

УДК 621.396.965.8

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ ЛИНЕЙНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СМАЗАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Мачихин А.С.

Введение

Формирование любого изображения сопровождается искажениями, которые вносят все звенья формирующей оптико-электронной системы (ФОЭС). Помимо линейных и шумовых искажений, свойственных реальным физическим устройствам, при регистрации могут возникать дополнительные факторы, негативно влияющие на качество изображения.

Один из таких факторов – скоростной сдвиг (смаз) изображения, причиной появления которого является относительное перемещение объекта и ФОЭС в процессе экспонирования (в дальнейшем, не нарушая общности, будем говорить о движущемся объекте относительно неподвижной ФОЭС). Действие данного фактора проявляется в наложении различных участков изображения, расположенных вдоль траектории этого перемещения. Восприятие и анализ смазанных изображений затрудняются, а эффективность их автоматической обработки значительно снижается.

Устранение смаза является разновидностью задачи восстановления изображения, которая формулируется как задача воссоздания исходного изображения $f(x, y)$ по наблюдаемому искаженному изображению $g(x, y)$.

Для пространственно инвариантной системы регистрации формирование изображения с учетом аддитивного шума $n(x, y)$ этой системы описывается выражением типа свертки

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

где $h(x, y)$ - импульсный отклик ФОЭС.

Таким образом, задача восстановления изображения $f(x, y)$ сводится к задаче деконволюции, т.е. решению интегрального уравнения (1) типа свертки. Известно несколько способов решения задачи деконволюции: методы линейной фильтрации, итерационные алгоритмы, методы некорректных задач оптимизации и др. [1]. Для получения удовлетворительных результатов при использовании этих методов необходима априорная информация о характеристиках искажения и шума.

Возможности оценивания статистических характеристик шума как на основе экспериментальных исследований ФОЭС, так и непосредственно по искаженному изображению достаточно изучены [1]. Поэтому основной проблемой восстановления изображений является оценивание функции $h(x, y)$. В случае же, когда изображение искажено смазом, описываемым функцией $h_{см}(x, y)$, в дальнейшем называемой функцией смаза точки (ФСТ), произвольного вида, даже при наличии ФОЭС ни один из известных методов не позволяет эффективно оцени-

Рассмотрена проблема синтеза линейных фильтров для восстановления смазанных изображений, предложен метод моделирования функций смаза точки, приведены примеры восстановления изображений с помощью синтезированных фильтров.

вать параметры искажения в автоматизированном режиме. Поэтому, как правило, ФСТ определяют на основе визуального анализа искаженного изображения. Необходимость в этой длительной и трудоемкой процедуре, заключающейся в интерактивном подборе параметров ФСТ, существенно ограничивает возможности применения алгоритмов устранения смаза.

Данная работа посвящена разработке автоматизированного метода оценки и моделирования ФСТ произвольного вида при известных параметрах ФОЭС и условиях съемки.

Формирование смазанного изображения

Для определения ФСТ представим смазанное изображение $g_{см}(x, y)$ как свертку изображения $g(x, y)$, регистрируемого ФОЭС в отсутствие смаза, и ФСТ

$$g_{см}(x, y) = g(x, y) \otimes h_{см}(x, y). \quad (2)$$

В пространственно-частотной области соотношение (2) преобразуется к виду

$$G_{см}(v_x, v_y) = G(v_x, v_y) H_{см}(v_x, v_y). \quad (3)$$

С другой стороны, формирование смазанного изображения можно описать интегральным уравнением [2]

$$g_{см}(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T g(x - x_0(t), y - y_0(t)) dt, \quad (4)$$

где T – время экспонирования; $x_0(t)$, $y_0(t)$ - закон движения изображения объекта (ЗДИО).

