

# МАГНИТНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ

## В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Создание легких дисплеев [1], которые можно расположить вблизи глаз пользователя, дало толчок развитию систем виртуальной реальности (VR – virtual reality) и близких к ним систем дополненной реальности (AR – augmented reality) [2–7]. Первые погружают пользователя в среду, которая полностью генерируется компьютером в интерактивном режиме. В AR-системах пользователь находится в реальном мире, на который лишь накладываются изображения объектов, синтезированных компьютером [2, 3]. Важнейший параметр VR/AR-систем – точность совмещения реальных и виртуальных объектов. Точность наложения определяется качеством применяемой системы позиционирования – трекера (от англ. tracker – следящая система), определяющего положение пользователя и направление его взгляда. Наиболее эффективными являются трекеры на основе электромагнитных систем позиционирования (ЭМСП).

### УСТРОЙСТВО VR/AR-СИСТЕМ

Типичная VR/AR-система содержит несколько модулей (рис.1). Видеокамера на голове пользователя предназначена для наблюдения за реальным миром. Проектор и полупрозрачный отражатель служат для формирования изображения непосредственно перед глазами пользователя. Штора обеспечивает переход проектора из режима "immersive" (погружение) в режим "see-through" (смотрю насквозь). Система позиционирования также расположена на голове пользователя и жестко связана с видеокамерой и проектором. Вычислительное устройство (далее – вычислитель) может быть как стационарным, так и переносным в зависимости от решаемой задачи.

М.Желамский, к.т.н.  
zhelamsk@rambler.ru

При закрытии шторы на полупрозрачный отражатель попадает только изображение от видеокамеры. Когда штора открыта, наблюдать реальный мир можно непосредственно через отражатель. Возможна не только визуальная, но и аудио дополненная реальность – для этого предусмотрены наушники, позволяющие накладывать виртуальные аудиообразы на звуки реального мира.

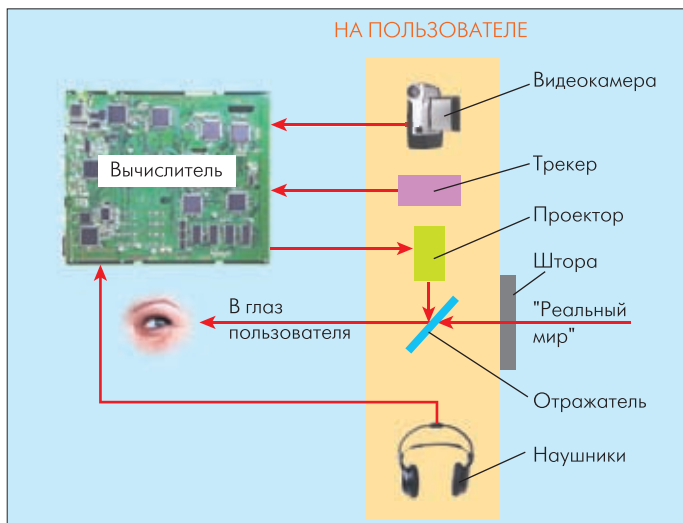
Трекер определяет шесть координат (три линейных и три угла Эйлера) подвижной видеокамеры или головы пользователя в системе координат внешнего мира. В режиме свободного движения может использоваться подвижная система координат пользователя.

AR-системы должны отвечать нескольким основным требованиям [2]:

1. Высокая точность наложения синтезированных объектов.
2. Частота обновления синтезированных объектов должна составлять не менее 10 Гц для обеспечения необходимой достоверности дополненной реальности.
3. AR-система должна иметь простую процедуру начальной настройки – без привлечения специального оборудования и персонала.
4. Оборудование AR-системы должно накладывать минимальные ограничения на движения пользователя.
5. Система должна обеспечивать малую задержку между движением пользователя и обновлением синтезированных объектов.

Среди указанных требований наиболее сложное – точность наложения [3]. Современные AR-системы не удовлетворяют данному требованию в полной мере – в основном из-за несовершенства систем позиционирования.

Существующие системы позиционирования требуют "подготовки" окружающего пространства для того, чтобы была достигнута необходимая точность позиционирования [8]. Подготовка включает освобождение пространства от ненужных и мешающих элементов, установку маркеров, видеокамер, источников физических полей, картографирование для учета искажений, вносимых в электромагнитные поля AR-систем металлическими элементами интерьера и т.д.



