

ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.02

DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-6-627-635

Автоматизация геодезических измерений — цифровая реальность

© 2019 г. В.П. Савиных, Х. К. Ямбаев*

Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

*yambaev@miigaik.ru

Automation of geodetic measurements — digital reality

V.P. Savinykh, Kh.K. Yambayev*

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

*yambaev@miigaik.ru

Received June 27, 2019

Revised November 18, 2019

Accepted December 2, 2019

Keywords: calibration, CCD matrix, coordinate positioning, digital technology, electronic, inclinometer, levelir, tacheometer, TIM technology.

Summary. Within «Industrial 4.0», so-called digital production becomes a key aspect. An aspect of digital technology of geodetic measurement automation is considered, such as the use of properties and features of the basic basis of collection and updating of digital data of multi-element photovoltaic chips (MPM) in the form of CCD and KMOS-matrices. Their use for automation of the corresponding types of geodetic measurements by digital levelers, electronic tacheometers and digital inclinometers is justified. The formation of a binary bitstream directly on board the satellite in digital GNSS positioning technology is shown. The importance of TIM modeling is noted for the development of an optimal geodetic monitoring project for the deformation of engineering structures. Other important aspects of digital measurement automation technology are also formulated.

Citation: Savinykh V.P., Yambayev Kh.K. Automation of geodetic measurements — digital reality. *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotosyemka»*. Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying». 2019, 63 (6): 627–635. [In Russian]. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-6-627-635.

Поступила 27 июня 2019 г.

После доработки 18 ноября 2019 г.

Принята к печати 2 декабря 2019 г.

Ключевые слова: инклинометр, калибровка, координатное позиционирование, нивелир, ПЗС-матрица, тахеометр, ТИМ-технология, цифровая технология, электронный.

Рассматривается такой аспект цифровой технологии автоматизации геодезических измерений, как использование свойств и особенностей первоосновы сбора и обновления цифровых данных многоэлементных фотоэлектрических микросхем в виде ПЗС(СDD) и КМОП(СMOS)-матриц. Обосновывается их использование для автоматизации соответствующих видов геодезических измерений цифровыми нивелирами, электронными тахеометрами и цифровыми инклинометрами. Показано формирование двоичного битового потока непосредственно на борту спутника в цифровой ГНСС-технологии координатного позиционирования.

Для цитирования: Савиных В.П., Ямбаев Х.К. Автоматизация геодезических измерений — цифровая реальность // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2019. Т. 63. № 6. С. 627–635. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-6-627-635.

Введение

В последние время в центре внимания крупнейших технологических корпораций, ведущих бизнесменов и политиков мира находится Четвертая промышленная революция или «Индустрия 4.0». Ключевым аспектом становится так называемое «цифровое производство». Под этим понятием подразумевается многоуровневая система, включающая в себя автоматизированные измерительные приборы или системы (сенсоры) для повторных геодезических измерений в процессе мониторинга пространственного положения конкретных узлов, агрегатов или несущих строительных конструкций объектов, средства передачи полученной информации и их визуализации, мощные аналитические инструменты интерпретации получаемой информации и многие другие сопутствующие компоненты [1].

Еще в декабре 2016 г. Президент России Владимир Путин поручил разработать и утвердить программу «Цифровая экономика», в которой должны быть предусмотрены меры по созданию правовых, технических, организационных и финансовых условий для развития цифровой экономики в нашей стране и ее интеграции в пространство цифровой экономики. Приоритетные направления в рамках данной программы, прежде всего, энергетика, играющая особую роль в современной российской экономике, образование, наука, транспорт и др.

Цифровое производство представляет собой, по сути, модульную структуру, которая может вводиться в эксплуатацию по частям, предоставляя достаточно времени для оценки эффективности систем на каждом этапе. Именно поэтому мы говорим скорее как об эволюции производства, а не революции в нем.

Ключевая составляющая концепции цифрового производства — использование определенного программного обеспечения, позволяющего технологам осуществлять свою деятельность более эффективно. Причем, в большинстве случаев речь идет не о том, что технолог выполняет присущую ему работу новым способом, а о совершенно новых, более

эффективных процессах. Такая система состоит из активных компонентов — модулей, способных автономно управлять конкретным участком единого производственного процесса.

