

УДК 625.1:621.396.946:528.4:519.65

С.И. Долганюк

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПУТЕВОГО РАЗВИТИЯ НА СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЯХ

Описан метод автоматизированного построения цифровых моделей путевого развития (ЦМГР) на сортировочных станциях. Съёмка ЦМГР геодезическим методом достаточно трудоёмка и дорога. Предлагается способ автоматизированного построения ЦМГР за счёт накопления навигационных данных от приемников, установленных на локомотивах. Описаны методы обработки накопленных данных. Ключевые слова: сортировочные станции, метод относительного позиционирования, навигационный комплекс.

Метод автоматизированного построения цифровых моделей путевого развития на сортировочных станциях разработан для ускорения процесса построения ЦМГР и удешевления его в целом. Идея метода заключается в использовании локомотива, как передвижного средства с повторяющимися траекториями при движении по одним и тем же путям. Установленный на крышу разных локомотивов навигационный комплекс производит накопление данных за длительный промежуток времени на разных участках станции. Накопленная статистика собирается со всех локомотивов и производится постобработка результатов за весь период. Во время съёмки локомотивными приемниками, параллельно должен накапливать навигационную информацию базовый навигационный комплекс, антенна которого должна находиться на крыше здания. В результате применяется метод относительного позиционирования, а в качестве референсной точки используется базовая антенна с условно известными координатами.

Съёмка данных. Для съёмки навигационных данных на локомотиве

используется схема, приведенная ниже (рис. 1). Навигационная антенна крепится на середине крыши локомотива по ширине. Высокочастотный кабель (ВЧ 1.6 ГГц) от антенны соединен с навигационным приемником, находящимся в кабине машиниста, в специальной нише. Навигационный приемник каждую секунду производит измерения и через RS232 интерфейс передает блоки вычисленных и сырых данных на КПК. КПК производит обработку данных, первичное сжатие и организует запись данных либо в свое внутреннее хранилище, либо во внешнее, которое может быть соединено с КПК по USB-интерфейсу.

Все устройства питаются от общей шины стабилизированного напряжения +5 и +12 В. Данные, которые протоколируются на внешнем или внутреннем носителе, имеют определенную структуру, приведенную в таблице ниже:

Также протоколируются эфемериды для каждого спутника (кеплеровские элементы орбиты) для расчета координат спутников на каждый момент обсервации.

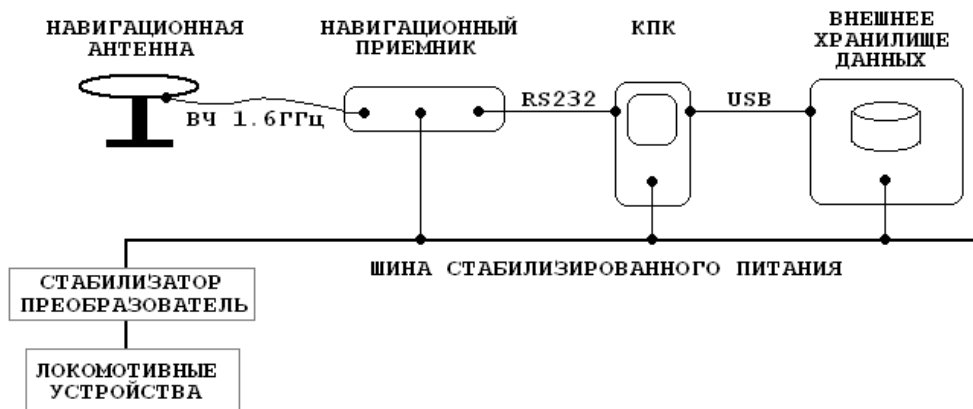


Рис. 1. Схема устройств съемки навигационных данных на локомотиве

Навигационное решение и его дифференцирование. Для обработки навигационных данных используется методы первых и вторых разностей. На базовом и локомотивных комплексах производится протоколирование сырых измерений по коду и фазе от одних спутников (рис 2). В рамках данной статьи будет излагаться общий подход решения задачи.

Измеренная дальность может быть представлена в виде отношения:

$$dP = R - N \cdot \lambda + d_{KA} + D_{АП} + e, \quad (1)$$

где R – геометрическая дальность, N –

неизвестное число волн длины λ , d_{KA} и $D_{АП}$ – искажения дальности соответственно на спутнике и в пункте наблюдений. e – влияние прочих источников погрешностей и ошибок.

