

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 50.03.05

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЗЛОУМЫШЛЕННИКА

Губарева О.Ю., Гуреев В.О., Чифранов Г.Н.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: o.gubareva@psuti.ru

В работе рассмотрены возможные модели и алгоритмы, основанные на анализе особенностей энергетических и временных характеристик и (или) диаграмм направленности, учитывающие особенности пространственного расположения источника (или источников) сигнала для последующей локализации источника звука, применительно к волоконно-оптическим сенсорным сетям для решения задачи определения с заданной точностью местоположения злоумышленника на охраняемом объекте. В качестве наилучшей была выбрана модель, базирующаяся на оценках разности времени задержки акустических сигналов, в разных точках отсчета характеристики обратного рассеяния оптического волокна распределенного акустического сенсора. В качестве примера представлены результаты вычислений оценок погрешности определения координат источника звука в зависимости от уровня шума в помещении с двумя оптическими волокнами, уложенными параллельно вдоль противоположных стен.

Ключевые слова: DAS, оптическое волокно, распределенный акустический сенсор, ВОЛС, система физической защиты, модель оценки разности времени задержки акустических сигналов, локализация источника звука

Введение

В современных условиях сложной криминальной обстановки, нестабильной политической и экономической ситуации как в мире в целом, так и в РФ в частности вопросы обеспечения безопасности населения и промышленных объектов приобретают особую актуальность. Особую и вполне реальную опасность для крупных производственных, коммерческих, военных и финансовых объектов представляют злонамеренные несанкционированные действия нарушителей: террористов, диверсантов, преступников, экстремистов. Последствия их действий непредсказуемы: от потери имущества до создания чрезвычайной ситуации на объекте (пожар, разрушение, затопление, авария и т. п.). Все вышеперечисленные факторы требуют осуществления мероприятий по противодействию преступным посягательствам и обеспечению безопасности на всех уровнях, из которых исходит угроза.

Одной из эффективных мер по обеспечению безопасности важных промышленных объектов является создание автоматизированной системы охраны и противодействия от несанкционированного проникновения физических лиц – системы физической защиты. В данных системах остро стоит проблема точного определения местоположения злоумышленника на объекте для своевременного реагирования и направления группы охраны для задержания нарушителя.

В статье для решения проблемы определения с заданной точностью местоположения злоумышленника на охраняемом объекте предложено использовать имеющиеся на объекте волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) с установленными на них распределенными акустическими сенсорами – DAS (Distributed Acoustic Sensors) [1–3], с последующим подключением к работе систем телевизионного наблюдения для отслеживания перемещения злоумышленника.

На сегодняшний день сложно найти современный объект, не опутанный оптическим волокном (ОВ) для высокоскоростного обмена данными, ввиду чего целесообразным является его использование для проектирования систем физической защиты, уже имеющихся на объекте ВОЛС.

Обзор существующих методик

В настоящее время для определения нахождения и местоположения злоумышленника на объекте, как правило, используют системы видеонаблюдения, которые легко обмануть, зная место расположения камер на объекте, многие из которых в целях экономии ресурсов настроены на включение и запись по движению. Также существуют дорогостоящие радиоволновые датчики (принцип работы основан на регистрации возмущений электромагнитного поля, которые вызывает попадающий в это поле нарушитель), вибрационные датчики (разработаны на основе сенсорных микрофонных кабелей, которые кре-

пятся к ограде, регистрируют ее механические колебания при попытке вторжения на объект и преобразуют эти колебания в электрический сигнал), сейсмические датчики (основаны на применении чувствительного элемента – геофона, регистрирующего механические вибрации) [4]. Данные датчики не применяются внутри помещений и не подходят для определения местоположения злоумышленника внутри крупных офисных зданий.

До недавнего времени для решения задач точного местоположения наиболее широко были распространены распределенные беспроводные сенсоры (Wireless Sensor Networks – WSNs) [5]. WSN состоит из набора сенсорных узлов, соединенных между собой через беспроводную среду [6; 7]. Каждый узел имеет один или несколько датчиков (микрофонов), блок обработки данных, модуль беспроводной связи, а иногда и один или несколько исполнительных механизмов (громкоговорителей) [8]. В течение последнего десятилетия использование информации о местоположении и ее потенциальные возможности в развитии окружающей среды интеллектуальных приложений способствовали разработке локальных систем позиционирования с WSNs [9]. Локализация и ранжирование в WSNs обычно решаются путем измерения уровня принимаемого сигнала (Received Signal Strength – RSS) или времени прибытия (Time of Arrival – TOA) радиосигналов [10]. Однако подход RSS, будучи относительно недорогим, несет в себе возможность появления значительных ошибок из-за замирания канала, больших расстояний и многолучевости. В контексте обработки акустических сигналов WSNs также обеспечивают преимущества по сравнению с традиционными (проводными) микрофонными решетками [11]. Например, они позволяют увеличить пространственное покрытие за счет распределения микрофонных узлов по большей площади, масштабируемой структуре и, возможно, лучшим свойствам отношения «сигнал/шум» [Signal-to-Noise Ratio] (SNR). Фактически, поскольку точность определения дальности зависит как от скорости распространения сигнала, так и от точности измерения TOA, акустические сигналы могут быть предпочтительнее по отношению к радиосигналам [12].

Основным из недостатков беспроводных сенсорных сетей можно считать точность определения местоположения сенсора, что, в свою очередь, влияет на погрешность локализации источника звука – злоумышленника. В свою очередь, системы TDOAs (Time Difference of Arrival), построенные на основе DAS, имеют размах по расстоянию

между сенсорами менее 1 м и чувствительность до 90 дБ, такие системы разделяют на несколько классов в зависимости от типа используемого обратно-рассеянного излучения и типа информационной составляющей обратно-рассеянного излучения.