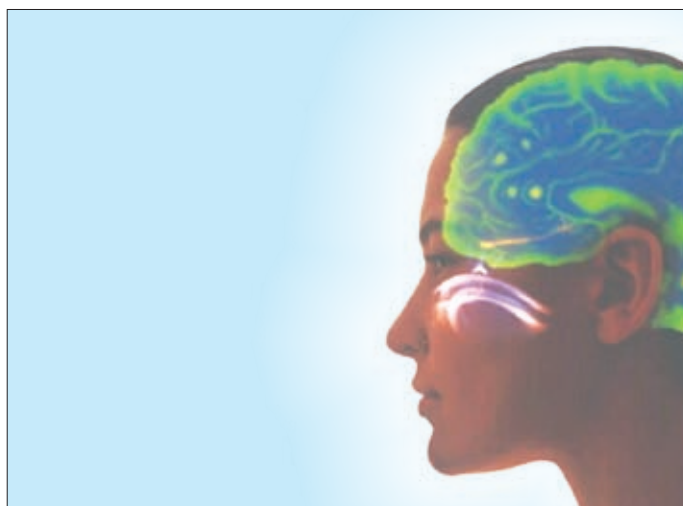
**Рис. 1. Структура современной AR-системы**

Лучшие из известных AR-систем способны в "подготовленных" пространствах достичь точности совмещения на уровне нескольких пикселей изображения. В неподготовленном пространстве поставленной задачи не решает ни одна из известных технологий позиционирования, а также их комбинаций.

### НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Системы виртуальной и дополненной реальности все глубже проникают как в профессиональную деятельность, так и в повседневную жизнь человека. Вот несколько примеров.

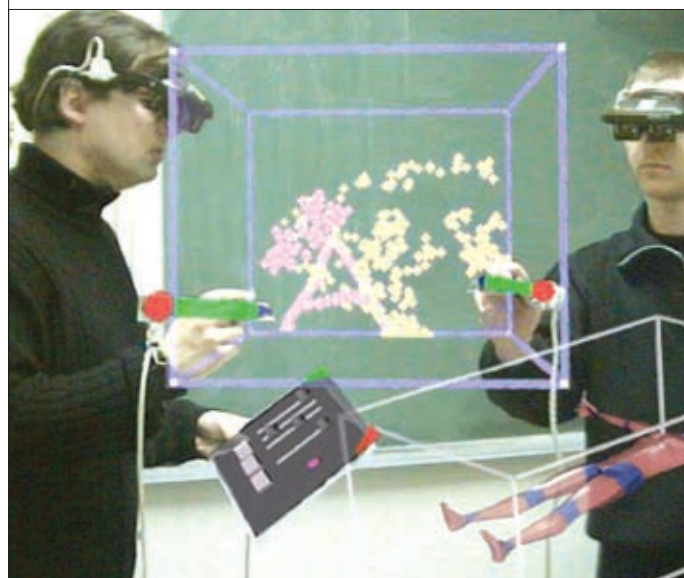
- Наблюдение внутренней анатомии [3] и визуализация скрытых объектов средствами дополненной реальности на фоне реального тела пациента применяется в медицине (рис.2).
- Многочисленные программы медицинской реабилитации предназначены, например, для восстановления двигательных способностей конечностей пациента, перенесшего инсульт [9]. VR-системы представляют в данном случае уникальную среду, в которой можно управлять движениями пациента. Подвижный датчик трекера, установленный на руке пациента, стимулирует выполнение таких за-



**Рис.2. Пример дополненной реальности в медицинском применении**

дач, как "дотянуться", "повернуть", "поймать", реабилитирующий эффект которых широко обсуждается в зарубежной печати.

- В военном деле больше всего известны нацеленные системы целеуказания и индикации [10,11], где виртуальный прицел накладывается на вид реального мира. Описываются также применения [3], в которых человек с помощью средств AR может наблюдать боевую технику, скрытую за некими объектами.
- Интересны предложения по инженерным применениям AR [12] – виртуальные конференции группы разработчиков или эксплуатирующего персонала с обменом 3D изображениями сложного изделия (рис. 3). Так, компания "Boeing" уже использует экспериментальные AR-системы для оперативного предоставления инструкций обслуживающему персоналу.