В целом, выгоды от использования концепции цифрового производства состоят, в первую очередь, в снижении количества ошибок в реальном производстве за счет их обнаружения и устранения на ранних этапах подготовки в виртуальной среде т.е. целесообразно предварительно использовать технологии информационного моделирования. Терминология в области информационного моделирования еще не устоялась. В России появился и уже используется термин ТИМ (технологии информационного моделирования). ТИМ-центры могут стать драйверами внедрения цифровых технологий. Применение этих технологий существенно экономит средства и время в процессе изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации разных сооружений (здания, дороги, мосты, карьеры). ТИМ предполагают участие самых разных специалистов — геодезистов, маркшейдеров, геологов, геофизиков, проектировщиков, экономистов, а также сотрудников эксплуатирующих организаций. Использование ТИМ-технологий благоприятно сказывается на общих затратах на производство (стоимость устранения реальных ошибок всегда выше, чем виртуальных), а также на времени подготовки производства, поскольку ошибки в технологии обнаруживаются и устраняются на этапе проектирования, поэтому, запуск производства осуществляется в более короткие сроки.

Любая автоматизация на основе цифровых технологий, связанная с централизованной информационной системой, — это часть «цифровой станции». Концепция «цифровой станции» предполагает полную автоматизацию процессов, включая как управление отдельными средствами измерений, так и технологически связанными геотехническими датчиками (сенсорами). Один из основных компонентов системы автоматизации геодезических измере-

ний — специализированное программное обеспечение (ПО), устанавливаемое на сервере центра мониторинга. Данное ПО должно обеспечивать следующие функции: управление измерительными системами, сбор, обработку и сохранение в локальной базе результатов измерений, визуализацию, проверку каждого параметра на вхождение в заданные допуски, формирование оповещений при нештатных и критических ситуациях (при помощи SMS, e-mail, включении локальной сирены).

Роль геодезии в цифровой индустрии

Поскольку основа цифровой экономики — цифровые данные, важнейшим аспектом становится наличие соответствующих методов, средств и систем сбора и обновления цифровых данных. К таковым можно отнести цифровое геометрическое нивелирование, высокоточную инклинометрию, электронную тахеометрию, наземное и воздушное лазерное сканирование, ГНСС-технологии координатного позиционирования, автоматизированные системы мониторинга состояния зданий и инженерных сооружений и т.п. Полученные путем непосредственных измерений цифровые данные должны находиться в определенных системах отсчета (координат), привязаны к единому началу отсчета, а по точности соответствовать расчетным допускам.

В настоящее время практически все современные геодезические средства сбора (измерения) первичной цифровой информации (датчики-сенсоры) [2, 3] основаны на использовании преобразователей с переносом зарядовой связи — многоэлементных фотоэлектрических микросхем (МФМ) в виде ПЗС (CCD) и КМОП (CMOS)-матриц. Это относится к цифровым системам геометрического нивелирования, электронной тахеометрии, цифровой инклинометрии и цифровой фотограмметрии. Считаю необходимым эту первооснову «цифровизации» особо подчеркнуть и рассмотреть в данной работе еще и в связи с широким публичным обсуждением в рамках цифрового производства (ВМ и ТМ-технологий модели-

рования), а также с упорным использованием в докладах и публикациях таких терминов, как «умный город, умная картография», «умная фотограмметрия», умный (smart) тахеометр, smartstation (переводят как «умная станция») и т.п. Видимо, считается, что ранее все это было «глупым» или в русском языке не находят другие определения?

Принцип действия ПЗС (CCD) и КМОП (CMOS)-матриц

В первом приближении многоэлементную светочувствительную микросхему зарядовой связью (ПЗС) можно представить как совокупность равномерно расположенных полупроводниковых фотодиодов со светоприемным окном и двумя контактами для съема возбужденного электрического сигнала [3, 4]. Работа ПЗС (CCD) основана на идее сохранять, а затем считывать электронные заряды. Первый CCD-преобразователь разработан в корпорации BELL в конце 1960-х годов ПЗС (CCD)-преобразователь — это аналоговая интегральная микросхема, в состав которой входят светочувствительные фотодиоды на основе кремния или оксида олова. Таких светочувствительных кремниевых площадок — пикселей, преобразующих световую энергию в электрические заряды, в ПЗС очень много: от нескольких тысяч до нескольких миллионов и более. Пиксели могут быть уложены в один непрерывный ряд — ПЗС-линейка (рис. 1, а) или одинаковыми рядами и столбцами заполнять участок поверхности правильной формы, как правило, в виде прямоугольника или квадрата — ПЗС-матрица (см. рис. 1, б) [5].