Тип DAS-системы может быть амплитудным, фазовым, частотным или поляризационным. В зависимости от её типа для обратно-рассеянного сигнала определяются соответствующие характеристические параметры, которые описывают отражающие способности волокна на различных его участках, длина которых лежит в интервале от 1 м до 10 м. В соответствии с типом системы в качестве таких параметров может выступать амплитудный, частотный, фазовый или поляризационный показатель обратно-рассеянного интерференционного сигнала. Вследствие влияния внешнего механического воздействия (например, сейсмоакустического), приложенного на конкретном сегменте сенсора, на этом сегменте возникает локальная девиация коэффициента рассеяния. В DAS-системах различных типов обобщенным параметром, объективно характеризующим эту локальную девиацию, считается некоторая аналитическая функция от разности значений параметров, соответствующих одному и тому же сегменту сенсора в смежных циклах зондирования. Вид такой аналитической функции зависит от типа DAS-системы и является ноу-хау производителей DAS-систем (на российском рынке наиболее распространены технические решения: «Волк», «Волкодав», «Волна Альфа», «Ворон», «Дунай», «Омега», «Оптолекс», «Сokol», «FiberPatrol», «Optosens», «Silixa iDAS» и система «OXY») [3; 4; 13; 14]. В литературе этот обобщенный параметр называют информационным параметром или сигналом. Таким образом, для DAS-систем различного типа информационный параметр имеет разную физическую природу. Отражающая способность отдельных участков оптоволоконна связана с величиной локального коэффициента рассеяния света на этих участках (сегментах). Локальный коэффициент рассеяния, в свою очередь, определённым образом зависит от частоты и интенсивности вибраций внешнего механического воздействия на поверхность сенсора. Путём импульсного зондирования оптоволоконного сенсора с определенной частотой (на практике ~ 2000 Гц) при измерении значений соответствующего информационному параметру восстанавливается амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) сейсмоакустического поля, воздействующего на сенсор. Физика механизма

работы DAS-систем с мономодовым сенсором довольно сложная. На процесс формирования обратно-рассеянного сигнала влияет множество факторов, возникающих вследствие внешнего механического воздействия (например, сейсмоакустического поля) на сенсор. Кроме того, влияют эффекты сжатия/растяжения оптоволокна, ведущие к микрофлуктуациям длины и поперечного сечения сенсора, а также к вариациям локального коэффициента преломления света в волокне. Эффекты изменения локального местоположения центров рэлеевского рассеяния (микровкрапленний) влияют на девиацию локального коэффициента рассеяния.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день практически все здания имеют сеть оптоволоконных линий связи. Очевидно, что свободные волокна могут быть с успехом использованы в качестве распределенных акустических сенсоров для определения местоположения источника звука и в том числе злоумышленника.

Описание математической модели

Ранее в работе были рассмотрены возможные модели и способы локализации источника звука, основанные на анализе особенностей энергетических и временных характеристик и/или характеристик диаграмм направленности, учитывающие особенности пространственного расположения источника (или источников) сигнала для последующей локализации источника звука, применительно к волоконно-оптическим сенсорным сетям.

В качестве оптимальной была выбрана модель, базирующаяся на оценках разности времени задержки акустических сигналов, регистрируемых сосредоточенными сенсорами, например на решетках Брэгга, или в разных точках отсчета характеристики обратного рассеяния оптического волокна распределенного акустического сенсора DAS.

Предположим, что имеется некоторое здание с уже имеющейся структурой ВОЛС (см. рисунок 1). В данном здании узлы соединены между собой через канал с низким битрейтом и синхронизация по времени между ними не гарантируется, в свою очередь, каждый датчик состоит из нескольких сенсоров, а для более точной локализации источника звука требуется максимальное количество вычислений для каждого узла, затем полученные измерения объединяются для локализации центрального узла. Рассмотрим, что в данном здании имеется M узлов в сети. Все узлы оснащены N микрофонами.

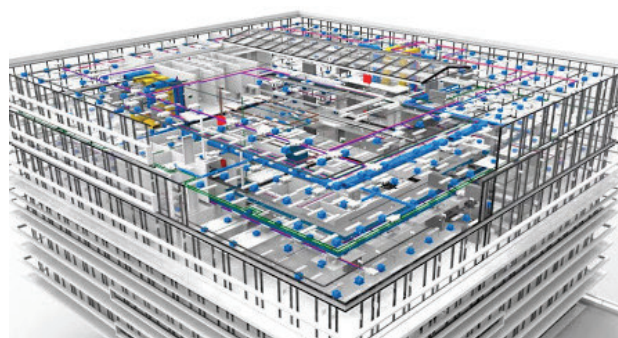


Рисунок 1. Предполагаемые коммуникации офисного здания

Метод TDOA основан на разнице во времени распространения звуковых волн от местоположения источника звука до пар сенсоров. Если источник расположен в точке x_s , а i -й микрофон в точке m , то датчик находится в точке $m_i^{(m)}$, $i = 1, \dots, N$ применение к вычислению местоположения злоумышленника на объекте методом TDOA обусловлено разницей в диапазонах от источника до микрофонов i и j (DAS). Тогда оценка задержки рассчитывается как

$$\tau_{ij}^{(m)} = \frac{r_{ij}^m}{c} = \frac{\|x_s - m_i^{(m)}\| - \|x_s - m_j^{(m)}\|}{c},$$

$$i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, N, \quad i \neq j, \quad m = 1, \dots, M.$$

Здесь N – число сенсоров или точек отсчета на характеристике обратного рассеяния оптического волокна.

Пусть в здании на рисунке 1 установлены сенсоры DAS (см. рисунок 2), и там предположительно находится злоумышленник, а ОВ в помещении расположено вдоль двух противоположных стен. В таком случае мы будем рассматривать пары сенсоров в пределах одного узла, поэтому опустим надстрочный знак m для датчика. Оценка $\hat{\tau}_{ij}$ для TDOA τ_{ij} может быть выполнена с помощью обобщенной перекрестной корреляции (GCC) между сигналами, полученными от сенсоров m_i и m_j , как подробно описано ниже. При работе в безэховом сценарии и одном источнике сигнал дискретного времени, получаемый микрофоном-сенсором i , есть

$$x_i(t) = \alpha_i s(t - \eta_i) + \varepsilon_i(t), \quad i = 1, \dots, N,$$

где α_i – потери, определяемые чувствительностью оптоволоконной сенсорной системы; $s(t)$ – исходный сигнал; $\varepsilon_i(t)$ – аддитивный шумовой сигнал; η_i – задержка распространения между источником и i сенсором (точкой отсчета).