После перехода в пространственно-частотную область и осуществления несложных преобразований выражение (4) принимает вид

$$G_{см}(v_x, v_y) = \frac{1}{T} G(v_x, v_y) \int_0^T \exp(-i2\pi(v_x x_0(t) + v_y y_0(t))) dt. \quad (5)$$

Из (3) и (5) следует, что функция $H_{см}(v_x, v_y)$, далее называемая функцией передачи смаза (ФПС), может быть записана как

$$H_{см}(v_x, v_y) = \frac{1}{T} \int_0^T \exp(-i2\pi(v_x x_0(t) + v_y y_0(t))) dt. \quad (6)$$

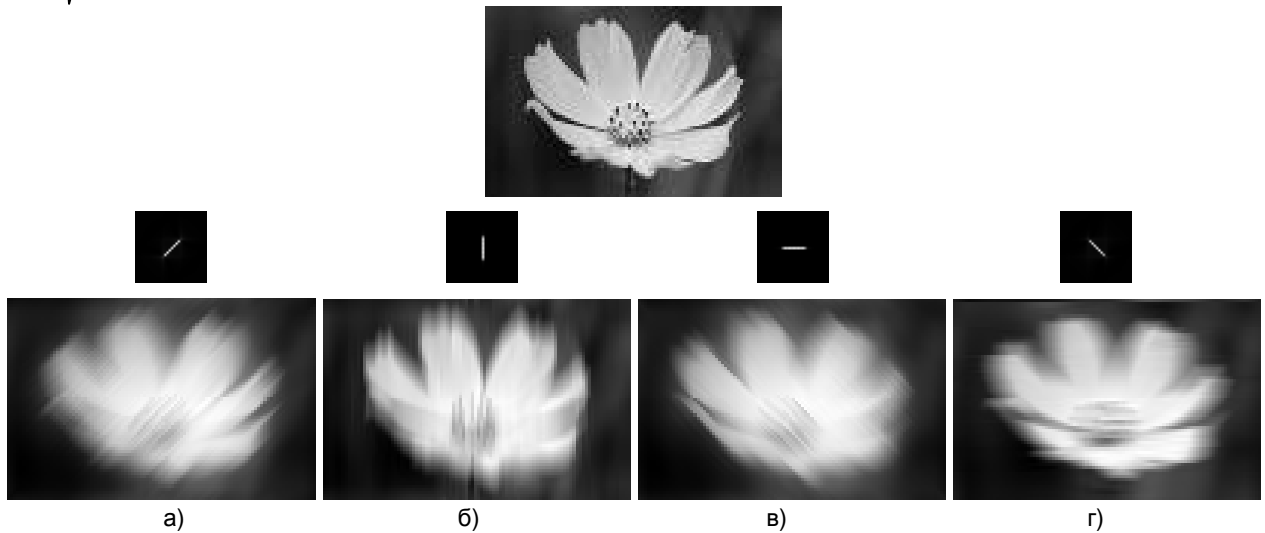


Рис. 1. Примеры моделирования ФСТ (в средней строке) для случая линейного равномерного смаза величиной 10пк с различными направлениями:

- а) $\theta = -45^0$ ($l_x = 7$ пк, $l_y = -7$ пк); б) $\theta = 90^0$ ($l_x = 0$, $l_y = 10$ пк); в) $\theta = 0^0$ ($l_x = 10$ пк, $l_y = 0$);
г) $\theta = 45^0$ ($l_x = 7$ пк, $l_y = 7$ пк).

В нижней строке представлены примеры искажения изображения (в верхней строке) соответствующими ФСТ.

Взяв обратное преобразование Фурье от ФПС, получим выражение для ФСТ

$$h_{см}(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T \delta(x - x_0(t), y - y_0(t)) dt \quad (7)$$

где $\delta(x, y)$ – дельта-функция.