**Рис.3. Обсуждение сложного технического проекта с применением средств дополненной реальности**

- Воспроизведение звука в заданных точках пространства при попадании туда пользователя (аудио дополненная реальность) задействуется в развлекательных проектах, для звукового предупреждения пилотов самолетов, в управляющих системах и др. Связь звуковых образов с позицией пользователя активно обсуждается за рубежом в применении к работе музеев и галерей [13].

### МЕТОДЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Как же выполняется позиционирование подвижного пользователя в современных VR/AR-системах?

**Гибридные технологии.** Первые гибридные системы позиционирования включали в себя комбинацию компаса и датчика наклона на трех ортогональных гироскопах [14]. Такая система определяет только ориентацию (три степени свободы – 3DOF, от англ. degrees of freedom) и демонстрирует нестабильность из-за дрейфов. Точность наложения





Рис.4. Columbia's "Touring Machine" в сборе

не превышает один градус, что недостаточно для AR-систем. Аналогичная гибридная система позиционирования MARG (Magnetic, Angular Rate and Gravity) [15] была предложена в MIT еще в 1993 году. Система использует 3D-магнетометр, трехосевой датчик угловой скорости и трехосевой акселерометр. Другая простая система MARS – Mobile Augmented Reality System [16] использует GPS (в перспективе дифференциальную) и магнитный трекер. Простые гибридные системы накапливают ошибки, что ухудшает качество наложения, и не обеспечивают необходимой для AR-систем точности позиционирования. Следующим шагом гибридной технологии можно считать первую известную AR-систему для неподготовленного пространства – Columbia's "Touring Machine" [12]. Это полностью автономная система, которая содержит компас и датчик наклона (InterSense), объединенные с приемником дифференциальной GPS (рис.4). Точность наложения в такой системе приемлема в статическом случае, но существенно падает при движении пользователя.

**Визуальные трекеры.** Отдельное направление представляет собой позиционирование по визуальным маркерам, назовем это визуальным трекером. Метод основан на компьютерной обработке изображения, фиксируемого подвижной видеокамерой, и служит для определения положения и ориентации камеры по отношению к заранее заданным и определенным объектам реального мира – маркерам [2]. Маркеры – это точки или линии с известными координатами, которые выделяются видеосистемой из общей картины реального мира. Маркеры могут быть искусственными и естественными. Визуальное позиционирование внутри помещений, оборудованных искусственными маркерами, дает хорошие результаты. В открытом пространстве метод использует маркеры в виде строений, служебных знаков или любых легко обнаруживаемых объектов. После процедуры нанесения или определения маркеров визуальный трекер достаточно эффективно работа-

ет в открытом пространстве в статическом положении с крупными маркерами, но теряет качество при движении и с мелкими объектами [17]. Кроме того, визуальное позиционирование требует прямой видимости маркеров и зависит от освещения, например не работает в положении "против солнца".

Обработка изображения от подвижных камер требует больших вычислительных ресурсов, при этом нельзя исключать срывы – полную потерю сопровождения контролируемого объекта при движении пользователя. Поэтому для повышения надежности визуального трекера необходимы дополнительные средства позиционирования, например магнитные трекеры или гироскопы [18].

Визуальный трекер, адаптирующийся к положению активных маркеров, описан в работе [17]. Это HiBall – оптоэлектронная система позиционирования, воспринимающая свет от стационарных активных маркеров. Система включает шесть оптических датчиков и шесть линз с инфракрасными фильтрами. Каждый датчик может получать свет более чем через одну линзу (рис.5). Комбинации линз и датчиков дают 26 камер. Все эти камеры наблюдают свет от светодиодов, установленных на потолке (около 3000 штук). На основе данной информации и выводится положение и ориентация подвижного датчика HiBall. Датчик располагается на голове пользователя (рис.6), весит около 150 г и вместе с электроникой имеет размер мяча для гольфа. Частота измерений – до 1000 Гц. В системе реализован алгоритм автокалибровки, позволяющий адаптивно подстраиваться под реальное положение маркеров, что снижает требования по точности их установки.

