

ЛАЗЕРНЫЕ ОПОРНЫЕ СИСТЕМЫ

В. Демкин, д.т.н., А. Демкин, М. Шадрин, ООО "Синергия", Рязань;
Ю. Будагов, д.ф.-м.н., ОИЯИ, Дубна

Проведение строительных, маркшейдерских, монтажных и геодезических работ требует точной разметки конструкций, контроля деформации и малых перемещений объектов. Среди конструкций, подвергающихся риску деформации, – крыши зданий, туннели, мосты, акведуки, стены зданий. Наиболее перспективны для проведения своевременного контроля и мониторинга деформаций несущих конструкций одновременно в нескольких точках лазерные опорные системы. Они обеспечивают высокую производительность, точность и дальность действия по сравнению с механическим методом и методом с использованием лазерных тахеометров.

Лазерные опорные системы (ЛОС) начали развиваться с начала шестидесятых годов. Со временем требования к таким системам существенно изменились: появились новые задачи, возросли требования к точности и функциональности измерений. Интенсивное развитие строительной отрасли привело к тому, что строительные объекты стали влиять друг на друга, участились случаи деформации уже построенных сооружений другими вновь строящимися объектами. Известны случаи разрушения таких объектов. Среди конструкций, подвергающихся подобному риску, – крыши зданий, туннели, мосты,

акведуки, стены зданий. Для предотвращения разрушения необходим своевременный контроль и мониторинг деформации несущих конструкций одновременно в нескольких точках. Похожая задача возникает и при строительстве объектов спецназначения, когда необходимо контролировать соосность отдельных участков на протяжении нескольких сотен метров. Особый интерес вызывает применение лазерной методики для юстировки большого числа ускорительных модулей линейного коллайдера ТэВ-ного диапазона. Такой контроль возможен при помощи специально сконструированной ЛОС. В этом случае датчики ставятся на всем протяжении опорной линии и работают в проходящем лазерном пучке (луче). Во всех системах подобного типа существует автоматическая компенсация ухода оси диаграммы направленности за счет введения поправочных коэффициентов. Координаты контролируемого объекта определяются как (рис.1):

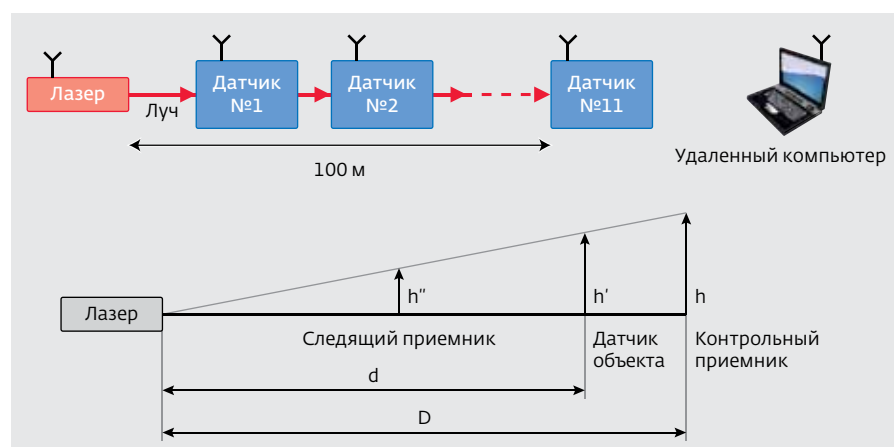


Рис.1. Компенсация ухода оси диаграммы направленности лазерного излучения

датчики ставятся на всем протяжении опорной линии и работают в проходящем лазерном пучке (луче). Во всех системах подобного типа существует автоматическая компенсация ухода оси диаграммы направленности за счет введения поправочных коэффициентов. Координаты контролируемого объекта определяются как (рис.1):

$$C_{x,y} = (h' - h'')_{x,y} - \frac{d}{D} \cdot (h' - h)_{x,y}.$$

В этом случае нет необходимости стабилизировать



ось диаграммы направленности. Конструкция системы упрощается, снижается стоимость, а точность не становится хуже.