В отличие от моделей формирования смазанного изображения, представленных в [1,4] и справедливых только в случае равномерного прямолинейного смаза, выражения (6) и (7) корректно описывают смаз изображения при любом ЗДИО. Кроме того, общим недостатком моделей [1,4] является то, что они никак не учитывают параметры ФОЭС и условия съемки. Между тем, как вид ФСТ в каждом конкретном случае определяется в том числе и этими факторами.

Используя (6), получим аналитические выражения для ФПС в практически важных случаях смаза при равномерном прямолинейном и равноускоренном движениях объекта.

Равномерное прямолинейное движение объекта

В этом случае ЗДИО на цифровом изображении имеет вид

$$\begin{cases} x_0(t) = v_x t \\ y_0(t) = v_y t \end{cases}, \quad (8)$$

где v_x, v_y [пк/с] – проекции вектора \vec{v} скорости изображения объекта на координатные оси.

Подставляя (8) в (6), получаем

$$H_{см}(v_x, v_y) = \frac{1}{T} \int_0^T \exp(-i2\pi(v_x v_x + v_y v_y) t) dt, \quad (9)$$

откуда после несложных преобразований имеем

$$\begin{aligned} H_{см}(v_x, v_y) &= \text{sinc}(\pi(v_x v_x + v_y v_y) T) \exp(-i\pi(v_x v_x + v_y v_y) T) = \\ &= \text{sinc}(\pi(v_x l_x + v_y l_y)) \exp(-i\pi(v_x l_x + v_y l_y)) = \\ &= \text{sinc}(\pi l (v_x \cos \theta + v_y \sin \theta)) \exp(-i\pi l (v_x \cos \theta + v_y \sin \theta)) \end{aligned} \quad (10)$$

где $l_x = v_x T$, $l_y = v_y T$ – проекции траектории смаза, представляющей собой отрезок прямой линии, на координатные оси, $l = \sqrt{l_x^2 + l_y^2}$ – величина смаза; $\theta = \arctg(l_y / l_x)$ – угол, образуемый линией смаза с горизонтальной осью.

Выражение (10) позволяет задавать функцию передачи равномерного прямолинейного смаза его величиной и направлением – параметрами, которые могут быть оценены непосредственно по искаженному изображению. На практике это оказывается важным, т.к. далеко не всегда доступна априорная информация об условиях съемки и параметрах ФОЭС.

На рис. 1 представлены примеры моделирования ФСТ в случае прямолинейного равномерного смаза с различными параметрами, а также искажения реального изображения полученными ФСТ. Искажение производилось согласно (3) с последующим обратным преобразованием Фурье.

Равноускоренное движение объекта

В этом случае ЗДИО на цифровом изображении имеет вид

$$\begin{cases} x_0(t) = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2} \\ y_0(t) = v_{0y} t + \frac{a_y t^2}{2} \end{cases}, \quad (11)$$

где v_{0x}, v_{0y} [пк/с] – проекции вектора \vec{v}_0 начальной скорости изображения объекта на координатные оси; a_x, a_y [пк/с²] – проекции вектора \vec{a} ускорения изображения объекта на координатные оси.

Подставляя выражения (11) в (6), после перегруппировки слагаемых под экспонентой получим

$$H_{см}(v_x, v_y) = \frac{1}{T} \int_0^T \exp(A(v_x, v_y) t - B(v_x, v_y) t^2) dt, \quad (12)$$

где для сокращения дальнейших выкладок и наглядности введены следующие обозначения:

