение волокон оптимизировано с помощью специальной программы ZEMAX. Общий вид капсуля такого микрофона показан на рис. 7. Оптические волокна уложены в специальные канавки на стеклянной плате, на которой установлен микроструктурированный стеклянный чип. Основные причины создания такого интегрированного оптического микрофона заключаются в стремлении снизить его стоимость при массовом производстве, а также уменьшить его размеры (до электретных микрофонов и меньше).

При такой технологии оптический лазер и фотодиод микрофона смонтированы на одной стеклянной плате, отделены друг от друга непрозрачной перегородкой и покрыты сверху эпоксидной резиной. Размер лазера 0,3 x 3 мм, фотодиода – 0,6 x 6 мм, общий размер микрофона: диаметр – 0,6 мм, толщина – 2 мм.

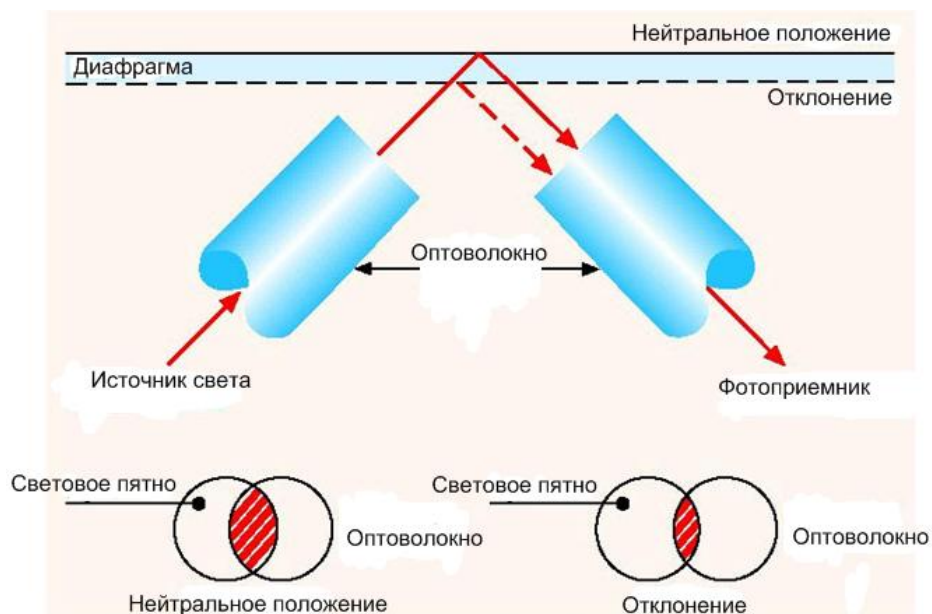


Рис. 6. Принцип работы оптического микрофона по методу контроля смещения бокового луча

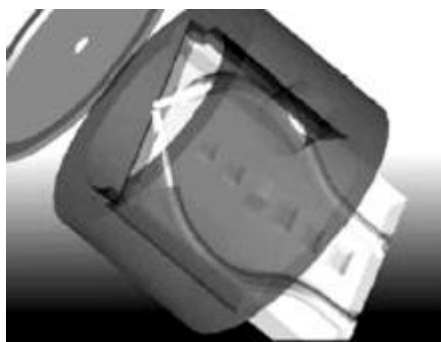


Рис. 7. Конструкция капсулы оптического микрофона для метода контроля смещения бокового луча

Другой принцип, который был реализован в оптических микрофонах, базируется на использовании конфокальной дефокусирующей схемы, структура которой показана на рис. 8.

