НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРЕВЫШЕНИЙ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ШТРИХКОДА

Г.В. Колесников (Урал-СибНИИОС, Новосибирск)

В 2006 г. окончил магистратуру в Новосибирском государственном техническом университете по направлению «оптотехника». С 2003 по 2004 гг. работал в НИИ оптических систем. С 2005 г. работает в филиале Уральского оптико-механического завода — ФГУП ПО «Урал-СибНИИОС», в настоящее время — инженер-конструктор.

М.В. Киселев (Урал-СибНИИОС, Новосибирск)

В 1997 г. окончил Сибирскую государственную геодезическую академию (СГГА). С 2004 г. по настоящее время — начальник отдела КТО ФГУП ПО «Урал-СибНИИОС». Преподает в СГГА основы конструирования оптических систем.

Динамичное развитие вычислительной техники и систем автоматики в последние десятилетия не могло не сказаться на такой отрасли, как геодезическое приборостроение. Оптическое цифровое оборудование все больше вытесняет традиционные измерительные приборы, которые зачастую уже не соответствуют высоким современным требованиям. Основными преимуществами цифровой измерительной техники перед аналоговой являются: быстрота измерений, высокая точность, удобство получения первичных данных и их автоматическая обработка, а также практически полное исключение «человеческого фактора», вплоть до достижения конечного результата работы.

К сожалению, отечественное приборостроение сильно отстает от ведущих мировых производителей, и подавляющее большинство цифровых геодезических приборов, используемых в России, разработано за границей. Одним из таких приборов, широко используемых в геодезической практике, является нивелир. Причем, на смену традиционным оптическим нивелирам пришли цифровые (кодовые) нивелиры. В основе определения превышений цифровым нивелиром лежит тот же принцип, что и в классических оптических нивелирах. Однако вместо обычной рейки используется специальная, «кодовая», рейка, а вместо анализатора, определяющего положение визирной оси нивелира на рейке, - не глаз человека, а матричный фотодетектор. Задача оператора состоит лишь в наведении оптической трубы нивелира на рейку, после чего автоматически происходит распознавание, обработка и анализ изображения, и, наконец, выдача результата.

На нивелирную рейку нанесен специальный код, по которому происходит определение превышений. Наиболее распространенным в настоящее время является штриховой код (barcode), пример которого приведен на рис. 1.

Изображение кодовой рейки переносится на фотоприемные устройства (ФПУ), на основе линейных ПЗС, где происходит автоматическое распознавание кода, определяется значение превышения и выдается результат.

Точность измерения — важнейшее свойство нивелира — зависит от выбранного способа кодирования рейки и алгоритма его обработки. Кодирование рейки и декодирование полученного изображения должны обеспечивать точное определение значения превышения на всем диапазоне дальностей. Основными сложностями при этом считаются переменный масштаб изображения, ограниченное разрешение оптической системы нивелира, недостаточное поле зре-