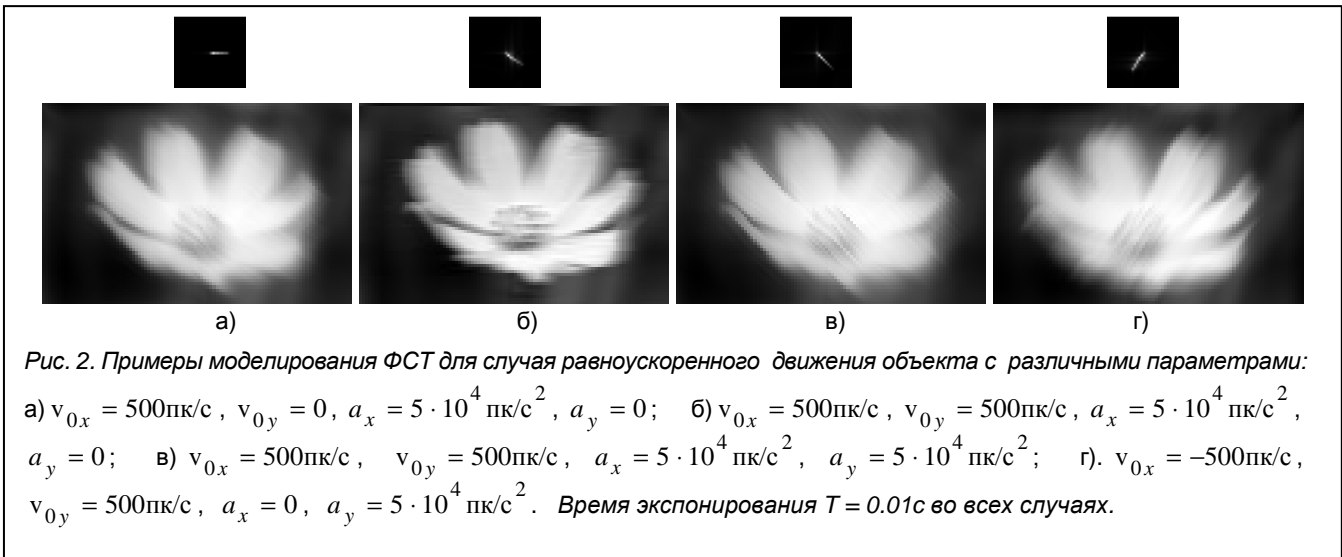


Рис. 2. Примеры моделирования ФСТ для случая равноускоренного движения объекта с различными параметрами: а) $v_{0x} = 500 \text{ пк/с}$, $v_{0y} = 0$, $a_x = 5 \cdot 10^4 \text{ пк/с}^2$, $a_y = 0$; б) $v_{0x} = 500 \text{ пк/с}$, $v_{0y} = 500 \text{ пк/с}$, $a_x = 5 \cdot 10^4 \text{ пк/с}^2$, $a_y = 0$; в) $v_{0x} = 500 \text{ пк/с}$, $v_{0y} = 500 \text{ пк/с}$, $a_x = 5 \cdot 10^4 \text{ пк/с}^2$, $a_y = 5 \cdot 10^4 \text{ пк/с}^2$; г). $v_{0x} = -500 \text{ пк/с}$, $v_{0y} = 500 \text{ пк/с}$, $a_x = 0$, $a_y = 5 \cdot 10^4 \text{ пк/с}^2$. Время экспонирования $T = 0.01 \text{ с}$ во всех случаях.

$$A(v_x, v_y) = -i2\pi(v_{0x}v_x + v_{0y}v_y), \quad B(v_x, v_y) = i\pi(a_x v_x + a_y v_y).$$

Выделив в (12) под экспонентой полный квадрат и введя функцию ошибок

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-p^2) dp,$$

после несложных преобразований приведем (12) к виду

$$H_{\bar{m}}(v_x, v_y) = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{B(v_x, v_y)}} \cdot \left(\text{erf}\left(\frac{1}{2} \frac{A(v_x, v_y)}{\sqrt{B(v_x, v_y)}}\right) - \text{erf}\left(\frac{1}{2} \frac{A(v_x, v_y)}{\sqrt{B(v_x, v_y)}} - T\sqrt{B(v_x, v_y)}\right) \right) \cdot \exp\left(\frac{1}{4} \frac{A(v_x, v_y)^2}{B(v_x, v_y)}\right). \quad (13)$$

Следует отметить, что выражение (13) справедливо только в случае $B(v_x, v_y) \neq 0$, т.е. $|\vec{a}| \neq 0$. В случае $|\vec{a}| = 0$, выражение (11) переходит в (8), и вместо (13) необходимо использовать (10).