В области дискретного преобразования Фурье (DTFT) сенсорные сигналы могут быть записаны как

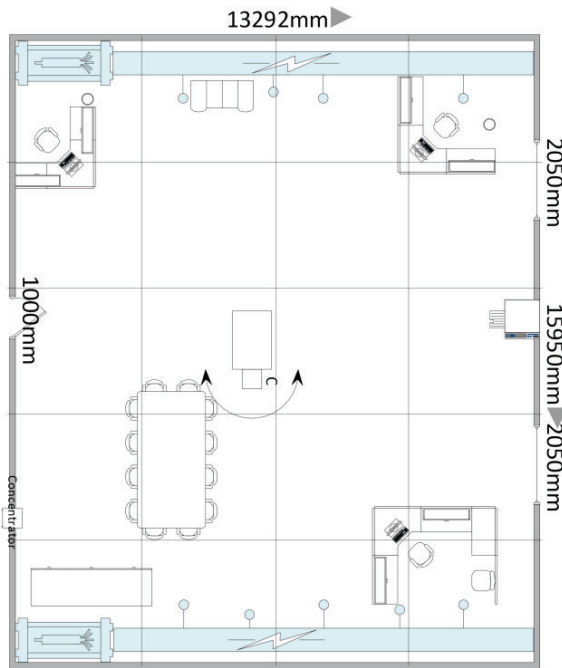


Рисунок 2. Схема офисного помещения

$$X_i(\omega) = \alpha_i S(\omega) e^{-j\omega t_i} + E_i(\omega), \quad i = 1, \dots, N;$$

где $S(\omega)$ и $E_i(\omega)$ являются DTFTs из $s(t)$ и $\varepsilon_i(t)$, соответственно, а ω означает нормированную угловую частоту.

Учитывая пару сенсоров i и j при $i \neq j$, GCC между $x_i(t)$ и $x_j(t)$ может быть записан как [15]:

$$R_{ij}(\tau) \triangleq \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X_i(\omega) X_j^*(\omega) \Psi_{ij}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega,$$

где $X_i(\omega)$ – DTFT от $x_i(t)$; * – обозначение сопряженного оператора; $\Psi_{ij}(\omega)$ – подходящая весовая функция. Тогда TDOA от пары (ij) оценивается как

$$\hat{\tau}_{ij} = \frac{\arg \max_{\tau} R_{ij}(\tau)}{F_s},$$

где F_s – частота дискретизации. Задача $\Psi_{ij}(\omega)$ состоит в том, чтобы сделать $R_{ij}(\tau)$ точнее, чтобы оценка $\hat{\tau}_{ij}$ стала более точной. Одним из наиболее распространенных вариантов является использование весовой функции фазового преобразования (PHAT); тогда

$$\Psi_{ij}(\omega) = \frac{1}{|X_i(\omega) X_j^*(\omega)|}.$$

В массиве N сенсоров полный набор TDOAs рассчитывается как $N(N-1)/2$. Если на них не влияет какая-либо погрешность измерения, то можно легко продемонстрировать, что только $N-1$ из них являются независимыми, а остальные представляют собой их линейную комбинацию. Поэтому общепринятой практикой является использование эталонного сенсора в массиве и

измерение $N-1$ TDOAs по отношению к нему. Назовем этот комплекс $N-1$ мер сокращенным набором TDOA. Без потери общности для приведенного набора TDOA можно предположить, что эталонный сенсор будет иметь индекс 1, а TDOAs $\hat{\tau}_{ij}$ в приведенном множестве, по соображениям компактности в обозначении, есть $\hat{\tau}_j$, $j = 2, \dots, N$.

Локализация звука на основе применения распределенных акустических сенсоров

Рассмотрим вопрос о локализации источника звука (определение местоположения злоумышленника на защищаемом объекте) путем объединения измерений, поступающих из разных узлов. Для идентификации DAS, от которого были получены измерения, мы будем использовать надстрочный знак m . С геометрической точки зрения, учитывая оценку TDOA $\hat{\tau}_{ij}^{(m)}$, источник обязан лежать на ветви гиперболы (гиперboloида в 3D), фокусы которой находятся в $m_i^{(m)}$ и $m_j^{(m)}$, а вершины $c\hat{\tau}_{ij}^{(m)}$ далеко друг от друга. Если источник и сенсоры являются копланарными, то местоположение источника может быть идеально получено путем пересечения двух или более гипербол [16], как показано на рисунке 3, и некоторые примитивные решения для локализации источника опираются на эту идею. Важно отметить, что, когда источник находится достаточно далеко от узла, ветвь гиперболы можно спутать с его асимптотой: в этом случае TDOA информативна только относительно направления, в котором находится источник, а не его расстояния от массива. В этом контексте удобнее работать с DOAs.