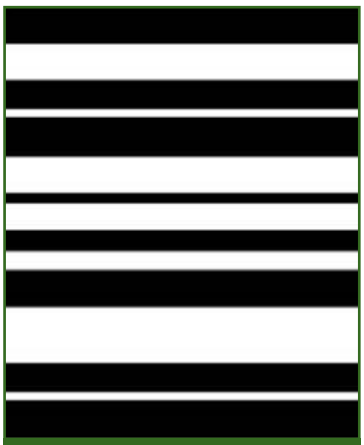

Рис. 1
Участок штрихового кода

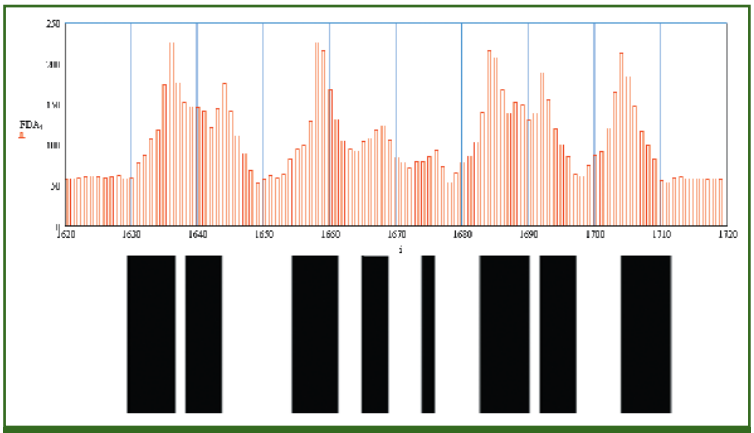

Рис. 2
Сигнал от штрихкода на дальности второй группы

ния нивелира, а также зависимость работы фотодетектора от освещенности.

Перед описанием алгоритма кодирования необходимо конкретизировать то, что должно получиться в итоге. Разрабатываемый алгоритм должен обеспечивать получение результатов с помощью кодового нивелира с использованием нивелирной рейки, размеченной штрихкодом, не хуже, чем с помощью существующих зарубежных аналогов, а именно: дальность работы от 2 до 120 м, точность определения превышений не более 0,6 мм на километр двойного хода.

Участок штрихового кода, нанесенный на рейке и обозначающий какой-либо отсчет, должен быть различим нивелиром на максимальной дальности и одновременно умещаться в поле зрения нивелира на минимальной. Для однозначного определения превышения такой участок штрихкода на рейке не должен повторяться, т. е. быть уникальным. Предлагается, что штриховой код на рейке будет представлять наложение нескольких шкал с различной шириной штрихов. На коротких расстояниях оптической системой будут различаться наиболее узкие штрихи, в то время как на дальних — лишь наиболее широкие. Все штрихи могут являться частью одного кода.

Рис. 3
Вид сигнала при более слабой освещенности

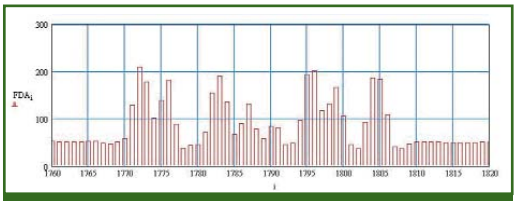

Рис. 4
Вид сигнала при более сильной освещенности

Авторы предлагают закодировать рейку так, чтобы каждая целая десятичная цифра обозначалась уникальным участком кода. Участок кода из черных и белых полос — битов — будем называть «цифрой» или «кодовым словом». Предположим, что нивелиру для корректной работы требуется видеть, как минимум, одно кодовое слово.

В силу ограниченности разрешения нивелира штрихи с определенной шириной не различаются и «сливаются». Однако вид кодового участка остается оригинальным при любом удалении рейки от нивелира. Условно толщина штрихов выбрана таким образом, чтобы их было можно различить в трех группах дальностей в следующих диапазонах: от 1 до 40 м, от 40 до 80 м и от 80 до 120 м.

На рис. 2 представлен сигнал, полученный на дистанции, эквивалентной второй группе. Штрихи минимальной ширины, соответствующие первой, ближней, группе не различаются, однако их сигнал отличен от уровня фона.

Одной из основных задач при составлении кода является максимальное подавление сигнала от неразличимых системой штрихов.

Важным свойством, которым, по мнению авторов, должен обладать штриховой код нивелирной рейки, является устойчивость к ошибкам распознавания. Одной из основных причин возникновения ошибок распознавания считается сильная зависимость сигнала фотодетектора от освещенности объектной сцены. На рис. 3 и 4 приведены уровни сигнала, соответствующие слабой и сильной освещенности.

Итак, способ кодирования рейки должен обеспечивать правильную работу нивелира независимо от:

— масштаба изображения и ограниченности разрешения оптической системы нивелира;

— ошибок считывания, вызванных недостаточной освещенностью, шумами или слабым сигналом.