После экспонирования (засветки проецируемым изображением) электронная схема управления прибором подает на него сложный набор импульсных напряжений, который сдвигает накопленные в пикселях электроны на измерительный элемент, создавая в нем сигналы, пропорциональные отдельным зарядам, далее мы можем получить значение накопленного заряда и определить, какому пикселу на матрице (номер строки и номер столбца) он

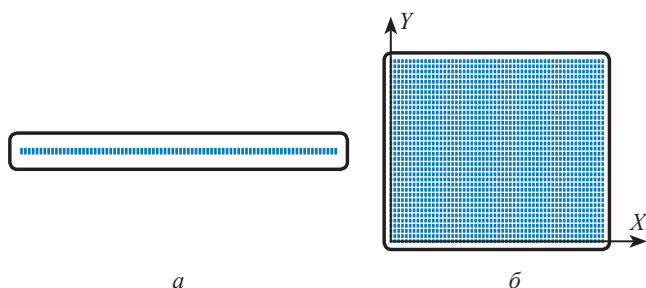


Рис. 1. Расположение светоприемных элементов:

a — ПЗС-линейка; *б* — ПЗС-матрица

Fig. 1. Location of light-receiving elements:

a — CCD-ruler; *б* — CCD-matrix

соответствует. В начале 1970-х годов компания «Sony» стала активно заниматься CCD-технологиями и, потратив огромные средства, сумела наладить массовое производство ПЗС-матриц для своих многочисленных фото- и видеокамер.

Светочувствительные регистрирующие матрицы современных цифровых устройств и систем можно классифицировать по методу считывания информации на CCD- и CMOS-матрицы (рис. 2) [2], в русской транскрипции соответственно ПЗС-матрицы (преобразователи с зарядовой связью) и КМОП-матрицы (комплементарные металл-оксидные полупроводники). С развитием технологий производства CCD- и CMOS-матриц меняются и их характеристики, поэтому сложно сказать, какая из этих двух типов матриц лучше при том или ином их применении.

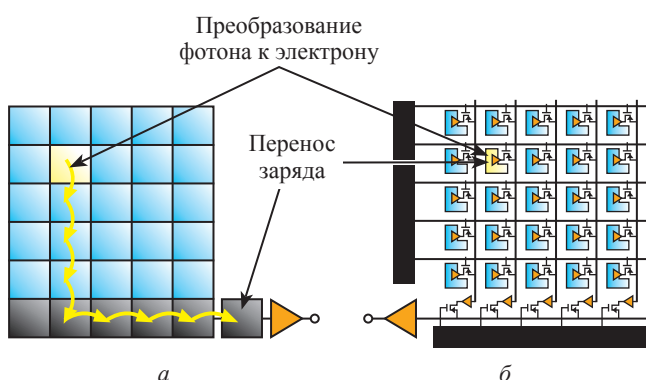


Рис. 2. ПЗС-матрица (*a*) и КМОП-матрица (*б*)

Fig. 2. CCD-matrix (*a*) and CMOS-matrix (*б*)

Предпосылки применения ПЗС-систем и технологий в автоматизации геодезических измерений

Важнейшим для разработки и создания геодезических (ГСИ) и метрологических (МСИ) средств измерений является то, что ПЗС-матрица представляет собой уникальное фотоэлектронное устройство, которое одновременно формирует необходимый информационный сигнал и служит измерительной шкалой, что позволяет зарегистрировать изображение того или иного предмета в цифровом виде и определить координаты x_i и y_i характерных точек в масштабе видеоизображения.

Эти особенности ПЗС и КМОП фотоприемников и стали первоосновой разработки цифровых технологий автоматизации геодезических измерений. Предоставляется возможность для более широкого использования цифровых камер на основе ПЗС-матриц в геодезии и метрологии с обеспечением необходимой и достаточной точности текущих измерений. В настоящее время ПЗС-матрицы и ПЗС-линейки уже нашли широкое применение в быту (цифровые фото- и видеокамеры) и в технике (датчики измерения размеров в машиностроении и т.п.).

Рассмотрим роль и место многоэлементных фотоэлектрических микросхем в виде ПЗС- и КМОП-матриц в современных автоматизированных геодезических инструментах и системах.

Цифровые системы автоматизации геометрического нивелирования

Внедрение ПЗС-технологии способствовало развитию автоматизации процесса геометрического нивелирования. В настоящее время за рубежом электронные нивелиры разрабатывает и выпускает ряд фирм производителей. Российские предприятия по-прежнему выпускают только оптические нивелиры, несмотря на то, что их автоматизация не требует принципиального изменения конструкции нивелиров. Устройство цифровых нивелиров рассмотрим на примере нивелиров-автоматов фирм «Leica» и «Zeiss» (Trimble).