В общем случае пересекающиеся гиперболы представляют собой нелинейную задачу с очевидными негативными последствиями для вычислительных затрат и чувствительности к шуму при измерениях. В [17] предлагается решение для преодоления этой проблемы, которое опирается на проективное представление. Гипербола получена из TDOA $\hat{\tau}_{ij}^{(m)}$ для сенсоров $m_i^{(m)}$ и $m_j^{(m)}$, записывается как

$$\alpha_{ij}^{(m)} x^2 + b_{ij}^{(m)} xy + c_{ij}^{(m)} y^2 + d_{ij}^{(m)} x + e_{ij}^{(m)} y + f_{ij}^{(m)} = 0,$$

где коэффициенты

$$\alpha_{ij}^{(m)}, b_{ij}^{(m)}, c_{ij}^{(m)}, d_{ij}^{(m)}, e_{ij}^{(m)}, f_{ij}^{(m)}$$

определяются в замкнутом виде с помощью $m_i^{(m)}$, $m_j^{(m)}$ и $\hat{\tau}_{ij}^{(m)}$. Приведенное уравнение представляет собой ограничение, накладываемое на местоположение источника. При наличии

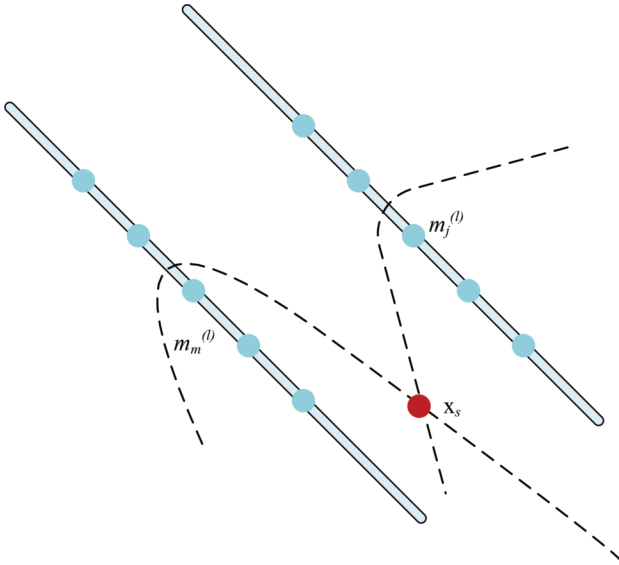


Рисунок 3. Определение местоположения источника звука на пересечении гипербола, полученных из TDOAs

шума в системе ограничение не соблюдается, и остаток может быть определен как

$$\varepsilon_{ij}^{(m)}(x) = v_{ij}^{(m)}(\alpha_{ij}^{(m)}x^2 + b_{ij}^{(m)}xy + c_{ij}^{(m)}y^2 + d_{ij}^{(m)}x + e_{ij}^{(m)}y + f_{ij}^{(m)}),$$

где $v_{ij}^{(m)} = 1$ для всех TDOAs которые были признаны надежными, и 0 в противном случае. Остальное укладываются в вектор $\varepsilon(x)$, а источник локализуется путем минимизации функции затрат $J_{HYP}^{(TDOA)}(x) = \varepsilon(x)^T \varepsilon(x)$.

Если на измерения TDOA влияет только аддитивный белый гауссовский шум, то $J_{HYP}^{(TDOA)}(x)$ пропорционально функции затрат ML . Упрощение оценочной функции локализации может быть достигнуто, если будет принят эталонный сенсор, за счет узлов, совместно использующих общие часы. Можно предположить, что эталонным является первый сенсор в первом датчике (то есть $i = 1$ и $m = 1$), и мы также устанавливаем $m_1^{(1)} = 0$; то есть начало отсчета системы совпадает с эталонным сенсором.

Более того, можно отбросить индекс массива m при присвоении глобального индекса сенсорам в различных датчиках, начиная от $j = 1$ до $j = NM$. Можно также линеаризовать функцию стоимости локализации, переставляя члены в формуле для вычисления $\tau_{ij}^{(m)}$ и полагая, что $i = 1$, после чего легко вывести

$$\|x_s\| - \hat{r}_j = \|x_s - m_j\|,$$

где $\hat{r}_j = c\hat{\tau}_j$. В [18] было предложено представить проблему локализации источника в системе отсчета пространственного диапазона: точка $x = [x, y]^T$ в пространстве отображается на

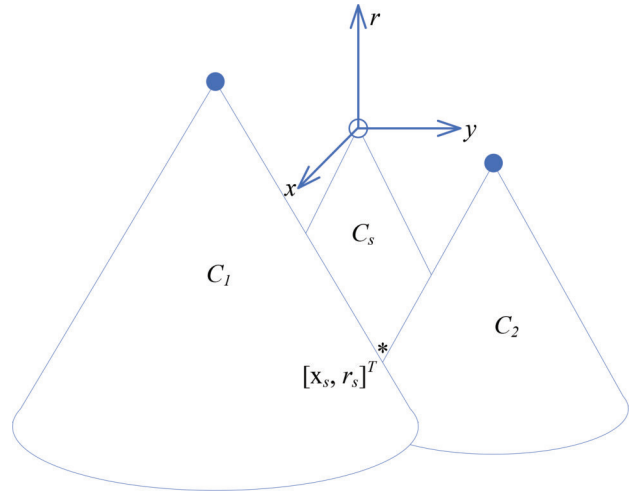


Рисунок 4. Определение источника звука в пространственно-временной системе отсчета

трехмерный пространственный диапазон, как $[x^T, r]^T$, где $r = \|x_s - x\| - \|x_s\|$.

При отсутствии шума и ошибок измерения r является разницей диапазона относительно источника x_s между опорным сенсором и сенсором внутри x . Если заменить $r_s = -\|x_s\|$, то можно интерпретировать $\|x_s\| - \hat{r}_j = \|x_s - m_j\|$ как уравнение отрицательного полуконуса C_j в пространственно-временной системе отсчета, вершина которого находится в $[m_j^T, \hat{r}_j]^T$, причем с апертурой $\pi/4$, а исходная точка $[x_s^T, r_s^T]^T$ лежит на ней. Уравнение $\|x_s\| - \hat{r}_j = \|x_s - m_j\|$ может быть повторено для $j = 2, \dots, N \times M$, и источник обязательно будет лежать на поверхности всех конусов. Кроме того, диапазон r_s источника от эталонного сенсора должен соответствовать ограничению $r_s = -\|x_s\|$, которое представляет собой уравнение конуса C_s , вершина которого находится в $[m_1^T, 0]^T$ с апертурой $\pi/4$. Таким образом, оценка источника ML представляет собой точку на поверхности конуса в $r_s = -\|x_s\|$, ближайшую ко всем конусам, определенным $\|x_s\| - \hat{r}_j = \|x_s - m_j\|$, как показано на рисунке 4.