Код Рида-Соломона

Одним из перспективных алгоритмов для кодирования нивелирной рейки, по мнению авторов, является код Рида-Соломона. Его характерные качества - блочность, цикличность, а также коррекционные возможности оптимально подходят для

решения задачи нивелирования, описанной выше. Подробнее о кодировании и свойствах кодов можно узнать в [1].

Рассмотрим пример возможного создания участка штрихкода. Будем считать, что для кодирования всех чисел на рейке хватит трех восьмеричных цифр. Примем также, что для корректной работы алгоритма достаточно возможности исправлять две неверно принятые цифры. Поскольку количество исправляемых РС-кодом ошибок вдвое меньше числа избыточных элементов, получаем РС (7, 3), т. е. информационных элементов — 3, избыточных — 4. Не вдаваясь в математические тонкости, информацию о которых можно найти во многих книгах по кодированию [2, 3], закодируем любое число, состоящее из трех восьмеричных цифр. Пусть это будет, например, число «123». При выбранных авторами статьи параметрах кодирования получится следующее кодовое слово:

«0 2 0 1 1 2 3». (1)

В зависимости от выбора порождающего многочлена, расширения поля Галуа и других параметров кодовое слово может быть и другим.

Поскольку классический РС-код обладает цикличностью, можно «раскатать» кодовое слово до его повторения:

«0 2 0 1 1 2 3 0 2 0 1 1 2». (2)

Любая последовательность из семи цифр в (2) представляет собой разрешенное кодовое слово с минимальным кодовым расстоянием 5.

Выбрав какой-либо метод перевода восьмеричных цифр в набор полос черного и белого цветов, можно представить кодовую строку (2) как штрихкод. Для наглядности запишем числа полученного кода наиболее простым (и бесполезным) способом, представив каждое восьмеричное число в виде трех двоичных битов. Пусть двоичная единица будет штрихом черного цвета, а ноль — белого. На рис. 5 представлен результат такого обозначения.

Рис. 5
Пример штрихкода

Любой участок из двадцати трех полос (7 цифр x 3 бита + 2 бита) наименьшей толщины содержит уникальное кодовое слово и может быть декодирован с возможностью коррекции ошибок. Работоспособность на дистанциях полученного штрихкода будет ограничена геометрическим разрешением нивелира наиболее узкой полосы.

Очевидно, что для реально работающего штрихкода необходимо использовать другое обозначение цифр на рисунке нивелирной рейки, которое должно «маскировать» тонкие штрихи, неразличимые на средних и больших дальностях.

Функции определения дробной части превышений

Для работы кодового нивелира недостаточно просто определить, на какой отсчет «попала» визирная ось. Чтобы выполнить заявленные требования по точности, измерения должны быть в 5–10 раз точнее, чем конечный результат, т. е. 0,03–0,06 мм на километр двойного хода. Этот факт приводит к необходимости определения превышений точнее, чем размер пикселя ФПУ и, тем более, размер кодового слова.

Авторы предлагают определять дробную часть превышений в два этапа. На первом этапе определяется положение кодового слова относительно метки нуля с точностью до пикселя. На втором — вычисляется точное значение положения кодового слова относительно метки нуля. Предполагается на первом этапе использовать корреляционный метод, а на втором — анализ спектра изображения нивелирной рейки.

Суть первого этапа заключается в вычислении максимума корреляционной функции и определении по нему положения текущего кодового слова относительно нулевой метки. За нулевую метку можно принять, например, середину определенного пикселя № 500 на ФПУ.