**Магнитные трекеры.** Несмотря на влияние металла и быстрое падение магнитного поля с расстоянием, электромагнитные системы позиционирования (ЭМСП) весьма часто



Рис.5. Датчик системы HiBall



**Рис.6. Система HiBall на пользователе**

задействуют в различных приложениях [19]. Работают они и в AR/VR-системах [20,21]. Преимущества ЭМСП – минимальные размеры оборудования, простота установки, работа в отсутствие прямой видимости, относительно высокая частота измерений, высокая надежность и минимальные ограничения на свободу перемещения [2]. В составе AR/VR-систем применяют в основном ЭМСП DC-типа (от англ. direct current), в которых используется импульсное магнитное поле.

Последние разработки зарубежных производителей ЭМСП [22] позволяют рассматривать данные системы как прецизионное измерительное устройство при средних дальностях (до 600 мм), превосходящее по точности (включая динамические свойства) все альтернативные методы. На расстояниях до 600 мм точность позиционирования составляет доли миллиметра и доли градуса. Однако AR/VR-системы требуют расстояний больше 600 мм. Рассмотрим работу ЭМСП при больших расстояниях, скажем – до 3 м и более.

Известно, что с увеличением дальности точность магнитного позиционирования ухудшается. Это объясняется быстрым падением поля и ростом влияния металла в интерьере [23]. При этом имеют место как статическая, так и динамическая погрешности позиционирования [17,24], которые возрастают с удалением от излучателя. Статическая ошибка заметна уже на дальности больше одного метра. На расстояниях около 3 м магнитный трекер может иметь погрешность по дальности более 100 мм, особенно в присутствии металла или мощного электрического оборудования [20]. Для того, чтобы учитывать влияние металла, необходимы специальные процедуры корректировки. Кроме того, наличие технологических ошибок изготовления требует индивидуальной калибровки ЭМСП даже в свободном пространстве.

Один из способов коррекции влияния металла предложен для системы CAVE (и аналогичной ей системы NIST) [20,21]. В этой системе три сходящихся плоскости со стороной 3 м каждая используются для проецирования трехмерного виртуального изображения (рис.7). Для позиционирования головы оператора и указки в его руках служит магнитный трекер ком-

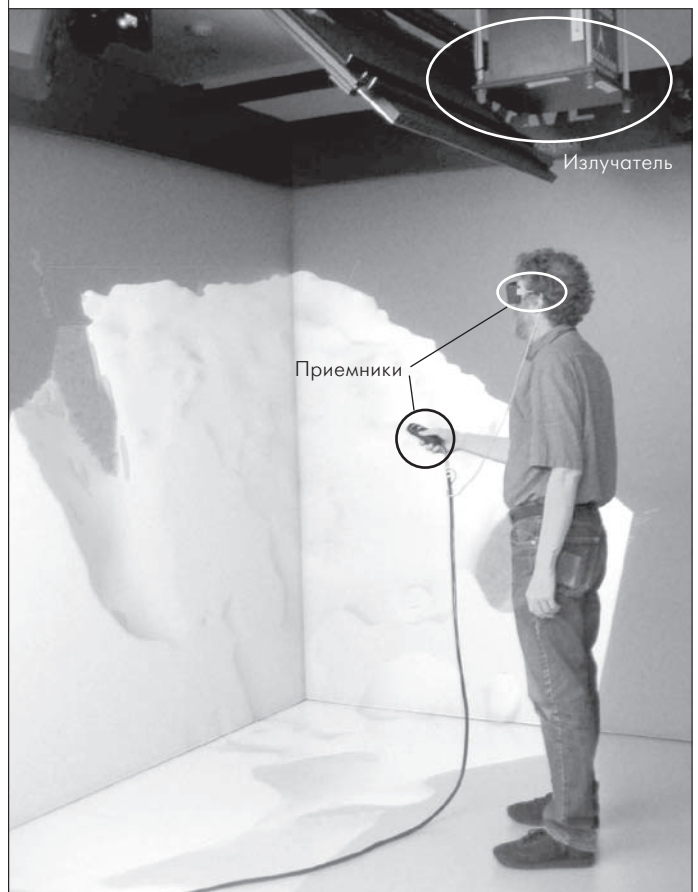
пании Ascension, излучатель которого расположен на потолке помещения. Специально для магнитного трекера проекционные экраны системы CAVE изготавливают из немагнитной аустенитной стали с низкой электропроводностью.