Со станций А и В в одно и то же время t_1 выполнены измерения до спутника КА1 и получены результаты:

$$dP_{A1} = R_{A1} - N_{A1} \cdot \lambda + d_{КА1} + D_{АПА} + e_{A1}, \quad (2)$$

$$dP_{B1} = R_{B1} - N_{B1} \cdot \lambda + d_{КА1} + D_{АПВ} + e_{B1}, \quad (3)$$

где индекс А1 указывает на измерение со станции А до КА1, а В1 – со станции В до станции В1. Далее вычисляются разности $P_{(A-B)1} = dP_{A1} - dP_{B1}$:

$$P_{(A-B)1} = (R_{A1} - R_{B1}) - (N_{A1} - N_{B1})\lambda + (D_{АПА} - D_{АПВ}) + e_{(A-B)1} \quad (4)$$

Это называется **первой или простой разностью (Single Difference - SD)**. В этом случае компенсируется ошибка $d_{КА1}$.

Для наблюдений по 2-м спутникам можно составлять простые разности:

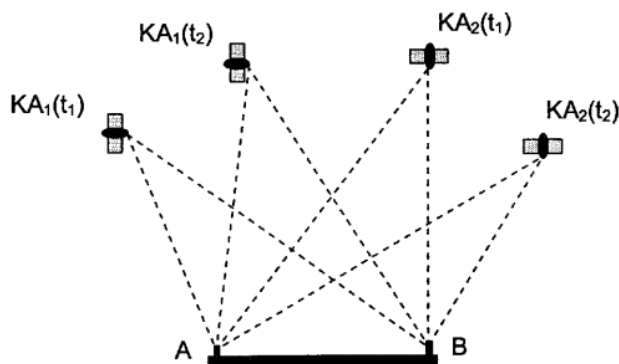


Рис. 2. Наблюдения разных спутников в разные эпохи

Таблица 1

Структура протоколируемых навигационных данных

Поле	
GPS время	Время в формате GPS на момент наблюдения
Широта	Измеренная широта в WGS-84
Долгота	Измеренная долгота в WGS-84
Высота	Измеренная высота в WGS-84
X	Измеренная координата X (ECEF) в WGS-84
Y	Измеренная координата Y (ECEF) в WGS-84
Z	Измеренная координата Z (ECEF) в WGS-84
Данные от спутников	Сырые измерения от каждого из видимых спутников.
...	Описанный ниже блок, относится к одному спутнику. Ко-
...	личество блоков равно количеству видимых спутников.
Измерения по коду L1	Псевдодальность до спутника по частоте L1
Измерения по коду L2	Псевдодальность до спутника по частоте L2 (только для 2-х частотных приемников)
Фазовые измерения L1	Фазовые измерения до спутника по частоте L1
Фазовые измерения L2	Фазовые измерения до спутника по частоте L2 (только для 2-х частотных приемников)

$$P_{(A-B)1} = (R_{A1} - R_{B1}) - (N_{A1} - N_{B1})\lambda + (D_{\text{АПВ}} - D_{\text{АПВ}}) + e_{(A-B)1} \quad (5)$$

$$P_{(A-B)2} = (R_{A2} - R_{B2}) - (N_{A2} - N_{B2})\lambda + (D_{\text{АПВ}} - D_{\text{АПВ}}) + e_{(A-B)2} \quad (6)$$

Из них сформированы **вторые или двоянные разности (Double Difference- DD)**:

$$P_{(A-B)12} = [(R_{A1} - R_{B1}) - (R_{A2} - R_{B2})] - N_{AB12} \cdot \lambda + e_{(A-B)12} \quad (7)$$

$$\text{где } N_{AB12} = [(N_{A1} - N_{B1}) - (N_{A2} - N_{B2})] \quad (8)$$

Вторые разности свободны как от искажений на спутнике, так и от искажений на наземных станциях. В большей степени скомпенсированы влияния всех остальных источников. Остаточные погрешности $e_{(A-B)12}$ являются почти случайными. Числа N_{ABij} значительно меньше N_{Ai} и N_{Bj} , что облегчает разрешение неоднозначности. Вторые разности – основной материал для обработки. По ним производится решение каждую эпоху и в результате для каждого измерения на

локомотиве можно получить точную координату (избавленную от лишних ошибок) относительно условно точной координаты базовой точки.