Известно, что основными факторами, ограничивающими достижение высокой точности, являются нестабильность оси диаграммы направленности и турбулентность атмосферы. Однако при работе в проходящем лазерном пучке проявляются и другие факторы, ограничивающие точность. Основными элементами в системе ЛОС являются лазер и фотоприемное устройство, каждый из них вносит свой вклад в ошибку измерения.

В практике измерений линейного отклонения объекта от опорной линии лазерного луча возникает задача пространственной визуализации поперечного сечения светового пучка. Ее решают путем изучения распределения поля интенсивности лазерного пучка с последующим нахождением его центра. Для определения центра наиболее часто применяют два метода. Это метод с использованием координатно-чувствительного фотоприемника и метод

с применением многоэлементной фоточувствительной матрицы.

В первом случае центр $C_{x,y}$ определяется как центр тяжести:

$$C_{x,y} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} xI(x,y) \cdot dx \cdot dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x,y) \cdot dx \cdot dy},$$

где: $I(x,y)$ – функция распределения интенсивности в сечении светового пучка на координатно-чувствительном приемнике. Достоинства метода – быстрдействие, неограниченное разрешение и простота схемотехнической реализации [1]. Однако при использовании координатно-чувствительного фотоприемника достаточная точность достижима только в случае, если мощность в сечении лазерного пучка распределена симметрично. Искажение формы изображения пятна от воздействия различных aberrаций и неравномерные внешние засветки вносят существенную ошибку в результат измерений. В случае, когда используют многоэлементную фоточувствительную матрицу, возможности оценки центра лазерного пучка повышаются.

Помимо центра тяжести применяются интерполяционные и корреляционные методы оценки центра, аппроксимация гаусс-функцией, аппроксимация параболической функцией, медианный метод [2]. При сравнении скоростей алгоритмов и их относительной точности метод центроиды не значительно уступает в стабильности другим перечисленным методам [2], имеет наибольшее быстродействие и может быть применен непосредственно к сигналу в реальном времени и позволяет производить вычисления с темпом поступления данных [3]. Однако точность последнего метода существенно зависит от величины порога сегментации и времени экспозиции (рис.2). Для получения хороших результатов этим способом необходимо предварительное определение значения порога сегментации сигнала по гистограмме распределения интенсивностей [4].

Размеры приемной площадки распространенных координатно чувствительных приемников и многоэлементных матриц ограничены, максимальный размер – порядка 20×20 мм. При большем диапазоне измерений этот размер уже не позволяет проецировать луч напрямую на фоточувствительную область. Поэтому используют либо оптическую систему, либо светорассеивающий экран. Такие оптические системы, как,

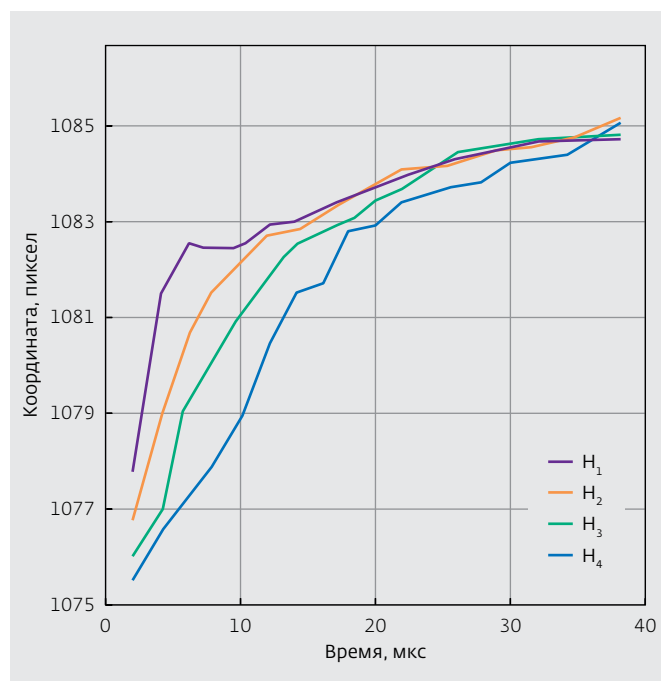


Рис.2. Зависимость значения координаты центра пятна от времени экспозиции при различных величинах порога сегментации (в условных градациях яркости): $H_1 - 44$, $H_2 - 56$, $H_3 - 71$, $H_4 - 93$

например, запатентованная французской фирмой Thomson CSF [5] в устройстве контроля отклонений размерных точек конструкции трубопровода, работают в основном с четырехсекторными фотодиодными приемниками (рис.3а). Размер фоточувствительной области такого датчика достигает дюйма. Использование светорассеивающего экрана расширяет светочувствительную область до метра и более (рис.3б).