Возведя в квадрат обе части уравнения $\|x_s\| - \hat{r}_j = \|x_s - m_j\|$ и учитывая, что $x_s^2 + y_s^2 - r_s^2 = 0$, получим уравнение плоскости в системе отсчета пространственного диапазона, на которой должен лежать источник:

$$x_j x_s + y_j y_s - \hat{r}_j r_s - \frac{1}{2}(x_j^2 + y_j^2 - \hat{r}_j^2) = 0.$$

Отметим, что данное уравнение не выполняется точно при погрешности в оценке разности диапазонов расстояний \hat{r}_j , поэтому остаток

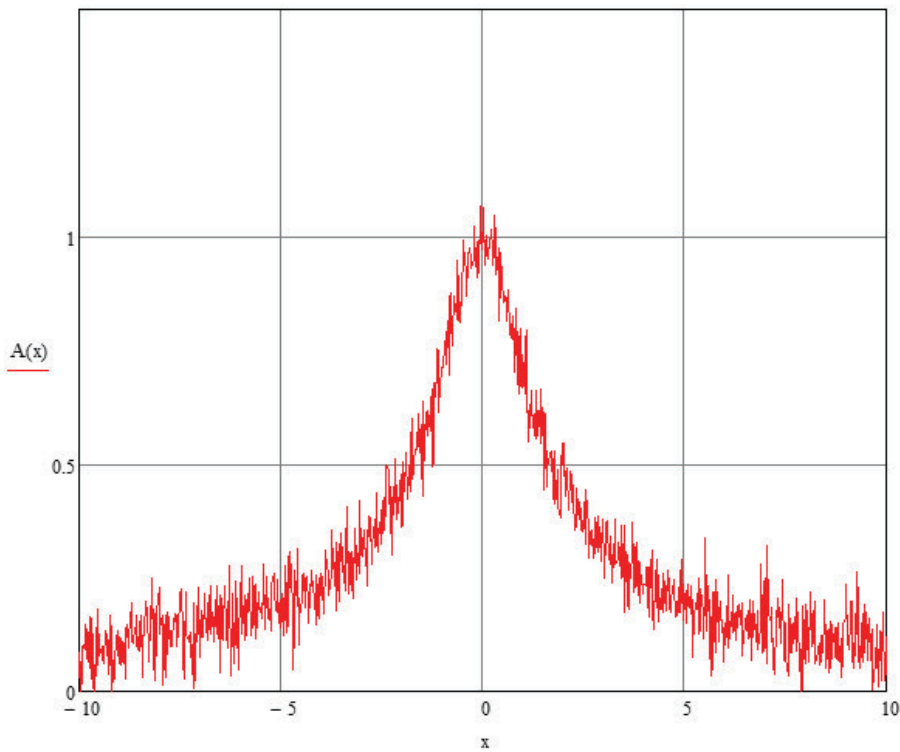


Рисунок 5. Зависимость амплитуды сигнала обратного рассеяния от кратчайшего расстояния между источником звука и оптическим волокном

$$e_j = x_j x_s + y_j y_s - \hat{r}_j r_s - \frac{1}{2}(x_j^2 + y_j^2 - \hat{r}_j^2).$$

На основе определения e_j сферическая функция стоимости LS определяется формулой [19]

$$J_{SP}^{(TDOA)}(x_s, r_s) = \sum_{j=2}^{NM} e_j^2.$$

Большинство методов оценки LS используют данную функцию затрат и отличаются только дополнительными ограничениями. В свою очередь, неограниченная оценка наименьших квадратов (ULS) [20–24] локализует источник звука, поскольку $\hat{x}_s^{(ULS)} = \arg \min_{x_s, r_s} J_{SP}^{(TDOA)}(x_s, r_s)$.

Уточним, что отсутствие какого-либо ограничения, которое связывает x_s и r_s , обеспечивает во многих приложениях плохую точность локализации источника звука. Поэтому метод наименьших квадратов вносит это ограничение как

$$\hat{x}_s^{(CLS)} = \arg \min_{x_s, r_s} J_{SP}^{(TDOA)}(x_s, r_s);$$

$$\text{subject to } r_s = -\|x_s\|.$$

На основе полученного уравнения сферического пересечения [25], метода наименьших квадратов с линейной коррекцией [26] и метода наименьших квадратов разности квадратов разности диапазонов [27] были предложены оценки, которые различаются для процедуры минимизации, начиная от итерационных решений до решений

в замкнутой форме. Отметим, что все эти методы предполагают наличие глобального контрольного сенсора и синхронизацию, действительную для всех узлов. Альтернативные решения, позволяющие преодолеть это технологическое ограничение, были предложены в [28; 29]. Здесь в преимущество была поставлена концепция распространения конуса в пространственно-дальней привязке. В частности, в [29] определен конус распространения, немного отличающийся от конуса, определенного в $\|x_s\| - \hat{r}_j = \|x_s - m_j\|$: вершина находится в источнике и $r_s = 0$. Как следствие, при отсутствии ошибок синхронизации все точки $[x_j^{(m)T}, \hat{r}_j^{(m)}]^T$, $j = 1, \dots, N$, $m = 1, \dots, M$ должны лежать на поверхность конуса распространения. Если датчик показывает смещение во временном диапазоне, его измерения будут смещены по оси диапазона. Сдвиг может быть выражен как функция от местоположения источника, и поэтому он может быть включен в функцию стоимости локализации за счет некоторой нелинейности.