Здесь приведена общая концепция решения навигационной задачи без описания алгоритма. Ожидаемая точность навигационного решения составляет около 1.5 м. Это означает, что при движении локомотива измеренная координата будет отличаться от истинной не более, чем на 1.5 м с вероятностью 95%.

Принцип обработки навигационных данных

Как было отмечено выше, количество локомотивов и интенсивность работы влияют на скорость сбора данных по всей станции и массовость измерений, поэтому для описания концепции достаточно примера с одним работающим локомотивом, который двигался по одной стрелке несколько раз, совершая маневры. Ниже приведены только измерения локомотива (рис. 3), сопоставленные с реальной ЦМГР, которую по измеренным координатам требуется создать.

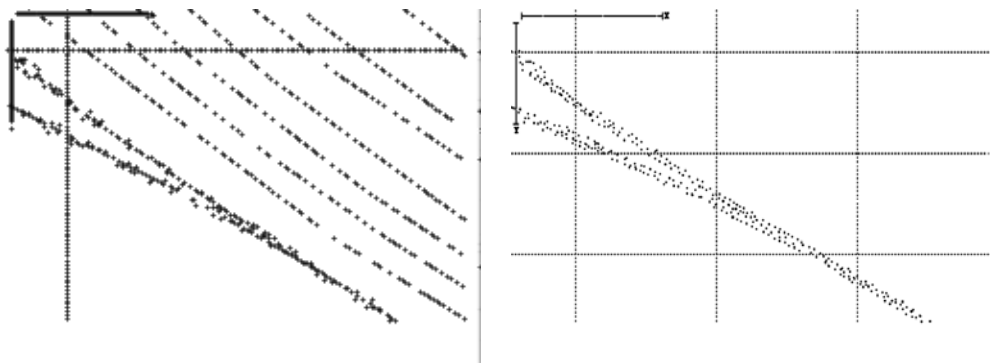


Рис. 3. Реальная геометрия путей и измеренные локомотивом координаты

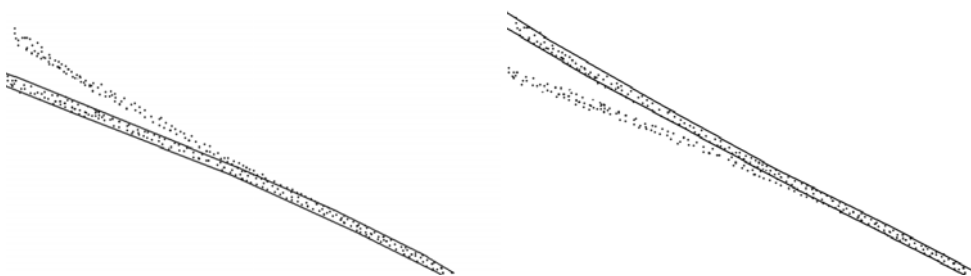


Рис. 4. Разбиение стрелочного участка на две криволинейных области

Для достижения результата на плоскости необходимо пересчитать широту и долготу в плоские координаты. Для небольших станций (в пределах нескольких километров) возможно осуществлять линейный пересчет: вычисляется сколько метров приходится на 1 градус по широте (mpb) и 1 градус по долготу (mpl). Разницы координат вычисляются по формулам:

$$\Delta X = \Delta \text{Latitude} \cdot \text{mpb}, \quad (9)$$

$$\Delta Y = \Delta \text{Longitude} \cdot \text{mpl}. \quad (10)$$

Процесс автоматизированного построения ЦМГР. Оператору для построения ЦМГР требуется указать область ограничения участка цифровой модели и привязать геометрию к именам путей и изолированных участков. Так, например, для стрелок программа не может распознать образ и тем более не может знать имя секции,

к которой эта стрелка относится. Человек (оператор) легко решает эту задачу. Каждый элемент путевого развития может быть связан со станционным объектом, а выделенный криволинейный участок, находящийся внутри области ограничения, аппроксимирован и в виде полинома занесен в базу данных цифровой модели (рис 4).

Все наборы точек, находящиеся внутри области ограничения, являются исходным материалом для дальнейшего построения цифровой модели. Ниже изображены точки темным цветом, которые попали в область ограничения и будут использоваться при построении модели, а светлым – неиспользуемые (рис 5); область ограничения задается оператором, а исходная кривая – это реальная геометрия пути, которую необходимо в дальнейшем определить.