Косое падение света может вызвать существенные нелинейные искажения при передаче градации интенсивности, даже при незначительной вариации углов падения световых лучей. Кроме того, сама структура светового поля может изменяться при отражении (рассеивании) от шероховатой поверхности. Когда лазерный пучок отражается и рассеивается шероховатой поверхностью, появляются спеклы. Возникает шум спеклов, который вносит неопределенность в локализацию центра пятна и, следовательно, в измерение положения объекта. Анализ этой проблемы дан в [6, 7]. Хауслер показал, что неопределенность измерения расстояния сильно зависит от апертур оптических систем и от угла наблюдения пятна:

$$\Delta z = \frac{C^* \lambda}{2\pi \sin U \sin \theta},$$

где: C^* – контраст спеклов; θ – угол наблюдения пятна; $\sin U$ – апертура оптической системы; λ – длина волны лазерного излучения.

За возникновение шума спеклов ответственна пространственная когерентность. Поэтому использование лазера однозначно приводит к их появлению. Интерференционный контраст спеклов можно уменьшить. В [8] показано, что для

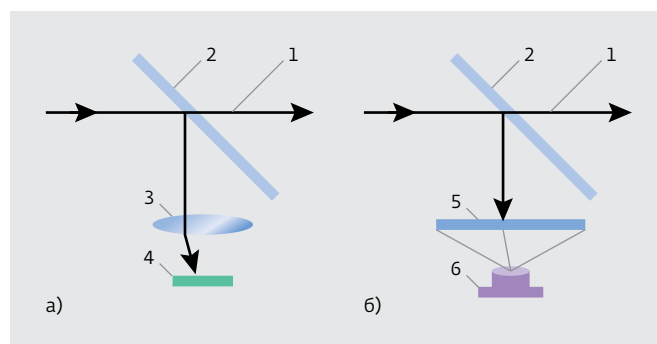


Рис.3. Схема получения координат проходящего лазерного пучка: 1 – луч лазера; 2 – светоделительная пластина; 3 – фокусирующая линза; 4 – координатно чувствительный фотоприемник; 5 – светорассеивающий экран; 6 – многоэлементная фоточувствительная матрица (ПЗС или CMOS) с объективом



лазерного пучка с широким спектром спеклы различных частот будут декоррелированы, если выполняется соотношение

$$l_c \leq 4\pi\sigma_z,$$

где: l_c - длина когерентности; σ_z - измеренная шероховатость. Таким образом, для существенного снижения контраста спеклов длина когерентности должна быть меньше поверхностной шероховатости. Величина неопределенности, вносимая спеклами, составляет десятки микрон [9] и может сильно увеличиваться на наклонных поверхностях.

Источником излучения в ЛОС являются лазеры. Вместо He-Ne-лазеров стали использовать полупроводниковые лазеры, более дешевые и значительно опережающие газовые по массе-энергетическим показателям. Однако коллимация пучка полупроводникового лазера значительно сложнее, чем у He-Ne-лазера. В большинстве лазерных диодов излучение выходит через торец активного слоя. Маломощные лазерные диоды типа index-guided, которые в основном используются в опорных системах, имеют размеры активной области в плоскости X-Y от 0,1 до 3 мм. Эллиптичность пучка при этом лежит обычно в диапазоне от 2,6 до 6. Пучок будет иметь гауссов профиль по осям X и Y и описывается выражениями:

$$d_x = d_{x0} \left[1 + \left(\frac{M^2 Z}{Z_{RX}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}; d_y = d_{y0} \left[1 + \left(\frac{M^2 Z}{Z_{RY}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

где: Z - расстояние от лазера до поперечного сечения; d_{x0} - размер излучающей поверхности по оси X; d_{y0} - размер излучающей поверхности