Пример расчета для помещения с двумя оптическими волокнами

В качестве примера реализации алгоритмов на основе рассмотренных выше моделей было выполнено моделирование акустического воздействия на оптические волокна и произведены расчеты погрешностей определения координат

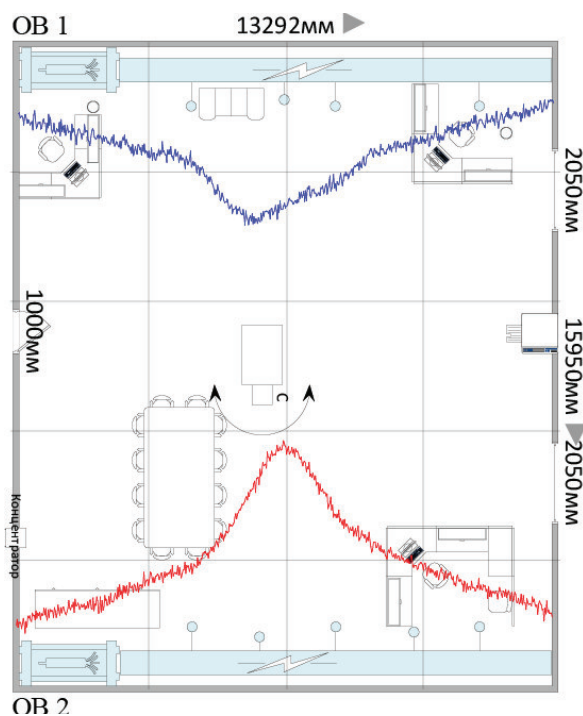


Рисунок 6. К определению местоположения источника звука в помещении с двумя волокнами

нат источника звука в помещении с размерами 6×6 м² и двумя оптическими волокнами, расположенными параллельно вдоль противоположных стен. Координату x источника акустического сигнала вдоль оси волокна определяли в точке максимума амплитуды сигнала, регистрируемого распределенным акустическим датчиком в соответствии с рисунком 5.

Координату y источника акустического сигнала вдоль оси, перпендикулярной оптическим волокнам, определяли из соотношения амплитуд сигналов, принимаемых оптическими волокнами в точках с координатой x . То есть из соотношений максимальных значений сигналов, принимаемых параллельными волокнами (см. рисунок 6). Результаты вычислений погрешностей определения координат источника звука в зависимости от уровня шума в помещении для ряда значений координат источника звука представлены на рисунке 7. Как показывают результаты моделирования, при отношениях «сигнал/помеха» более 10 дБ погрешности не превышают 10 %. Согласно полученным в результате моделирования данным, можно сделать вывод, что источник звука расположен под камерой наблюдения.

Заключение

В статье рассмотрены модели для определения координат источника акустического сигнала с помощью распределенных оптоволоконных сенсоров. В качестве примера представлены ре-

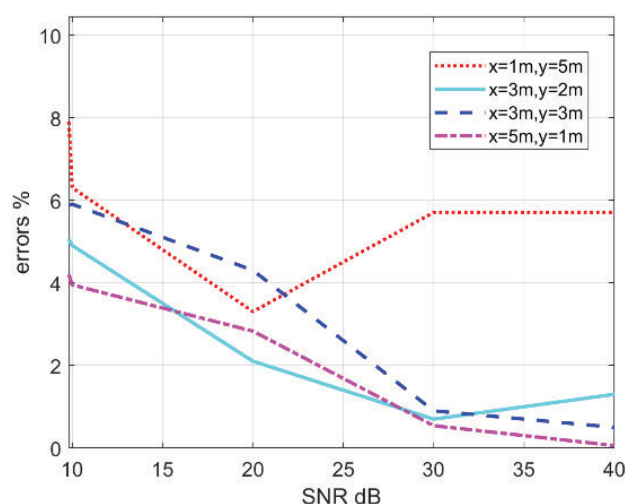


Рисунок 7. Погрешности определения координат источника звука в зависимости от SNR для ряда значений координат источника звука

зультаты моделирования для условий помещения с двумя параллельно проложенными вдоль противоположных стен кабелями с оптическими волокнами. Приведены оценки погрешностей определения координат источника звука в зависимости от уровня шума. Оценки получены для ряда значений координат источника звука. По результатам вычислений при отношении «сигнал/шум» более 10 дБ относительная погрешность не превышает 10 %.

Литература

1. Treshchikov V. Dunay software and hardware complex. In: T8 company. URL: <https://t8.ru/wp-content/uploads/2019/01/Dunay-2019-eng.pdf> (дата обращения: 25.12.2020).
2. Бурдин В.А., Губарева О.Ю. Методы локализации источников звука в акустооптических сенсорных сетях // *Фундаментальные проблемы оптики: материалы XII Международной конференции (ФПО-2020)*. 2020. С. 199.
3. Burdin V.A., Gubareva O.Y. Simulation of simplex acousto-optical data transmission on fiber optic link // *Proc. SPIE 10774*. 2018. Vol. 10774-0B.
4. Магауенов Р.Г. Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения. М.: Изд-во Горячая линия-Телеком, 2004. 367 с.
5. Low-cost alternatives for urban nuisence monitoring using wireless sensor networks / J. Segura-Garcia [et al.] // *IEEE Sensors Journal*. 2015. Vol. 15, № 2. P. 836–844.
6. Geographic multipath routing based on geospatial division in duty-cycled underwater wireless sensor networks / J. Jiang [et al.] // *Journal of Network and Computer Applications*. 2016. Vol. 59. P. 4–13.