Предположим, имеется обработанный массив значений сигнала вдоль линейного ФПУ, и кодовое слово, на которое выпала нулевая метка, уже декодировано. На рис. 6 показан такой массив значений сигнала (уровни красного цвета), а также его аппроксимация кубическими сплайна-

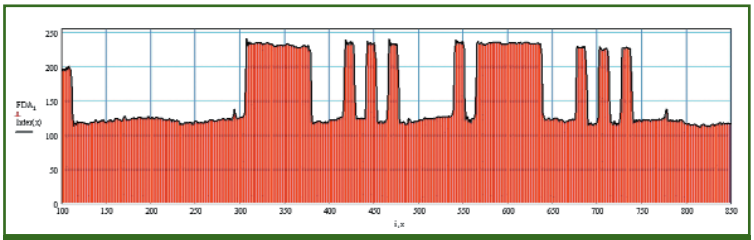

Рис. 6
Массив обработанных значений сигнала вдоль линейного ФПУ

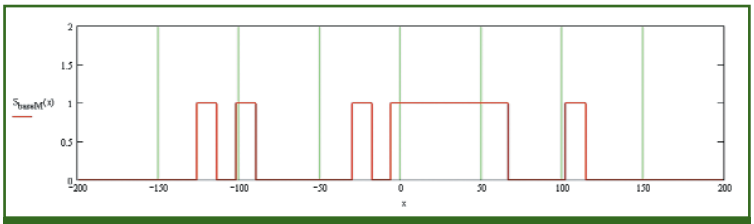

Рис. 7
Идеализированный сигнал от некоторого кодового слова «А»

ми **Inter (x)** — график черного цвета.

В данном примере условная нулевая метка выпала на некоторое кодовое слово **«А»**, идеализированный сигнал от которого представлен на рис. 7.

Идеализированный сигнал задается непрерывной функцией $S_{baseM}(x)$ и имеет собственный нулевой отсчет. Положение кодового слова **А** на кодовой рейке получаем, определив максимум корреляционной функции **U(δ)**.

$$U(\delta) = MashtabV \int_a^b Inter(x) S_{baseM}(x - \delta)\,dx,$$

где **a** и **b** — пределы интегрирования, выбираются, исходя из конкретных условий;

MashtabV — масштабирование по вертикали, так как идеализированный сигнал нормирован к единице;

δ — шаг смещения при корреляции, выбирается оптимальным между быстродействием и точностью.

График корреляционной функции **U(x)** при использовании сигналов **Inter(x)** (рис. 6) и $S_{baseM}(x)$ (рис. 7) приведен на рис. 8. По нему видно, что максимум функции достигается при значении аргумента **x** = 562,3.

Зная реальный размер штрихкода слова **«А»** на рейке и определив положение максимума корреляционной функции, можно получить дробную часть к тому, целому значению превышения, информацию о котором несет кодовое слово. Порядок этой дробной части зависит от масштаба изображения и равен, как минимум, 0,5 пикселя ФПУ. Это означает, что для достижения требуемой точности данного корреляционного метода недостаточно. Поэтому переходим к изложению более сложного метода анализа спектра.

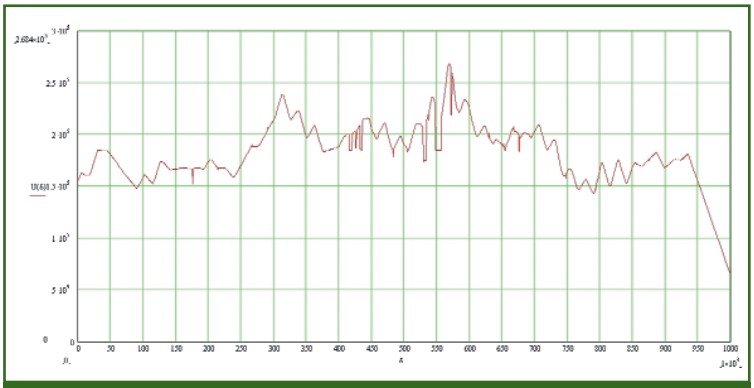

Рис. 8
График корреляционной функции

Метод определения малых превышений основан на выявлении зависимости спектра изображения от малых смещений. Известно, что сдвиг сигнала по одной из пространственных осей приводит к умножению спектра сигнала на фазовый множитель в частотных координатах [4].

$$F(g(x)) = G(f_x)$$
$$F(g(x - a)) = G(f_x)\ x$$
$$x\ \exp[-2\pi i\ f_x a],$$

где **F** — символ прямого преобразования Фурье;

g(x) — некоторая функция;

$G(f_x)$ — спектр функции **g(x)**;

a — смещение по пространственной оси;

i — мнимая единица.