Функция erf, представляющая собой бесконечный ряд, является стандартной для большинства современных математических пакетов (MathCad, Matlab и др.). Известны численные методы быстрого вычисления ее значений с заданной точностью. Поэтому выражение (13) можно считать окончательным и применять без дальнейших упрощений.

На рис. 2 представлены примеры моделирования ФСТ в случае равноускоренного смаза с различными параметрами, а также искажения реального изображения полученными ФСТ. Искажение производилось согласно (3) с последующим обратным преобразованием Фурье.

Синтез линейных частотных восстанавливающих фильтров

Известен ряд методов восстановления изображений и, в частности, устранения смаза [1-5]. Область применимости каждого из них определяется прежде всего требованиями к скорости и качеству восстанов-

ления. На практике, несмотря на невозможность экстраполяции спектра и учета ограничений на получаемые решения, наиболее широкое распространение приобрели линейные методы. Это объясняется простотой их реализации и высокой скоростью вычислений.

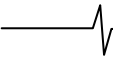
Суть линейных методов заключается в синтезе передаточной функции $H_{восст}(v_x, v_y)$ восстанавливающего линейного фильтра, так что восстановленное изображение $g(x, y)$ представляется в виде

$$g(x, y) = F^{-1}\{G_{см}(v_x, v_y)H_{восст}(v_x, v_y)\}. \quad (14)$$

В работах [1–3] приведено множество линейных частотных восстанавливающих фильтров. Передаточная функция $H_{восст}(v_x, v_y)$ каждого из них зависит от ФПС и характеристик шума, который в большинстве практически важных случаев считают не коррелированным с изображением. Разумный компромисс между разрешением и зашумленностью восстановленного изображения достигается, как правило, интерактивным вмешательством пользователя в процесс восстановления посредством изменения некоторых числовых параметров.

Алгоритм (7) моделирования ФСТ допускает задание смаза несколькими способами: зависимостями $x_0(t)$ и $y_0(t)$ координат от времени и функциональной зависимостью координат $y_0(x_0)$ или массивом координат траекторных точек. Задание непосредственно $H_{см}(v_x, v_y)$, т.е. пространственно-частотного спектра функции $h_{см}(x, y)$, избавляет от необходимости осуществлять преобразование Фурье, быстрому варианту которого свойственны погрешности.

Использование полученных выражений (10) и (13), в которые не входит интеграл по времени, приводит к существенной экономии времени. Как показали исследования, в большинстве практически важных случаев время экспонирования можно разбить на интервалы, в течение которых движение объекта можно считать либо равномерным либо равноускоренным, т.е. разбить интеграл (6) на сумму интегралов вида (9) и (12).



Кроме того, на практике зачастую имеются данные об ЗДИО. Так, например, при аэрофотосъемке, как правило, с высокой точностью известны параметры используемой ФОЭС и параметры полета: высота, скорость носителя и др. Эти данные позволяют определить ЗДИО и использовать предлагаемый метод моделирования ФПС.

Указанные обстоятельства обеспечивают удобство и автоматизацию синтеза частотных восстанавливающих фильтров на основе описанного метода.

Программная реализация

Предлагаемый подход к синтезу частотных восстанавливающих смазанных изображения фильтров реализован в виде законченного программного модуля. Пользователю предоставляется возможность задавать ЗДИО, условия съемки, параметры ФОЭС, характеристики шума, а также вид используемой фильтрации: инверсная, винеровская, среднегеометрическая, эволюционная или регуляризация Тихонова. Возможно задание и использование других фильтров. Предусмотрено интерактивное вмешательство пользователя в ходе многовариантного анализа в процесс подбора передаточной функции восстанавливающего фильтра за счет изменения параметров, определяющих отношение сигнал-шум.