7. Bertrand A. Applications and trends in wireless acoustic sensor networks: a signal processing perspective // Proc. IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT '11). 2011. P. 1–6.
8. Raykar V.C., Kozintsev I.V., Lienhart R. Position calibration of microphones and loudspeakers in distributed computing platforms // Proc. IEEE Transactions on Speech and Audio. 2005. Vol. 13, № 1. P. 70–83.
9. A survey of localization in wireless sensor network / L. Cheng [et al.] // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2012. Vol. 2012. P. 12.
10. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems / H. Liu [et al.] // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 2007. Vol. 37, № 6. P. 1067–1080.
11. Wang H. Wireless sensor networks for acoustic monitoring: Ph.D. dissertation / USA. University of California, Los Angeles (UCLA). Los Angeles, Calif., 2006.
12. Priyantha N., Chakraborty A., Balakrishnan H. The cricket location-support system // Proc. 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00). 2000. P. 32–43.
13. Тимофеев А.В., Грознов Д.И. Классификация источников сейсмоакустической эмиссии в волоконно-оптических системах мониторинга протяженных объектов // Автометрия. 2020. Т. 56, № 1. С. 59–73.
14. Pipeline leak detection technology based on distributed optical fiber acoustic sensing system / J. Zuo [et al.] // Proc. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 30789–30796.
15. Knapp C.H., Carter G.C. The generalized correlation method for estimation of time delay // Proc. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal. 1976. Vol. 24, № 4. P. 320–327.
16. Huang, Y.A., Benesty J. Audio Signal Processing for Nextgeneration Multimedia Communication Systems // Springer Science & Business Media. 2007.
17. Acoustic source localization with distributed asynchronous microphone networks / A. Canciani [et al.] // Proc. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language. 2013. Vol. 21, № 2. P. 439–443.
18. TDOA-based acoustic source localization in the space-range reference frame / P. Bestagini [et al.] // Multidimensional Systems and Signal Processing. 2014. Vol. 25, № 2. P. 337–359.
19. Huang Y. Source localization in Audio Signal Processing for Next-Generation Multimedia Communication Systems. Berlin: Springer, 2004. P. 229–253.
20. Gillette M.D., Silverman H.F. A linear closed-form algorithm for source localization from time-differences of arrival // Proc. IEEE Signal Letters. 2008. Vol. 15. P. 1–4.
21. Smith J.O., Abel J.S. The spherical interpolation method of source localization // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1987. Vol. 12, № 1. P. 246–252.
22. Smith J.O., Abel J.S. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements // Proc. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal. 1987. Vol. 35, № 12. P. 1661–1669.
23. Huang Y., Benesty J., Elko G.W. Passive acoustic source localization for video camera steering // Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal. 2000. Vol. 2. P. II909–II912.
24. Smith J.O., Abel J.S. The spherical interpolation method for closed-form passive source localization using range difference measurements // Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal. 1987. Vol. 12. P. 471–474.
25. Schau H.C., Robinson A.Z. Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences // Proc. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal. 1987. Vol. 35, № 8. P. 1223–1225.
26. Real-time passive source localization: a practical linear-correction least-squares approach / Y. Huang [et al.] // Proc. IEEE Transactions on Speech and Audio. 2001. Vol. 9, № 8. P. 943–956.
27. Beck A., Stoica P., Li J. Exact and approximate solutions of source localization problems // Proc. IEEE Transactions on Signal. 2008. Vol. 56, № 5. P. 1770–1778.
28. A robust and low-complexity source localization algorithm for asynchronous distributed microphone networks / A. Canciani [et al.] // Proc. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language. 2015. Vol. 23, № 10. P. 1563–1575.
29. Localization of acoustic sources through the fitting of propagation cones using multiple independent arrays / A. Canciani [et al.] // Proc. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language. 2012. Vol. 20, № 7. P. 1964–1975.

Получено 11.03.2021

Губарева Ольга Юрьевна, к.т.н., начальник управления научной и инновационной деятельности Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 339-11-09. E-mail: o.gubareva@psuti.ru

Гуреев Владимир Олегович, аспирант кафедры линий связи и измерений в технике связи (ЛС и ИТС) ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 339-11-00 (доб. 414). E-mail: v.gureev@psuti.ru

Чифранов Георгий Николаевич, магистрант кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 927 968-25-82. E-mail: chifranov.e@yandex.ru

POTENTIAL OPPORTUNITIES OPTICAL DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSORS TO DETERMINE THE LOCATION OF THE ATTACKER

Gubareva O.Y., Gureev V.O., Chifranov G.N.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: o.gubareva@psuti.ru*

The article considered possible models and algorithms based on the analysis of features of energy and time characteristics and/or characteristics of directional pattern that consider the features of the spatial location of the signal source (or sources) for the subsequent localization of the sound source, in relation to fiber-optic sensor networks, to solve the problem of determining with a given accuracy the location of the attacker on the protected object. The most optimal model was chosen based on estimates of the difference in the delay time of acoustic signals at different reference points of the backscattering characteristic of the optical fiber of a distributed acoustic sensor (DAS). As an example, the results of calculating the deviation estimates for determining the coordinates of the sound source as a function of the noise level in a room with two optical fibers laid in parallel along opposite walls are presented.

Keywords: *DAS, optical fiber, distributed acoustic sensor, fiber optic communication system, physical protection system, model for estimating the difference in the delay time of acoustic signals, localization of the sound source*

DOI: 10.18469/ikt.2021.19.2.13

Gubareva Olga Yurevna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of Research and Innovation, PhD in Technical Sciences. Tel. +7 846 339-11-09. E-mail: o.gubareva@psuti.ru

Gureev Vladimir Olegovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; PhD student of Communication Lines and Measurements in Communication Technology Department. Tel. +7 846 339-11-00 (ext. 414). E-mail: v.gureev@psuti.ru

Chifranov Georgy Nikolaevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Postgraduate of Communication Lines and Measurements in Communication Technology Department. Tel. +7 927 968-25-82. E-mail: chifranov.e@yandex.ru

References

1. Treshchikov V. Dunay software and hardware complex. In: T8 company. URL: <https://t8.ru/wp-content/uploads/2019/01/Dunay-2019-eng.pdf> (accessed: 25.12.2020). (In Russ.)
2. Burdin V.A., Gubareva O.Yu. Methods for localization of sound sources in acousto-optic sensor networks. *Fundamental'nye problemy optiki: materialy XII Mezhdunarodnoj konferentsii (FPO-2020)*, 2020, p. 199. (In Russ.)