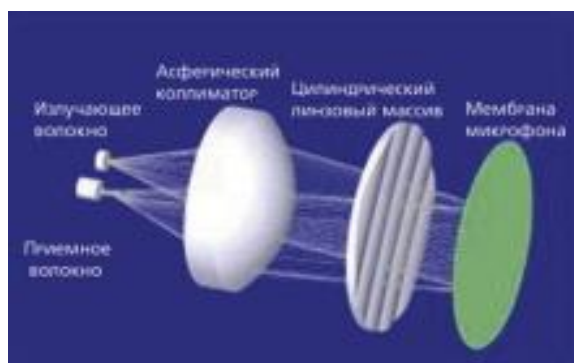


Рис. 8. Схема конфокальной дефокусировки

Луч света от лазера поступает по оптическому волноводу на коллиматор (оптическое устройство для получения пучков параллельных лучей), затем – на набор цилиндрических линз, которые фокусируют луч на поверхности мембраны. Отраженные лучи проходят через ту же систему и точно фокусируются в центре приемного оптоволокна. Если мембрана сдвигается из положения равновесия за счет колебаний, то луч света дефокусируется и интенсивность его в приемном волокне уменьшается. Использование такой схемы позволяет существенно повысить чувствительность системы, но это требует увеличения площади отражающей поверхности на мембране до 5 мм и обеспечения строгой параллельности мембраны относительно линз.

На этом принципе фирмой Sennheiser был реализован оптический микрофон, основные элементы которого показаны на рис. 9.



Рис. 9. Элементы конструкции капсуля оптического микрофона, использующего принцип конфокальной дефокусировки

Частотные характеристики такого микрофона не уступают современным конденсаторным микрофонам. Проблемы, которые возникают в таком микрофоне, связаны с тем, что увеличение площади мембраны до 5 мм (при расстоянии до системы линз 2 мм) снижает его чувствительность на самых высоких частотах. Сейчас ведутся работы по использованию специальной перфорированной системы линз, а также поиски других конструктивных усовершенствований.

Описанные выше микрофоны имеют характеристику направленности в виде восьмерки, поскольку звуковая волна имеет доступ на обе стороны мембраны. Однако можно на основе этой конструкции получить ненаправленный микрофон. Для этого мембрана с волноводами помещается в специальный цилиндр, закрывающий доступ звуковой волны к тыльной стороне мембраны (рис.10).

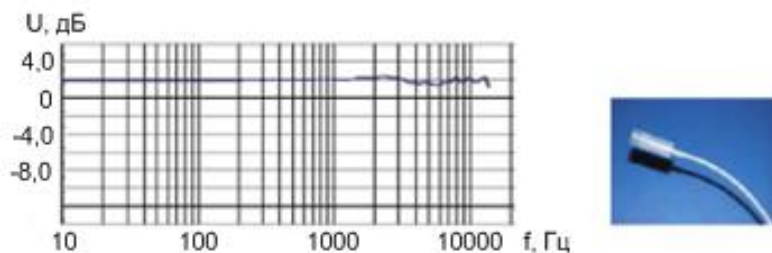


Рис.10. Ненаправленный оптический микрофон

Длина такого микрофона равна примерно 21,5 мм, а его диаметр составляет 6 мм. Амплитудно-частотная характеристика такого микрофона показана на рис. 10. Из этого

рисунка видно, что частотный диапазон микрофона составляет 0,5 Гц ... 10 кГц при неравномерности $\pm 1,5$ дБ.

Поскольку оптические микрофоны используют принцип модуляции интенсивности светового луча, то преобразующая мембрана может вообще размещаться на расстоянии нескольких десятков метров от источника света и фотодиода (из-за низких потерь при передаче сигнала по оптоволокну).

Волоконно-оптический микрофон не производит никаких электромагнитных излучений (ни за счет капсуля, где в других типах микрофонов обычно размещен предусилитель, ни за счет кабелей) и сам нечувствителен к электромагнитным полям. Из-за малых размеров может быть размещен в любом труднодоступном месте (при этом его сложно обнаружить известными методами, в том числе поисковыми приборами - нелинейными локаторами) и может работать в сильных магнитных, электрических или радиополях, в условиях высокой влажности и повышенной температуры.

На рис. 11 показан миниатюрный волоконно-оптический микрофон Optimis 2170, который предназначен для внутреннего и наружного акустического мониторинга при экстремальных температурах.



Рис. 11. Волоконно-оптический микрофон Optimis 2170

Такой микрофон может быть размещен в тяжелой технике, где требуется очень прочный корпус и используются оптоволоконные кабели.