На рисунке 3 представлен пример восстановления изображения, искаженного смазом, траектория и неравномерность которого аппроксимировались равноускоренным движением (см. (11)) с параметрами: $v_{0x} = -1000$ пк/с; $v_{0y} = 0$; $a_x = 0$; $a_y = 10^5$ пк/с². Время экспонирования полагалось равным 0.01с. Шумовые

характеристики, необходимые для использования восстанавливающих фильтров, предварительно оценивались на основе специального экспериментального исследования ФОЭС. На основе моделирования ФПС (см. (13)) производилось восстановление изображения согласно (14) с помощью нескольких синтезированных фильтров:

1). Фильтра Винера (рис. 3б)

$$H_V(v_x, v_y) = \frac{H_{cm}^*(v_x, v_y)}{|H_{cm}(v_x, v_y)|^2 + \frac{P_n(v_x, v_y)}{P_f(v_x, v_y)}},$$

где $P_n(v_x, v_y)$ – энергетический спектр аддитивного шума ФОЭС, $P_f(v_x, v_y)$ – энергетический спектр исходного неискаженного изображения.

2). Фильтра, реализующего регуляризацию Тихонова (рис. 3в)

$$H_T(v_x, v_y) = \frac{H_{cm}^*(v_x, v_y)}{|H_{cm}(v_x, v_y)|^2 + \alpha Q(v_x, v_y)},$$

где

$$Q(v_x, v_y) = 10^{-12} + 10^{-13}(v_x^2 + v_y^2) + 10^{-14}(v_x^2 + v_y^2)^2,$$

$\alpha = 0.005$.

3). Эволюционного фильтра (рис. 3г)

$$H_E(v_x, v_y) = \left(\frac{1}{|H_{\bar{n}}(v_x, v_y)|} \right)^\sigma \left(\frac{|H_{\bar{n}}(v_x, v_y)|^2}{|H_{\bar{n}}(v_x, v_y)|^2 + \alpha Q(v_x, v_y)} \right)^\mu,$$

где $\sigma = 0.92$, $\mu = 0.4$.



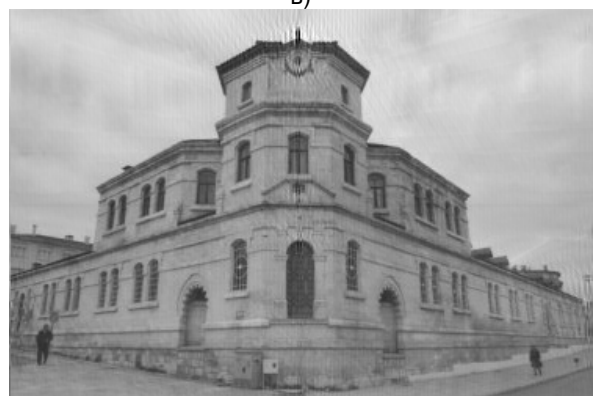
а)



в)



б)



г)

Рис. 3. Пример восстановления изображения (а), искаженного смазом, с помощью б). фильтра Винера, синтезированного автоматически; в). регуляризации Тихонова (значение α подбиралось интерактивно); г). эволюционного фильтра (значения α , σ , μ подбирались интерактивно).

Заключение

Предложен метод моделирования смаза и синтеза восстанавливающих смазанные изображения линейных частотных фильтров. Средством достижения удовлетворительного результата является использование максимума априорной информации о характере смаза и условиях регистрации. Описанный метод обладает рядом важных преимуществ:

- строгость аналитического решения и удобство использования в теоретических исследованиях;
- возможность моделирования и учета произвольного (криволинейного, неравномерного) смаза;
- учет условий съемки и параметров ФОЭС;
- высокая скорость вычислений.