по оси Y; $Z_{RX} = 4\lambda / \pi d_{x0}^2$ и $Z_{RY} = 4\lambda / \pi d_{y0}^2$ - рэлеевские длины пучка в X- и Y-направлениях соответственно, λ - длина волны; M^2 - фактор, описывающий девиацию пучка от основной поперечной моды. Для пучков, генерируемых лазерными диодами, $M^2 = 1,2$. Углы расходимости пучка в дальней зоне θ_x и θ_y определяются выражениями:

$$\theta_x = \frac{4M^2\lambda}{\pi d_{x0}}; \theta_y = \frac{4M^2\lambda}{\pi d_{y0}}.$$

Поскольку $d_{x0} > d_{y0}$, то и $\theta_x < \theta_y$, следовательно, пучок будет эллиптическим. Для $\lambda = 670$ нм углы расходимости $\theta_x = 13^\circ$ и $\theta_y = 53^\circ$. Необходимо также отметить, что на расстоянии несколько микрометров от эмитирующей поверхности лазерного диода размер пучка по оси X равен размеру пучка по оси Y и поперечное сечение пучка имеет форму круга. На основании вышеизложенного проведем анализ методов коллимации пучка от лазерного диода.

Простейшим способом коллимации является использование коллимирующей линзы. В качестве такой линзы может быть применена простая сферическая линза, асферическая линза, аксионочная линза или коллектив линз. Апертура и фокусное расстояние большинства коллимирующих асферических линз составляет несколько миллиметров. Числовая апертура такой линзы меньше, чем размер светового поля по оси Y, и апертура линзы обрезает пучок по оси Y. Коллимируемый пучок имеет на определенном расстоянии от линзы круглое сечение, но в дальнем поле имеет эллиптическую форму. Профиль интенсивности по сечению пучка в дальнем поле квазигауссов. В направлении оси Y профиль сечения пучка имеет два боковых лепестка, обусловленных обрезкой пучка коллимирующей линзой. Использование коллимирующей линзы не



Сравнение различных методов коллимирования пучка излучения лазерного диода

Параметры	Методы коллимации пучка					
	Коллимирующая линза	Аксиконовая линза	Круглая апертура	Анаморфные призмы	Одномодовый световод	Микролинза
Астигматизм	5–15 мкм	Корректируется при использовании дополнительной цилиндрической линзы			Корректируется	
Форма пучка	Эллиптическая	Круговая	Круговая	Круговая	Круговая	Круговая
Оптические потери	~20%	20–40%	60–80%	~50%	~70%	~20%
Качество волнового фронта	Боковые лепестки	Дифракционные кольца	Боковые лепестки и дифракционные кольца	Среднее	Очень хорошее	Хорошее
Размер оптической системы	Компактный	Компактный	Компактный	Большой	Большой	Компактный
Стоимость	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая	Высокая	Средняя

является простым способом получения пучка с круглой формой поперечного сечения. Следует отдельно выделить коллимацию при помощи аксиконовой линзы. После аксиконовой линзы наблюдается интерференционная картина в виде концентрических колец. Распределение интенсивности по сечению пучка примерно равно I_0^2 , где I_0 – функция Бесселя нулевого порядка первого рода. Форма этой интерференционной картины не изменяется вдоль оптической оси. Диаметр центрального пятна зависит от угла аксикона и может составлять десятки микрон [10]:

$$d = 2,4\lambda / \pi(n - 1)\alpha; (\alpha \ll 1),$$

где: α – угол аксикона; λ – длина волны лазерного излучения; n – показатель преломления материала.

Используя аксиконовые линзы, можно получить расходимость пучка $\theta = 0,1 - 0,2$ мрад. Круговое сечение пучка можно получить, используя круглую апертуру, расположенную после коллимирующей линзы. Она вырезает часть пучка, и после нее эллиптический пучок имеет круговое сечение. Недостатки такого метода очевидны. Малая круговая апертура приводит к значительной потере интенсивности и появлению дифракционных колец в дальней зоне. Профиль интенсивности пучка после апертуры остается эллиптическим, и сохраняется астигматизм. Астигматизм может быть скорректирован цилиндрической линзой. Однако пучок, сколлимированный

и скорректированный на астигматизм, в поперечном сечении имеет эллиптическое распределение интенсивности. Распределение интенсивности можно сделать круговым при помощи оптических клиньев (анаморфных призм). Пара анаморфных призм способна увеличить или уменьшить размер пучка вдоль одной оси, перпендикулярной к направлению распространения, сохраняя размер по ортогональной оси неизменным. Использование призм может изменить размер пучка, но не изменит расходимость. Астигматичный пучок на входе линзы таким же остается на выходе. Потери интенсивности излучения при прохождении призм достаточно велики и могут достигать 50%. Требования к изготовлению очень высоки, что определяет высокую стоимость такой оптической системы.