Модель калибровки этой системы построена на двух предположениях [20,21,24]:

- если излучатель неподвижен и металл неподвижен, то статическая ошибка есть функция координат приемника;
- ошибки определения положения и ориентации не зависят от ориентации, а зависят только от положения датчика.

Статическая калибровка магнитного трекера производится в дискретных точках зоны перемещения: вычисляемые линейные координаты сравниваются с результатами, которые получает ультразвуковая измерительная система [20]. Ультразвук пригоден для калибровки в условиях прямой видимости и при отсутствии эха, но непригоден для позиционирования из-за большой задержки на распространение звука.

Сбор данных в системе CAVE производится по сетке, содержащей около 400 точек, примерно через 30 см. Длительность процедуры калибровки не превышает двух часов. Калибруют только по линейным координатам при постоянной ориентации измерительного устройства. Перед калибровкой рабочую зону очищают от металла. Далее составляется таблица из выходных данных магнитного трекера и ультразвуковой системы и вычисляется разница между ними, которая затем используется для корректировки.



**Рис.7. Система NIST**

В результате калибровки точность линейного позиционирования увеличивается больше, чем точность ориентации. Ошибки линейного позиционирования на месте применения уменьшаются более чем на порядок величины от исходных значений. Остаточные значения находятся на уровне  $< 20$  мм. Ошибки ориентации уменьшаются не более чем вдвое – с 3 градусов до 1,5 градуса.

Описанные выше попытки калибровки ЭМСП были заранее обречены на неудачу, поскольку в их основе лежит неверная гипотеза о возможности разделения ошибок линейного положения и ошибок ориентации. Это следует из основного итерационного уравнения магнитного позиционирования [25]:

$$X_n = X_{n-1} - \Delta \cdot G_{n-1}, \quad (1)$$

где  $X_n$  – текущее решение, отражающее искомые 6 координат подвижного устройства (линейные координаты  $x, y, z$  и три угла Эйлера), которые соответствуют текущему измерительному циклу;  $X_{n-1}$  – координаты подвижного устройства на предыдущем измерительном цикле;  $\Delta$  – шаг итерационного процесса;  $G_{n-1}$  – вычисленный на предыдущем цикле градиент целевой функции  $F = \sum (V_m - V_c)^2$ , которая составлена как сумма (по детекторам магнитного поля, входящим в состав трекера) квадратов разностей измеренных  $V_m$  и вычисленных  $V_c$  значений компонент магнитного поля в точке с предполагаемыми координатами.

Уравнение (1) не допускает произвольного разделения переменных  $a$ , следовательно, несправедливо и предположение, что погрешность измерений есть сумма линейной погрешности и погрешности ориентации.

Вместе с тем, описанные подходы к статической калибровке трекера все же полезны тем, что позволяют оценить масштаб влияния интерьера в больших объемах.

Динамической ошибке позиционирования посвящено еще меньше публикаций, чем статической. В работе [20] динамическую ошибку связывают с задержкой выдачи результатов относительно реальных событий (latency), а также с "дрожанием" (jitter) выходных данных. Задержка вызвана физическими ограничениями быстродействия оборудования, дрожание – шумами излучателя и приемника и нестабильным окружением – колебаниями окружающего металла [24].

В работе [26] рассмотрен алгоритм предсказания и сглаживания результатов позиционирования на основе последовательного применения фильтра Калмана (ФК) [27] и фильтра Гаусса (ФГ) перед обработкой данных магнитного трекера в AR-системе. Операция предназначена для снижения динамических ошибок.

С помощью сглаженной последовательности координат после ФК можно проводить процедуру интерполяции [28], вводя достоверные данные, расположенные между фактичес-



кими измерениями. Это позволяет увеличить частоту обновления информации в ЭМСП.

Фильтр Гаусса устраняет "дрожания" выходных данных магнитного трекера за счет свертки последовательности выходных данных трекера и гауссова распределения вероятности [29].