Заключение

Представленные результаты показывают, что работы, проводимые в области создания оптических микрофонов подошли к этапу широкого внедрения в промышленное производство. Несомненно, появление такого микрофона – это значительный шаг в развитии оптоволоконных линий связи и других областях.

Дальнейшие работы должны быть направлены на повышение чувствительности, расширение частотного диапазона, повышение отношения сигнал/шум и конструктивные усовершенствования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розорінов Г.М., Соловійов Д.О. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку: навч. посіб. – 2-е вид., перероб. і допов. – К.: Кафедра, 2012. – 344 с.
2. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / Пер. с англ. под ред. Н.Н. Слепова – М.: Техносфера, 2003. – 448 с.
3. Каток В.Б., Манько А.А., Задорожный М.Д. Защита информации на уровне линейных сооружений волоконно-оптических линий связи от несанкционированного доступа // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні: Тезиси докладів науково-технічної конференції. – Київ, Вип. 3, 2000. – С. 205-213.

4. Iqbal M.Z., Fathallah H., Belhadj N. Optical fiber tapping: Methods and precautions // High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET), 19-21 Dec. 2011, pp. 164 – 168.
5. Корнейчук В. И., Панфилов И. П. Волоконно-оптические системы передачи: учебн. пособ. – Одесса: УГАС, 2001. – 436 с.
6. Jedidi R., Pierre R. High-Order Finite-Element Methods for the Computation of Bending Loss in Optical Waveguides, ILT, Vol. 25, No. 9, September, 2007, pp. 2618-2630.
7. Draka Elite, BendBright-Elite Fiber for Patch Cord, Draka Communications, July, 2010.
8. Ford W. Computer Communications Security: principles, standard protocols, and techniques.– Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1994. – 494 p.
9. Розоринов Г.Н., Фендри Мохаммед Аймен. Защита информации в оптоволоконных кабельных сетях / Сучасний захист інформації. –№4, 2013. – С. 31 -38.
10. Капустян М.В. Оптимізація організації та побудови архітектури захищених корпоративних мереж: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.21 / М.В. Капустян / Держ. ун-т інформ.-комунікац. технологій. – К., 2009. – 20 с.
11. Сапожков М.А. Электроакустика. Учебник для вузов. – М.: Связь, 1978. – 272 с.
12. Сидоров И.Н., Димитров А.А. Микрофоны и телефоны. – М.: Радио и связь, 1993. – 152 с.
13. Ковальчук Ю.О. Метод інфразвукового захисту мовної інформації в приміщенні від можливого витоку оптико-електронним технічним каналом: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.21 / Ю.О. Ковальчук / Харк. нац. ун-т радіоелектрон. — Х., 2009. — 21 с.
14. Брусницин Н.А. Кто подслушивает президентов (От Сталина до Ельцина). М.: Вита Пресс, 2000. – 416 с.
15. Джеффри С. Н. Микрофоны на основе технологии MEMS для поверхностного монтажа / ChipNews, 2003, № 9 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200309/12.html>.
16. Приборы для измерения шума и вибраций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.algoritm.ru/pribor?sid=1>.
17. AKU2000. Product BRIEF Digital-Output CMOS MEMS.
18. Anti-terror equipment: Catalog. – Germany: PK Electronic International FRG, 1998. – 101 p.
19. Anti terror equipment: Catalog. – Germany: PKI Electronic Intelligence, 2008. – 116 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pki-electronic.com/>.
20. Microspie Telefoniche e Ambientali [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.selavio.com/prodotti/microspie>
21. Security and surveillance products. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://endoacustica.com/index_en.htm.
22. Special Equipment. - Germany: SIM Security & Electronic System GmbH, 2006. – 65 p.
23. Хорев А.А. Средства акустической разведки: проводные микрофонные системы и электронные стетоскопы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bnti.ru>.
24. Technical surveillance solutions for operational needs. – United Kingdom: Security Research Limited, 1997. – 22 p.

Надійшла: 21.01.2014 р

Рецензент: д.т.н., с.н.с. Бурячок В.Л.