Получить круговую форму пучка с гауссовым распределением интенсивности и коррекцией астигматизма от диодного лазера можно, если использовать одномодовый световод. Такой световод с длиной, гораздо большей длины волны лазерного излучения, может достаточно эффективно "смешивать" пучок, в результате чего пучок на выходе из световода теряет поперечные пространственные характеристики, но остается когерентным. Кроме кругового сечения, выходной пучок имеет гауссовый профиль и характеризуется отсутствием астигматизма.

Качество пучка, получающегося на выходе оптической системы с одномодовым световодом, не уступает качеству пучка одномодового

He-Ne-лазера [11]. Единственная проблема при использовании такого метода – стыковка одномодового волокна с лазерным диодом. Диаметр одномодового световода составляет около 2–4 мкм и числовая апертура около 0,11. Тело излучения лазерного диода имеет размер 12 мкм по большей оси и 3 мкм по малой. Отсюда потери интенсивности весьма значительны и доходят до 70%.

Современные технологии позволяют обеспечить круговое сечение пучка и скорректировать астигматизм при помощи микролинз, расположенных определенным образом. Микролинза устанавливается внутри лазерного диода, причем главная плоскость линзы находится на расстоянии около 10 мкм от эмитирующей поверхности, т.е. в том месте, где лазерный пучок имеет круговую форму. Фокальное расстояние микролинзы выбирается таким образом, чтобы $\theta_x = \theta_y$. Как следствие, пучок имеет круговую форму поперечного сечения и осуществляется коррекция астигматизма. Потери мощности в такой оптической системе не превышают 20%, согласитесь – это гораздо меньше вышеописанного. Единственный недостаток такого метода состоит в том, что малые размеры микролинзы (поперечный размер около 200 мкм) и небольшое расстояние между линзой и эмитирующей поверхностью лазерного диода предъявляют высокие требования по такой установке микролинзы. В таблице приведено сравнение различных методов коллимирования пучка излучения лазерного диода.

Помимо качества распределения интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка на точность измерения отклонения от опорной линии влияет режим работы полупроводникового лазера. Более подробно этот вопрос рассмотрен в [12, 13]. Приведем только типичную зависимость координаты X центра пятна

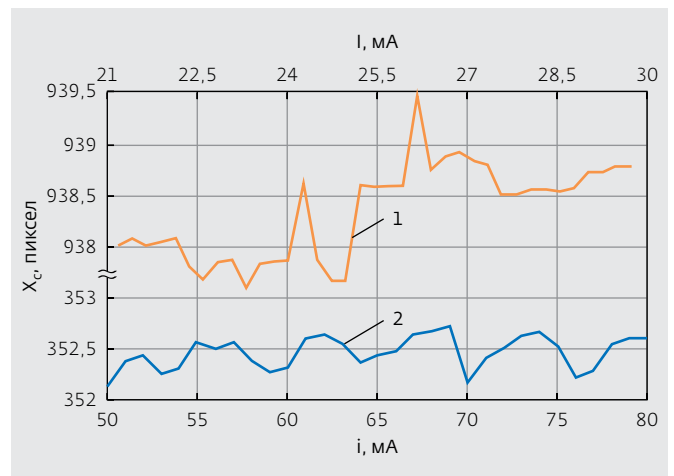


Рис.4. Зависимость координаты центра пятна от тока лазерного диода (кривая 1 – мощность лазерного диода – 5 мВт, фотоприемник – 2048 пикселей; кривая 2 – мощность 30 мВт, фотоприемник – 640 пикселей)

опорного лазерного луча X_c от величины тока лазерного диода i (рис.4). Очевидно, что режимы работы лазерных диодов по току и температуре в прецизионных ЛОС надо стабилизировать.