Объединение ФК и ФГ позволяет существенно повысить точность наложения виртуальных и реальных объектов в AR-системах с использованием магнитного трекера. Однако следует помнить, что устранение задержки фильтром Калмана возможно только для гладких движений, у которых характерные частоты не превышают фактической частоты измерений.

**Сравнение методов позиционирования.** Гибридный метод позиционирования, как уже говорилось, неперспективен для AR-систем из-за низкой точности.

Визуальное позиционирование на сегодняшний день также не позволяет обеспечить требуемую точность наложения в неподготовленном неограниченном пространстве. Для визуального позиционирования требуется подготовка пространства – нанесение или выбор маркеров. Подготовка пространства для визуального трекера ничем не проще, чем для магнитного. Кроме того, любая реализация визуального метода позиционирования [17] требует определения начальных координат видеокамеры. Таким образом, проблема точного наложения виртуальных объектов на реальный мир на настоящий момент остается открытой. Систем позиционирования, не требующих подготовки пространства, на настоящий момент нет, и не предвидится. Но по совокупности параметров именно магнитное позиционирование наиболее перспективно как в закрытом, так и в открытом пространстве.

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ AR-СИСТЕМ

В дополнение к приведенному обзору методов позиционирования в AR-системах хотелось бы сформулировать некоторые направления ведущейся автором работы по усовершенствованию этих методов, а также предложить возможные перспективные варианты AR-систем.

**Калибровка магнитного трекера.** Из уравнения (1) следует, что стационарное решение (когда целевая функция  $F$  равна нулю) имеет место при совпадении измеряемых и расчетных значений магнитного поля при заданных координатах приемника. Это и есть критерий оптимальной калибровки, при которой достигается максимальная точность позиционирования в широком диапазоне координат. Следовательно, поправки следует вносить не в координаты, вычисляемые трекером, а в компоненты измеряемого магнитного поля, используемые трекером для вычисления координат. Модель коррекции ошибок по данной процедуре весьма проста – если в расчетное ядро поступают точные поля, то и все координаты будут вычисляться точно. Естественно, необходимым условием является правильная калибровка подвижного измерительного устройства. Опыт работ автора показал воз-

можность и эффективность такой калибровки, которую может выполнить только производитель ЭМСП, имеющий доступ к ядру вычислительной процедуры. В системе, разрабатываемой автором, применена именно такая процедура с корректировкой полей, а не координат.

**Адаптация магнитного трекера к изменяющемуся интерьеру.** В данном направлении представляется перспективным гибридное совмещение магнитного трекера с ультразвуковой системой. При этом последняя будет использоваться исключительно для адаптации к изменяющемуся интерьеру, а поправки вносятся в измеряемые магнитные поля. В начальный период работают обе системы – магнитная и ультразвуковая. Магнитная система сначала дает большие ошибки в измерении координат, так как рабочее пространство не подготовлено. Ультразвуковая система вносит поправки, которые запоминаются, и раз за разом уточняют выходные данные магнитной системы. С какого-то момента необходимость в ультразвуковой системе отпадает и работает только магнитная – со всеми своими преимуществами. Такая самообучающаяся модель с постепенным накоплением поправок будет функционировать с магнитным трекером не хуже, чем автокалибровка в описанной выше системе HiBall.

Адаптация любой системы позиционирования к изменяющимся условиям требует времени, и можно вести речь лишь о его сокращении. Именно через быструю адаптацию видится один из путей решения проблемы наложения в неподготовленном пространстве.

**Управление AR-системой.** Отдельный вопрос – управление AR-системой, в частности выбор пользователем интересующего объекта. Понятно, что стандартная клавиатура и мышь здесь не годятся. В зарубежной печати обсуждается



**Рис.8. Проект города с дополненной реальностью. Генераторы импульсного магнитного поля – в виде фонарей на мачтах высотой 30 м на расстоянии 300 м друг от друга. Художник – Чичерин Юрий Алексеевич**

вариант управления голосом оператора при помощи системы распознавания речи, встроенной в AR-систему [26]. Также рассматриваются специальные жесты оператора, которые система видеобработки воспринимала бы как управляющие команды.