3. Burdin V.A., Gubareva O.Yu. Simulation of simplex acousto-optical data transmission on fiber optic link. *Proc. SPIE 10774*, 2018, vol. 10774-0B.
4. Magauenov R.G. *Burglar Alarm Systems: The Basics of Theory and Principles of Construction*. Moscow: Izd-vo Gorjachaja linija-Telekom, 2004, 367 p. (In Russ.)
5. Segura-Garcia J. et al. Low-cost alternatives for urban noisenuisance monitoring using wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 836–844.
6. Jiang J. et al. Geographic multipath routing based on geospatial division in duty-cycled underwater wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, vol. 59, pp. 4–13.
7. Bertrand A. Applications and trends in wireless acousticsensor networks: a signal processing perspective. *Proc. IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT '11)*, 2011, pp. 1–6.
8. Raykar V.C., Kozintsev I.V., Lienhart R. Position calibration of microphones and loudspeakers in distributed computing platforms. *Proc. IEEE Transactions on Speech and Audio*, 2005, vol. 13, no. 1, pp. 70–83.
9. Cheng L. et al. A survey of localization in wireless sensor network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, vol. 2012, p. 12.
10. Liu H. et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 2007, vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080.
11. Wang H. *Wireless sensor networks for acoustic monitoring: Ph.D. dissertation / USA*. University of California, Los Angeles (UCLA). Los Angeles, Calif., 2006.
12. Priyantha N., Chakraborty A., Balakrishnan H. The cricket location-support system. *Proc. 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00)*, 2000, pp. 32–43.
13. Timofeev A.V., Groznov D.I. Classification of seismoacoustic emission sources in fiber-optic systems for monitoring extended objects. *Avtometrija*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 59–73. (In Russ.)
14. Zuo J. et al. Pipeline leak detection technology based on distributed optical fiber acoustic sensing system. *Proc. IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 30789–30796.
15. Knapp C.H., Carter G.C. The generalized correlation method for estimation of time delay. *Proc. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal*, 1976, vol. 24, no. 4, pp. 320–327.
16. Huang Y.A., Benesty J. *Audio Signal Processing for Nextgeneration Multimedia Communication Systems*. Springer Science & Business Media, 2007.
17. Canclini A. et al. Acoustic source localization with distributed asynchronous microphone networks. *Proc. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language*, 2013, vol. 21, no. 2, pp. 439–443.
18. Bestagini P. et al. TDOA-based acoustic source localization in the space-range reference frame. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2014, vol. 25, no. 2, pp. 337–359.
19. Huang Y. *Source localization in Audio Signal Processing for Next-Generation Multimedia Communication Systems*. Berlin: Springer, 2004, pp. 229–253.
20. Gillette M.D., Silverman H.F. A linear closed-form algorithm for source localization from time-differences of arrival. *Proc. IEEE Signal Letters*, 2008, vol. 15, pp. 1–4.
21. Smith J.O., Abel J.S. The spherical interpolation method of source localization. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1987, vol. 12, no. 1, pp. 246–252.
22. Smith J.O., Abel J.S. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements. *Proc. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal*, 1987, vol. 35, no. 12, pp. 1661–1669.
23. Huang Y., Benesty J., Elko G.W. Passive acoustic source localization for video camera steering. *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal*, 2000, vol. 2, pp. II909–II912.

24. Smith J.O., Abel J.S. The spherical interpolation method for closed-form passive source localization using range difference measurements. *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal*, 1987, vol. 12, pp. 471–474.
25. Schau H.C., Robinson A.Z. Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences. *Proc. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal*, 1987, vol. 35, no. 8, pp. 1223–1225.
26. Huang Y. et al. Real-time passive source localization: a practical linear-correction least-squares approach. *Proc. IEEE Transactions on Speech and Audio*, 2001, vol. 9, no. 8, pp. 943–956.
27. Beck A., Stoica P., Li J. Exact and approximate solutions of source localization problems. *Proc. IEEE Transactions on Signal*, 2008, vol. 56, no. 5, pp. 1770–1778.
28. Canclini A. et al. A robust and low-complexity source localization algorithm for asynchronous distributed microphone networks. *Proc. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language*, 2015, vol. 23, no. 10, pp. 1563–1575.
29. Canclini A. et al. Localization of acoustic sources through the fitting of propagation cones using multiple independent arrays. *Proc. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language*, 2012, vol. 20, no. 7, pp. 1964–1975.

Received 11.03.2021

ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

УДК 65.011.56

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАК РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА КОНСТРУКТИВНО СЛОЖНОЙ ПРОДУКЦИИ

Матвеева Е.А., Иванов Д.В.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: helen_matveeva@mail.ru, 555ivanov777@gmail.com*

Предложен комплексный подход к решению задач ускоренного экономического роста машиностроительной промышленности, поставленных в национальных проектах «Повышение производительности», «Цифровая экономика», «Наука»: разработка пилотного проекта интегрированных систем управления производством (ИСУП) машиностроительных предприятий на базе интеграции эффективных форм, методов и систем организации производства, труда и управления, информационных, цифровых технологий, оптимизационных методов решения управленческих задач с апробацией на якорном предприятии; глубокая интеграция образования, науки и производства в рамках создания учебно-научно-производственного комплекса (УНПК), объединяющего якорное предприятие, научные подразделения и профильные кафедры вуза с целью ускорения продвижения созданной ИСУП на предприятия отрасли, повышения компетентности специалистов предприятий, преподавателей вузов (курсы, стажировки), совершенствования учебных процессов подготовки молодых специалистов.

Ключевые слова: *машиностроение, мелкосерийное производство, системы организации и управления производством, информационные технологии, эффективность*

Введение

Успешная реализация программ по подъему и развитию машиностроения зависит от решения многих достаточно сложных общепризнанных проблем, стоящих сегодня перед машиностроительными предприятиями, основные из них: устаревшие технологии, изношенное оборудование, дефицит квалифицированных кадров, действующие системы управления [1; 3; 5–7].

В последние годы в рамках реализации задач, поставленных в национальном проекте «Повы-

шение производительности», активно ведутся работы по замене устаревших технологий и оборудования, что позволяет существенно повысить производительность труда на предприятиях.

Наиболее сложными в решении проблем, направленных на повышение производительности труда не на отдельных предприятиях, а на подъём и развитие машиностроительной отрасли в целом, являются действующие системы управления производством и сложившийся дефицит кадров на машиностроительных предприятиях, в вузах,