Таким образом, малые значения смещения легче измерять по изменению спектра, нежели напрямую. Поскольку фазовый множитель как функция от частоты и смещения обладает периодичностью, представляется возможным вычислить его период и определить из него точную дробную часть. Т. е. обрабатываем первичный сигнал с ФПУ, получаем изображение и сохраняем его. В полученном изображении находится последовательность штрихов, обозначающих кодовое слово, на которое выпала метка нуля. Начало слова (в общем случае нулем кодового слова может быть не начало, а любое место) смещено относительно нулевой метки прибора. Величину этого смещения с точностью до пикселя определили корреляционным способом, описанным выше. Теперь требуется найти смещение точнее величины пикселя.

Итак, имеем изображение кодового слова, смещенное относительно нулевой метки на какую-то малую величину **ξ**, и можем вычислить его спектр $S_0(f_x)$:

$$S_0(f_x) = G(f_x)\ e^{-2\pi i f_x \xi}.$$

Сохраняем этот спектр

$S_0(f_x)$ в памяти. Затем электронным способом сдвигаем сохраненный ранее сигнал от изображения на малую величину Δ (менее величины пикселя ФПУ), и находим спектр смещенного сигнала. В нем содержится увеличенный фазовый множитель, и спектр такого сигнала будет равен:

$$S_1(f_x) = G(f_x)\, e^{-2\pi i f_x(\xi+\Delta)}.$$

Снова сохраняем полученный спектр, смещаем исходное изображение на величину 2Δ, и находим спектр. Получив некоторое количество таких функций-спектров, можно проанализировать их и определить период фазового множителя. Вычислив период, можно найти фазу фазового члена при начальном смещении ξ, а значит, и само смещение (рис. 9).

Однако существует ряд трудностей, которые необходимо преодолеть. Основные из них носят математико-прикладной характер и касаются: дискретности сигнала ФПУ, дискретного спектра такого сигнала, его неопределенности между отсчетами. Одной из задач также является выбор «оконной» функции и учет ее влияния на спектр сигнала.

С более полной информацией по данной тематике можно ознакомиться на сайте http://nivellier.hut2.ru.

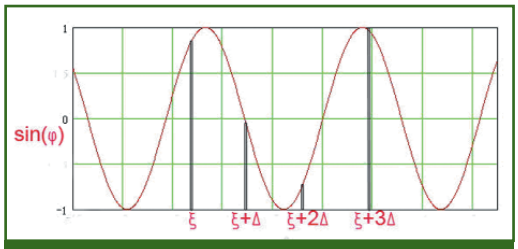

Рис. 9
Пример использования метода анализа спектра

Список литературы

1. Крис Касперски. Могущество кодов Рида-Соломона, или информация, воскресшая из пепла // Системный администратор. — 2003. — № 11.

2. Постников М.М. Теория Галуа. — М.: Факториал Пресс, 2003. — 304 с.

3. М.Н. Аршинов, Л.Е. Садовский. Коды и математика (рассказы о кодировании). — М.: Наука, 1983. — 144 с.

4. Дж. Гудмен. Введение в Фурье-оптику / Пер. с англ., под ред. Косоурова. — М.: Мир, 1970.

RESUME

The article considers the main difficulties and technical problems arising when developing digital (bar-coded) level. There introduced techniques to code the leveling rod as well as considered possible ways to process the rod images obtained in order to determine precise values of differences in elevations.