Ничто не мешает использовать дополнительную ЭМСП с подвижным источником поля [19] для управления AR-системой в качестве 6DOF-мыши. Понятно, что подвижный приемник дополнительного, подвижного трекера должен быть установлен на руке пользователя для того, чтобы выявлять попадания в разные зоны тела, заранее определенные относительно переносного источника магнитного поля. Например, каждой пуговице на одежде пользователя можно приписать различные управляющие значения и выбирать нужную функцию прикосновением руки к разным пуговицам. Источник поля можно разместить на пояснике пользователя.

**Город с дополненной реальностью.** В завершение рассмотрим возможную перспективу – к чему может прийти технология дополненной реальности в условиях современного города. Будем рассматривать ЭМСП как наиболее эффективную технологию позиционирования, которая работает непрерывно, в любое время суток, в любых погодных условиях, как внутри, так и вне помещений. Главная проблема состоит в увеличении дальности работы магнитного трекера. Рассмотрим возможные подходы к ее решению.

Дальность работы магнитного трекера определяется величиной магнитного поля, генерируемого источником, в точке приема. При прочих равных условиях величина этого поля зависит от величины магнитного момента излучающего диполя.

Современный трекер обеспечивает дальность функционирования на уровне 3 м при величине магнитного момента ~50 а·м<sup>2</sup> и потребляемой мощности ~50 Вт [22, 30]. Увеличивая магнитный момент в 50 раз, получаем дальность действия уже в 150 м. Если располагать минимум поля по середине между двумя удаленными излучателями, то расстояние между ними составит 300 м. Для увеличения магнитного момента источника поля необходимо увеличить ток питания и площадь диполя. Из конструктивных соображений имеет смысл увеличить диаметр диполя до 1 м. При этом, с учетом необходимого увеличения тока питания, потребляемая мощность возрастет примерно до 2 кВт.

Таким образом, можно покрыть некоторую площадь (например, центр города) сетью излучателей магнитного поля с шагом не менее 300 м, где каждый излучатель будет представлять собой шар или куб с характерным размером один метр и потребляемой мощностью на уровне одного электрочайника. Для того, чтобы исключить воздействие на человека, излучатели можно поднять над уровнем земли, как это делается в системе мобильной связи или с проводами ЛЭП (рис. 8), или наоборот – погрузить под землю, что инвариантно для магнитного поля.

Увеличив мощность излучателей, можно сократить их количество на единицу площади. Зону можно увеличить до нескольких километров, как, например, в системах подземной навигации и посадки самолетов [19]. Компьютерное моделирование [25] подтверждает возможность создания такой сети.

Очки с проектором и магнитным приемником могут находиться в кармане любого пользователя и использоваться по мере необходимости. Вычислители могут быть как стационарными, так и переносными. На открытых пространствах связь со стационарными вычислителями может осуществляться по радиоканалу. В любое помещение можно будет вызвать мастера для включения в общую систему путем снятия карты поправок к полю в данном помещении. Начальная и периодическая процедура калибровки сети будет входить в эксплуатационный регламент.

Таким образом, появится еще одна городская инфраструктура, которых в современном мегаполисе и так уже имеется великое множество. В результате станут возможными разнообразные применения AR-систем, использующие ЭМСП как наиболее эффективный метод позиционирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Melzer J.E., Moffitt K.** Head-mounted displays. – McGraw-Hill, 1997.
2. **State A., Hirota G., Chen D.T.** et al. Superior augmented reality registration by integrating landmark tracking and magnetic tracking. – Proceedings of SIGGRAPH 96 (New Orleans, LA, August 4-9, 1996). In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series. 1996, ACM SIGGRAPH, p. 429–438.
3. **Vallino J.** Augmented reality page. Department of Software Engineering. Rochester Institute of Technology. – <http://www.se.rit.edu/~jrv/research/ar/>.
4. Дополненная реальность. Энциклопедия по компьютерной графике. <http://cgwiki.ru/index.php>.
5. **Анташов В.** Привязка к местности. – <http://www.traintech.ru/ru/public/index.php?path=positioning>
6. Сайт Института физико-технической информации. – <http://www.icpt.su/>.
7. **Митилино С.** "Розовые очки" Сазерленда, или новая реальность. – Компьютерное обозрение, Октябрь 2004, <http://itc.ua/18780>.
8. **Azuma R., Lee J. W., Jiang Bolan** et al. Tracking in Unprepared Environments for Augmented Reality Systems. – Computer & Graphics, 23, 6 (December 1999), p. 787–793.
9. **Stewart J.C., Yeh S.C., Jung Y.** et al. Pilot trial results from a virtual reality system designed to enhance recovery of skilled arm and hand movements after stroke. – Proceedings of the Fifth International Workshop on Virtual Rehabilitation, August 29–30, 2006, New York City, NY, USA.
10. **Годунов В.А., Степанов Д.В., Третьяков Д.А.** и др. Современные наשלемные системы целеуказания и индикации. – Авиакосмическое приборостроение, 2003, №5.
11. **Желамский М.В.** Магнитное позиционирование в наשלемных системах. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, №1, с.86.
12. **Azuma R., Bailiot Y., Behringer R., Feiner S.** et al. Recent Advances in Augmented Reality. – IEEE Transaction on