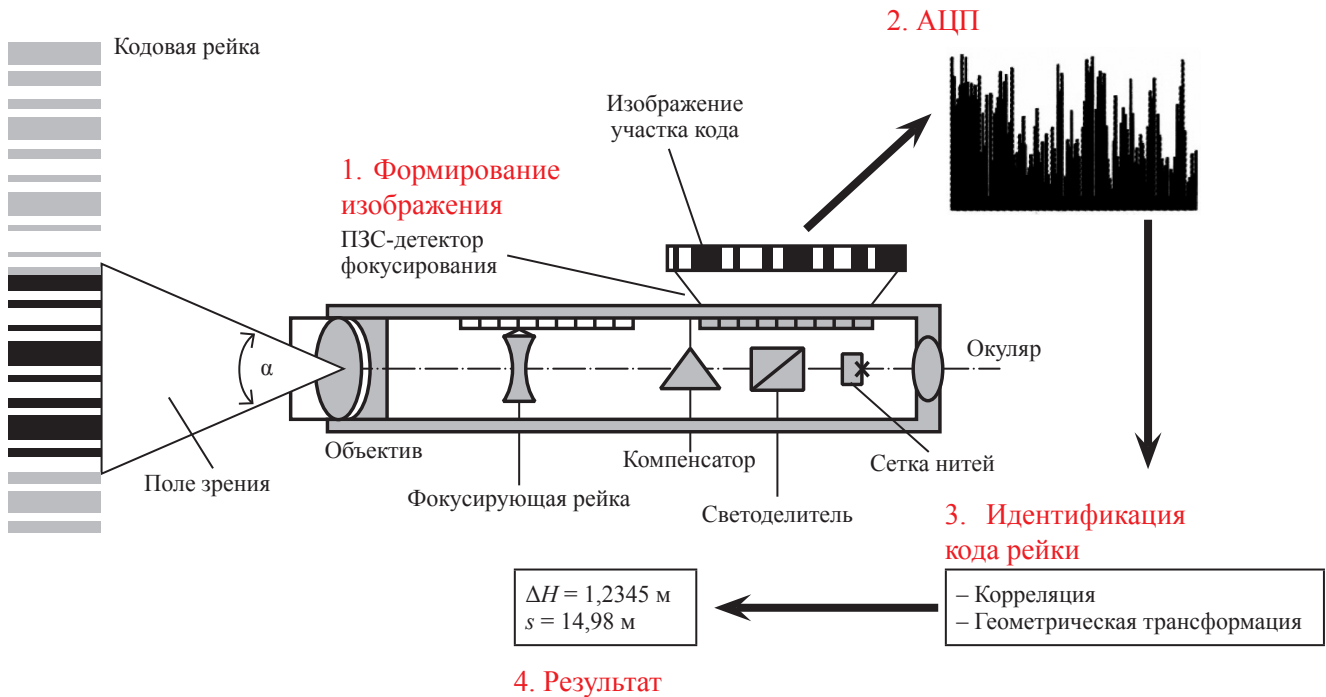


Рис. 3. Оптическая схема цифровых нивелиров и алгоритм измерений
 Fig. 3. Optical diagram of digital levels and measurement algorithm

Все цифровые нивелиры фирмы «Leica» снабжены рейкой в виде псевдослучайного штрих-кода, имеют очень похожее устройство и относятся к приборам с компенсатором наклона и с корреляционной обработкой изображения кодовой шкалы. Процесс измерений (рис. 3) можно разделить на четыре этапа. После считывания 1 изображения ПЗС-линейкой с (256–2048) пикселями производится оцифровка изображения рейки 2. Затем цифровая картинка обрабатывается различными методами. Как результат, определяются и выдаются на дисплей не только соответствующий отсчет по штрих-кодовой шкале, но и расстояние до рейки.

Последовательность черно-белых элементов нивелирной рейки составляет двоичный код (максимальная длина 4,05 м). Во всех приборах «Leica» обработка основана на принципе корреляции (рис. 4). При этом устройство «знает» всю кодовую последовательность. Сигнал, принятый ПЗС-матрицей, математически сравнивается с опорным сигналом (т.е. с сигналом из памяти прибора).