Использование данного метода на этапе предобработки позволяет расширить возможности современных систем обработки и распознавания изображений. При

достаточной априорной информации об условиях регистрации и параметрах ФОЭС возможно его применение в режиме, близком к режиму реального времени.

Литература

1. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. – М.: Радио и связь, 1986.
2. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005.
4. Сизиков В.С. Устойчивые методы обработки результатов измерений. – С.-П.: Специальная литература, 1999.
5. Колючкин В.Я., Мачихин А.С. Модифицированный итерационный алгоритм восстановления изображений. //Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. – 2007. – №1. С. 114-121.



ИТОГОВЫЙ ПРЕСС-РЕЛИЗ 5-ой международной выставки по электронике, микроэлектронике и компонентам

С 3 по 5 октября 2007 года в Москве в Экспоцентре на Красной Пресне успешно прошла 5-я международная выставка по электронике, оборудованию, компонентам, технологиям «ChipEXPO-2007», организованная компанией «ЧипЭКСПО» при поддержке Министерства промышленности и энергетики РФ, Правительства Москвы, Федерального агентства по промышленности и Московской торгово-промышленной палаты.

Международная выставка «ChipEXPO-2007» является ведущей российской выставкой по электронике. Выставка объединила в своей работе представителей министерств и федеральных агентств, руководителей и специалистов российских и зарубежных предприятий, общественных организаций, журналистов ведущих отраслевых и массовых изданий. В этом году она собрала 275 предприятий, работающих в области микроэлектроники, электронных компонентов, технологий, измерительной техники и оборудования для электронной промышленности из России, Украины, Белоруссии, Нидерландов, Финляндии, Австрии, Великобритании, Германии, Гонконга, США, Чехии и Тайваня. В числе участников выставки ведущие компании отрасли, производители оборудования и компонентов, дистрибьюторы, средства массовой информации. За 3 дня работы выставка привлекла более 12 000 специалистов. Более 60 СМИ освещали работу выставки.

В церемонии торжественного открытия юбилейной выставки «ChipEXPO-2007» приняли участие представители Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации, Министерства обороны Российской Федерации, Управления радиоэлектронной промышленности и систем управления Федерального агентства по промышленности, Департамента науки и промышленной политики города Москвы, Префектур административных округов города Москвы, а также руководители ведущих предприятий отрасли. Участники церемонии торжественного открытия выставки отметили ведущую роль мероприятия, как традиционной площадки для профессионального общения специалистов и создания новых отношений с зарубежными партнерами.

Центральным событием деловой программы выставки стала Пленарная сессия Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации «Годовые итоги и перспективы развития электронной промышленности России».

В дни работы выставки были проведены семинары «Российский рынок электронных компонентов» и «Как снизить риск потерь времени и денег при разработке бренда для радиоэлектронной промышленности», а также конференция «Современная наноэлектроника» и ряд технических семинаров.

Состоялся традиционный конкурс на присуждение отраслевой премии «Золотой Чип». Компетентное Жюри определило победителей конкурса. В номинации «За развитие российской электроники» Диплом первой степени получил ФГУП «НПП Исток». В номинации «Лучшее технологическое решение» первое место получил ОАО «Авангард», а в номинации «Лучшее изделие микроэлектроники 2006-2007 гг.» ЗАО «НТЦ Модуль».

Выставки «ChipEXPO» - это всегда яркие, интересные мероприятия, насыщенные событиями, важными для отрасли, эффективными деловыми встречами и переговорами. Высокий интерес к мероприятию вызван тем, что выставка «ChipEXPO» в полном объеме отражает пути развития электронной промышленности России и способствует созданию условий для формирования рынка перспективной наукоемкой продукции и интеграции отечественных предприятий в мировой рынок электроники.

ЗАО «ЧипЭКСПО», Тел: (495) 221-5015
info@chipexpo.ru , sa@chipexpo.ru
<http://chipexpo.chipexpo.ru/>