Computer Graphics and Applications 21, 6 (Nov/Dec 2001), p. 34–47.

13. **Mouchtaris A., Reveliotis P., Kyriakakis C.** Inverse Filter design for immersive audio rendering over loudspeakers. – IEEE transactions on multimedia, Vol. 2, №2, June 2000.
14. **Allen B.D., Bishop G., Welch G.** Tracking: Beyond 15 minutes of thought. – <http://www.cs.unc.edu>.
15. **Marins J.L., Yun X., Bachman E.R.** et al. An extended Kalman filter for quaternion-based orientation estimation using MARG sensors. – Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Maui, Hawaii, USA, Oct. 29 – Nov.03, 2001.
16. **Hollerer T., Feiner S., Terrauchi T.** et al. Exploring MARS: Developing indoor and outdoor user interface to a mobile augmented reality system. – Computer and Graphics, 23, Elsevier Publishers, 1999.
17. **Welch G., Bishop G.** SCAAT: Incremental tracking with incomplete information. – University of North Carolina. <http://www.cs.unc.edu/~welch>.
18. **You S., Neumann U.** Fusion of vision and gyro tracking for robust augmented reality registration. – IEEE Transaction on Virtual Reality 2001, Yokohama Japan, March 2001, p.71–78.
19. **Желамский М.В.** Электромагнитное позиционирование. Преимущества и области применения. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, №3, с.96.
20. **Livingston M.A., State A.** Magnetic tracker calibration for improved augmented reality registration. – University of North California. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 1997, Vol. 6, №5, p. 532–546.
21. **Hagedorn J.G., Satterfield S.G., Kelso J.T.** et al. Correction of location and orientation errors in electromagnetic motion tracking. NIST. – <http://math.nist.gov/mcsd/savg/papers/Tracker.Presence.pdf>.
22. **Schneider M., Stevens C.** Development and testing of a new magnetic-tracking device for image guidance. – <http://www.ascension-tech.com/>.
23. **Ghazisaedy M., Adamczyk D., Sandin D.** et al. Ultrasonic calibration of a magnetic tracker in a virtual reality space. The University of Illinois at Chicago, Electronic Visualization Laboratory, 1994. – <http://www.cs.usc.edu/Research/techreports/papers/02-767.pdf>.
24. **Kindratenko V.** Electromagnetic tracker calibration. – University of Illinois. – <http://www.ncsa.uiuc.edu/People/kindr/emtc/>.
25. **Годунов В.А., Желамский М.В., Степанов Д.В.** и др. Вопросы теории позиционирования подвижного объекта в магнитном поле. – Авиакосмическое приборостроение, 2003, №8.
26. **Malkawi A., Srinivasan R.S.** Building performance visualization using augmented reality. University of Pennsylvania. – [http://fsi.math.spbu.ru/archive/GraphiCon2004/Technical/2\[5\].pdf#search](http://fsi.math.spbu.ru/archive/GraphiCon2004/Technical/2[5].pdf#search).
27. **Maybeck P.S.** Stochastic models, estimation and control. – Academic Press Inc., New York, 1979.
28. **Айфичер Э., Джервис Б.** Цифровая обработка сигналов. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004.
29. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике. – М.: Наука, 1973.
30. **Годунов В., Желамский М., Метелкина Т.** и др. К вопросу достижения предельной точности позиционирования линии визирования цели на подвижных платформах. – Мехатроника, автоматизация, управление, 2007, №3.