Цифровые нивелиры DiNi впервые были представлены фирмой «Zeiss» в 1994 г. и

в отличие от фирмы «Leica» основаны на позиционном способе цифрового отсчитывания по штрих-кодовой рейке (рис. 5) [7]. На ПЗС-матрице длиной 28,6 мм размещены 2048 отдельных пикселей. Величина пикселя равняется примерно 13,7 мкм, величина зазора между элементами соответствует 0,25 мкм. Для обработки из 2048 элементов приемника задействуются только около 1800, характеристики изображения по краям часто хуже, при

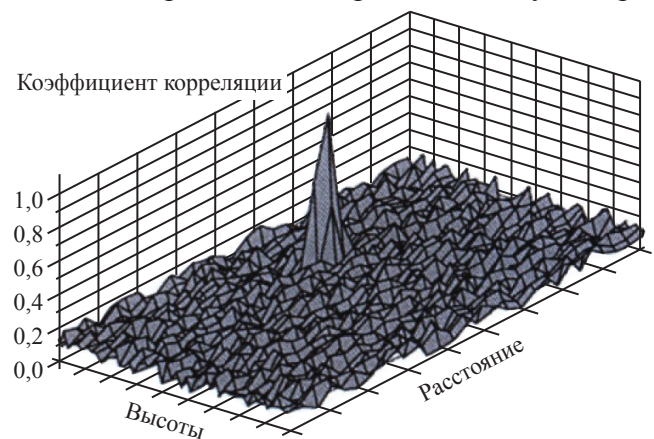


Рис. 4. Принцип корреляции в цифровых нивелирах фирмы «Leica»
 Fig. 4. The principle of correlation in digital levels of "Leica" company

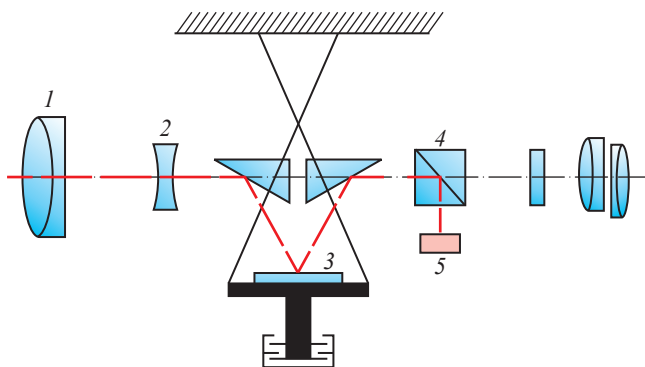


Рис. 5. Принципиальная схема нивелиров DiNi фирмы «Trimble»

Fig. 5. Schematic diagram of «Trimble» DiNi levelers

том, что освещение крайних элементов слабое. Изображение рейки вызывает светло-темный сигнал ПЗС-приемника, который через аналоговый последовательный выход подводится к быстрому АЦП. Микроконтроллер записывает полученный сигнал и по программе обработки изображений производится распознавание отсчета, который выводится на дисплей прибора и/или записывается в долговременную память (подключаемый флэш-накопитель). Соответствующий горизонтальной визирной оси фрагмент кодовой рейки проецируется на ПЗС-линейку 5 через телеобъектив 1, фокусирующую линзу 2, подвешенное зеркало-компенсатор 3 и жесткозакрепленную светоделительную призму 4 с перекрестием и полупрозрачным зеркалом (см. рис. 5).

Автоматизация угловых измерений в электронной тахеометрии

В электронных тахеометрах T1600/T1000 для реализации грубого отсчета кодовый лимб разделен на 256 секторов, границами которых служат широкие штрихи (рис. 6). Каждый из этих 256 секторов имеет свой номер, который записан в двоичном коде с помощью дополнительных семи штрихов, расположенных между широкими штрихами. Формирующие код штрихи отличаются друг от друга по ширине в зависимости от своего значения («0» или «1»). Точный отсчет обеспечивается ПЗС-линейкой, длина которой соответствует размеру одной или двух секторов штрих-кодового лимба тахеометра [8, 9].

Автоматизация измерений углов наклона цифровыми инклинометрами серии NIVEL200

Принцип работы NIVEL 220 фирмы «Leica Geosystems» (Швейцария) основан на способности поверхности жидкости сохранять горизонтальное положение в гравитационном поле Земли. В результате при наклоне прибора свободная поверхность жидкости и дно ампулы образуют жидкостный оптический клин с переменным преломляющим углом $\varphi = 2\theta(n-1)$, где n — показатель преломления жидкости (рис. 7).