При распространении на большое расстояние в воздушной среде лазерный луч испытывает влияние внешних условий: вариации оптического коэффициента преломления воздушной среды и присутствие в воздушной среде взвешенной пыли и аэрозолей. В работе [14] экспериментально изучен способ уменьшения влияния турбулентности воздушной среды на точность локализации лазерного луча. Работа выполнена в рамках подготовки к созданию высокоточной лазерной методики для юстировки компонентов длинного линейного коллайдера. Лазерный пучок распространяется внутри теплоизолирующей трубы на расстояние 9 м от источника.

Работа по такой схеме позволила снизить среднеквадратичное отклонение в измерении координат центра оси диаграммы направленности с 21 мкм до 2 мкм для одномодового He-Ne-лазера. Исследования выявили основной фактор, повышающий точность измерений, – стоящие звуковые волны, возникающие внутри трубы [15].

Специалисты фирмы "Синергия" разработали систему контроля и мониторинга протяженных объектов "Горизонт" (рис.5). Она предназначена специально для измерения деформации в большом диапазоне на расстоянии до 100 м. Точность 0,2 мм в диапазоне 100 мм. Обмен информацией между десятью рабочими датчиками и управляющим контроллером осуществляется по интерфейсу RS-485, измерительная информация может быть передана на удаленный компьютер по телефонной линии или радиоканалу. Каждый датчик имеет автономное питание, срок работы системы без подзарядки – один месяц. Система опробована в Сергиево-Посадской лавре (рис.6) для мониторинга деформации стены трапезной палаты.



Рис.5. Датчик системы "Горизонт"



Рис.6. Система "Горизонт" в Сергиево-Посадской лавре

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарин А. Позиционно-чувствительные фотодатчики. – Электронные компоненты, 2003, №7, с. 103-107.
2. Naidu D.K., Fischer R.D. A comparative analysis of algorithms for determining the peak position of a stripe to subpixel accuracy. – Proc. British Machine Vision Conf., Glasgow, 1991, p. 217-225.
3. Braggins D. Achieving sub-pixel precision. – Sensor Review, 1990.
4. Venediktov A.Z., Demkin V.N., Dokov D.S. Choice of optimum modes of laser triangulation meter at control of surface form. – Proceedings of SPIE, v.5381, p. 103-109.
5. Патент Франция №2.153.798(B) кл. G01b

- 11/00, опублик. 8.6.1973.
6. Dorsh G., Hausler G., Herrmann M. Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement. – Applied Optic, 1994, v.33, Issue 7, March, p.1306-1314
7. Hausler G. et al. New Range Sensors at the Physical Limit of Measuring Uncertainty. – Proc. of the Topical Meeting on Optoelectronics Distance Measurements and Applications, Nantes, 1997.
8. George N., Jain A. Speckle reduction using multiple tones of illumination. – Appl. Opt., 1973, №12, p.1202-1212.
9. Hausler G. Handbook of Computer Vision and Application, v.1, Sensors and Imaging, 1999, p.485-506.
10. Bickel G., Hausler G., Maul M. Triangulation with expanded range of depth. – Optical Engineering, 1985, November/ December, v.24, №6, p.975-977.
11. Johnson F. A High Accuracy, Position Compensated

Laser Alignment System, www.aps.anl.gov/conferences/iwaa97/papers/johnson.pdf.

12. Вenediktov A.Z., Demkin V.N., Dokov V.S. Измерение параметров колесных пар подвижного состава во время движения. – Железные дороги мира, 2003, № 9, с.33-36.
13. Demkin V.N., Dokov D.S., Privалов В.Е. Особенности применения лазерных диодов в линейных измерениях. – ПЖТФ, 2004, т.30, вып. 13, с.40-44.
14. Batusov V. et al A study of an Air Medium Influence on the Rectilinearity of Laser Ray Proliferation Towards the Using for Large Distances and High-Precision Metrology. – Phys. Prt. Nucl. Lett., 2007, v.4, №1 (137), p.155-156.
15. Батусов В.Ю. и др. Наблюдение особенностей распространения лазерного луча в воздушной среде со стоячими звуковыми волнами. Препринт ОИЯИ. Дубна, 2009.