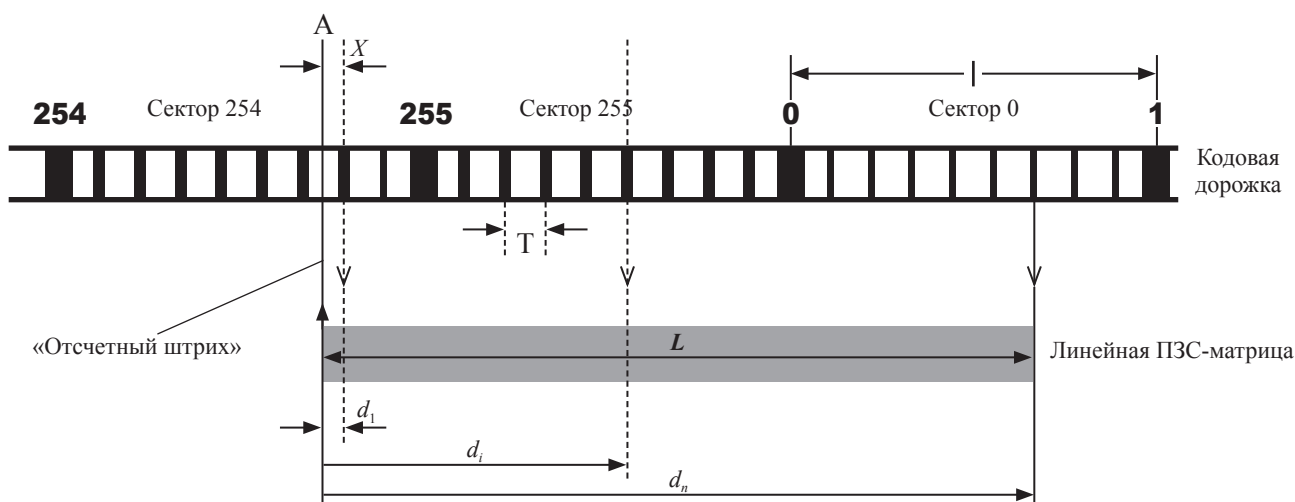


Рис. 6. Принцип отсчитывания направления по лимбу

Fig. 6. Principle of direction counting by limb

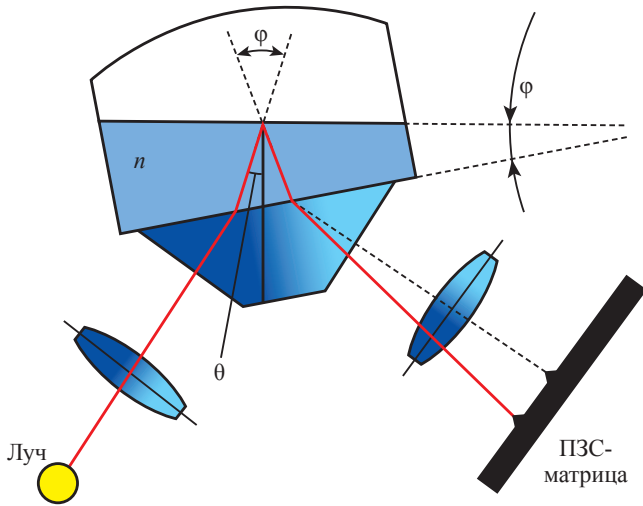


Рис. 7. Принципиальная схема датчика наклона цифрового инклинометра жидкостного типа
Fig. 7. Schematic diagram of the sensor of an inclination of a digital inclinometer of liquid type

Для геодезии и метрологии важно, чтобы конечный результат был получен в принятой международной системе единиц СИ (СИ) — особенно для измерения длин, углов и превышений. При определении линейных размеров предметов, расстояний между характерными точками необходимо знать шаг матрицы: точный размер светочувствительной площадки каждого пикселя и расстояние между ними для каждой конкретной ПЗС-матрицы. Для оперативного определения линейной и угловой дискретности одного пикселя ПЗС- или

КМОП-матрицы было предложено использовать изображение некоторой эталонной меры, формирующейся одновременно и в тех же условиях, что и исследуемый объект, и на той же ПЗС-матрице.

Например, большинство ГСИ — оптические и цифровые нивелиры, оптические и электронные теодолиты и тахеометры имеют зрительные трубы с дальномерной сеткой нитей. Такой нитяной дальномер относится к оптическим дальномерам с постоянным параллактическим углом φ ; при коэффициенте дальномера $C = 100 \pm 0,1$ это соответствует углу $\varphi = \rho''/K = 2062,65''$. В большинстве зрительных труб линейное расстояние между дальномерными нитями составляет $l = 2,0$ мм, нити нанесены с относительной ошибкой 0,1%, т.е. $M_l = (2,0 \text{ мм})/1000 = 2$ мкм. Это и служит предпосылкой для определения линейных и угловых размеров по изображению предмета исследований и сетки нитей зрительной трубы, формирующей изображения на светочувствительной поверхности ПЗС-матрицы.

Для определения линейной и угловой дискретности одного пикселя ПЗС-камеры на кафедре геодезии МИИГАиК создан калибровочный стенд (КС) (рис. 8). Цифровая камера, используемая на стенде, должна иметь разрешение не менее 7 Мрх (3500×2000 пикселей).

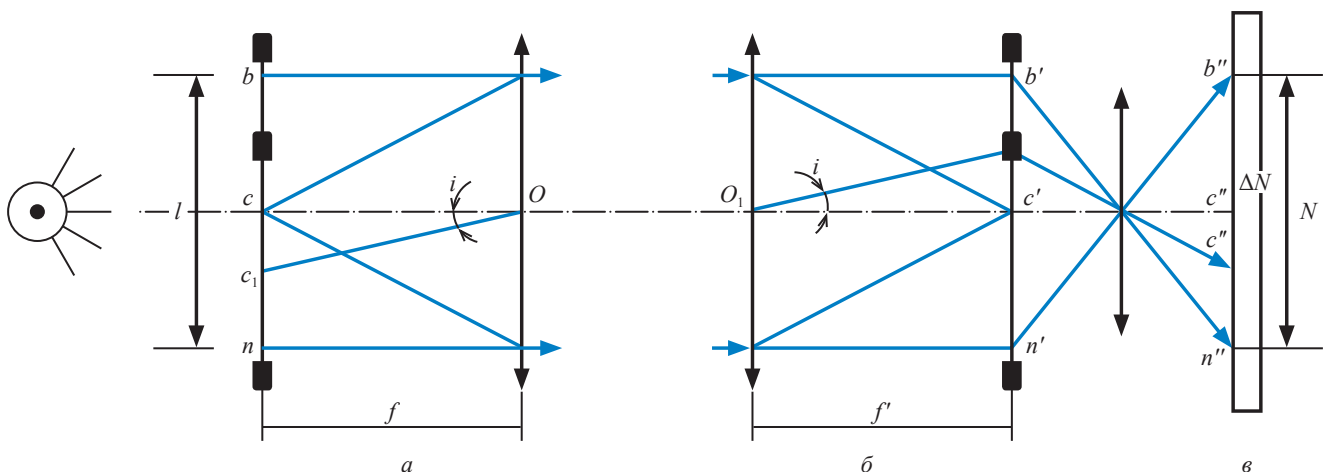


Рис. 8. Оптическая схема КС:
a — коллиматор; *б* — зрительная труба; *в* — ПЗС-матрица
Fig. 8. Optical diagram of combustion chamber stand:
a — collimator; *б* — telescope; *в* — CCD-matrix

Основываясь на рис. 8, можно утверждать, что $\lambda = (\varphi/N)\Delta N$, где N — расстояние между дальномерными нитями в пикселах (коллиматора или зрительной трубы); ΔN — расстояние между перекрестиями сеток нитей эталонного и поверяемого нивелиров в пикселах. Поскольку средняя квадратическая ошибка определения координат точек той или иной нити сетки составляет 0,5 пиксела, следует признать, что неопределенность позиционирования положения дальномерных нитей в угловой мере составляет (0,4–0,6") для камеры Samsung NX1000 Kit.

ГНСС-технологии – цифровые технологии

Важное место при проектировании и создании автоматизированных систем измерений занимают технологии глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Относятся ли ГНСС-технологии к цифровым технологиям автоматизации определения трехмерных координат?

Понятия «аналоговые данные» и «цифровые данные» достаточно просты. Аналоговые данные принимают непрерывные значения из некоторого диапазона. Цифровые данные представляются в виде последовательности дискретных (цифровых) значений. В настоящее время наиболее распространены двоичные цифровые сигналы (битовый поток) в связи с простотой кодирования и использованием в двоичной электронике. Для передачи цифрового сигнала по аналоговым каналам (например, электрическим или радиоканалам) используются различные виды модуляции. Передача данных — данные это объекты, передающие смысл или информацию. Сигналы — это электромагнитное представление данных. Передача — процесс перемещения данных путем распространения сигналов по передающей среде и их обработки.

Цифровые технологии основаны на представлении сигналов дискретными полосами, а не в виде непрерывного спектра. Все уровни в пределах полосы представляют собой одинако-

вое состояние сигнала. Цифровая технология работает, в отличие от аналоговой, с дискретными, а не непрерывными сигналами. Кроме того, сигналы имеют небольшой набор значений, как правило два, но в реальной жизни системы, особенно в учетных системах хранения данных, на основе трех значений. Обычно это 0, 1, NULL, которые в булевой алгебре имеют значения «Ложь», «Истина» и «Отсутствие результата» соответственно.

В ГНСС-системах координатного позиционирования для измерения дальностей используется метод фазовой модуляции (рис. 9) и формируется двоичный битовый поток непо-

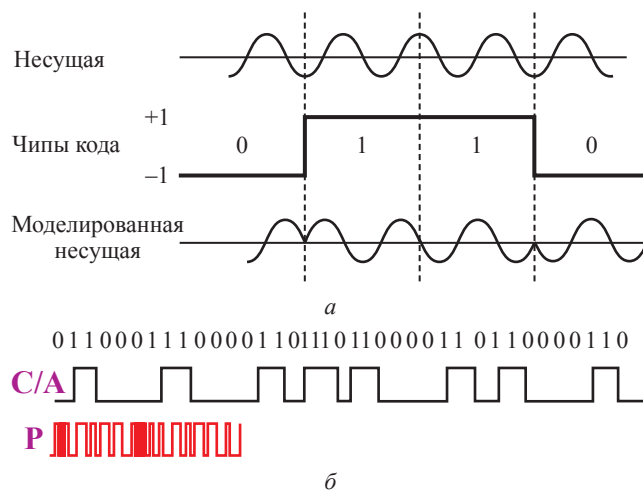


Рис. 9. Принцип фазовой модуляции несущей частоты (а) и модуляция кодов C/A и P (б)

Fig. 9. The principle of phase modulation of the bearing frequency (a) and modulation of codes of C/A and P (b)

средственно на борту спутника.

Исходя из изложенного, можно утверждать, что ГНСС-технологии относятся к категории цифровых технологий, а результатами ГНСС-измерений являются цифровые данные. Применение геодезических спутниковых технологий — важная часть автоматизации процессов геодезических измерений. Они повышают оперативность и надежность получения результатов, а также сокращают затраты на специалистов, выполняющих измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронный ресурс: http://www.up-pro.ru/library/information_systems_production/digital-expert1.html.
2. Электронный ресурс: <http://www.startcopy.net/notes/ccd.shtml>.
3. Соломатин В.А. Оптические и оптико-электронные приборы в геодезии, строительстве и архитектуре. М.: Машиностроение, 2013. 288 с.
4. Электронный ресурс: <http://delayfoto.ru/fototehnika/matrica.html>.
5. Ямбаев Х.К., Староверов С.В. Особенности фотоувствительных приёмников с зарядовой связью и их возможности в геодезии и метрологии // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Международный науч. конгресс. Новосибирск, 2017.
6. Хиллер Бернд, Староверов С.В., Мясников Я.В. О возможности использования цифровой инклинометрии для геодезического мониторинга инженерных сооружений // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2015. № 1. С. 86–87.
7. Jeckel R., Stober M., Huep W. Elektronische Entfernungs und Richtungsmessung, Neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Wichman. Heidelberg, 2002.
8. Ямбаев Х.К. Геодезия. Исследование, поверка и юстировка средств измерений. М.: Изд-во МИИГАиК, 2016. 342 с.
9. Староверов С.В. Разработка и исследования стенда для оперативной технологической и метрологической поверки угломерных геодезических средств измерений // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка» 2017. Т. 61 № 5. С. 60–66.

REFERENCES

1. URL: http://www.up-pro.ru/library/information_systems_production/digital-expert1.html.
2. URL: <http://www.startcopy.net/notes/ccd.shtml>.
3. Solomatin V.A. *Opticheskie i optiko-elektronnye pribory v geodezii, stroitel'stve i arhitekture*. Optical and optical-electronic instruments in geodesy, construction and architecture. Moscow. Mashinostroenie, 2013: 288 c. [In Russian].
4. URL: <http://delayfoto.ru/fototehnika/matrica.html>.
5. Yambayev Kh.K., Staroverov S.V. Features of charge-coupled photosensitive receivers and their capabilities in geodesy and metrology. *Interexpo GEO-Sibir'-2017. XIII Mezhdunarodnyj nauch. kongress. Novosibirsk*. 2017. [In Russian].
6. Bernd H., Staroverov S.V., Myasnikov Ya.V. On the possibility of using digital inclinometry for geodetic monitoring applied to engineered structures. *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotosyemka»*. Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying». 2015, 1: 86–87. [In Russian].
7. Jeckel R., Stober M., Huep W. *Elektronische Entfernungs und Richtungsmessung, Neu bearbeitete und erweiterte Auflage*. Wichman. Heidelberg, 2002.
8. Yambayev Kh.K. *Geodeziya. Issledovanie, poverka i yustirovka sredstv izmerenij*. Geodesy. Examination, verification and adjustment of measuring instruments. Moscow. MIIGAiK, 2016: 342 p. [In Russian].
9. Staroverov S.V. Research and development of a stand for timely processing and metrological calibration test of goniometrical geodesic surveying instruments. *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotosyemka»*. Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying». 2017. 61 (5): 60–66. [In Russian].