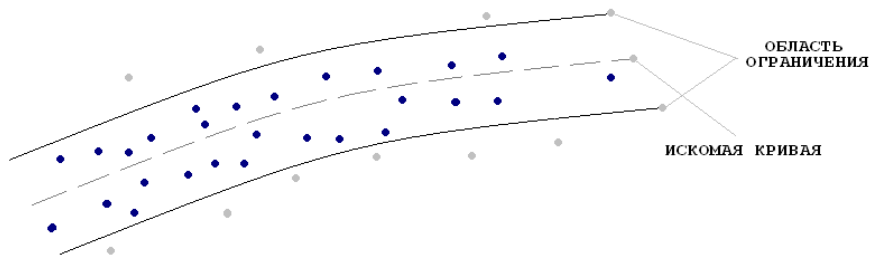


Рис. 5. Область ограничения и искомая кривая для набора точек

Искомая кривая представлена в виде полинома максимум 3-й степени и вычисляется по точкам внутри области ограничения. Алгоритм вычисления искомой кривой производится по методу наименьших квадратов.

В наборе имеется N точек, лежащих внутри области ограничения. Эмпирическая формула поиска полинома:

$$f(x) = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (11)$$

Возникают ситуации, когда использование полинома большой степени может ухудшить результат (на-

пример, когда абсолютно прямой участок пытаться аппроксимировать полиномом 3-й степени), поэтому оператору и здесь необходимо явно указать вид кривой (прямая – 0 и 1 степень, парабола – 2 степень, кубическая парабола – 3 степень). По умолчанию всегда строится полином 3-й степени. На железных дорогах, на участках менее 50 м более сложная геометрия, чем кубический полином невозможна.

По методу наименьших квадратов составляется система линейных уравнений (12), (13).

$$\begin{cases} a_0 \cdot 3 + a_1[x] + a_2[x^2] + a_3[x^3] = [y], \\ a_0[x] + a_1[x^2] + a_2[x^3] + a_3[x^4] = [x \cdot y], \\ a_0[x^2] + a_1[x^3] + a_2[x^4] + a_3[x^5] = [x^2 \cdot y], \\ a_0[x^3] + a_1[x^4] + a_2[x^5] + a_3[x^6] = [x^3 \cdot y] \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{где } [x^P] = \sum_{i=1}^n x_i^P, [x^P \cdot y] = \sum_{i=1}^n x_i^P \cdot y_i \quad (13)$$

решение системы уравнений $A=D^{-1} \cdot L$, откуда

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & [x] & [x^2] & [x^3] \\ [x] & [x^2] & [x^3] & [x^4] \\ [x^2] & [x^3] & [x^4] & [x^5] \\ [x^3] & [x^4] & [x^5] & [x^6] \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} [y] \\ [x \cdot y] \\ [x^2 \cdot y] \\ [x^3 \cdot y] \end{pmatrix} \quad (14)$$

Для полиномов меньшей степени система уравнений упрощается. Таким образом, решение системы уравнений дает четыре коэффициента полинома, описывающего искомую кривую. Подводя итог, можно описать процесс построения ЦМПР. Для каждого из участков станции оператор ограничивает точки областью, выбирает вид полинома (1, 2 или 3 степень), программа автоматически подсчитывает все необходимое и строит искомую кривую. Также программа подсчитывает суммарное квадратичное отклонение (СКО) каждой точки от полинома, причем отклонение –

расстояние от точки до полинома (наискорейшая нормаль к искомой кривой). Далее СКО оценивается, и если его значение меньше порогового, то кривая строится, а коэффициенты полинома заносятся в базу с привязкой к имени пути или участка, задаваемого оператором.

Использование автоматизированного метода построения цифровых моделей путевого развития позволит сильно сэкономить на геодезических работах, а также упростить саму технологию за счет автоматического метода сбора данных и полуавтоматического способа построения ЦМПР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Серапинас Б.Б.* «Глобальные системы позиционирования»: Учеб. изд., ИКФ «Каталог», Москва, 2002 г.
2. *Королев В.Ю.* Теория вероятностей и математическая статистика: учебник/В.Ю. Королев; МГУ им. М.В. Ломоносова.- М.: Проспект, 2006.
3. *Соловьев Ю.А.* «Системы спутниковой навигации», - М.: Эко-Трендз, 2000.
4. *Карлащук В.И., Карлащук С.В.* Спутниковая навигация. Методы и средства. Солон-Пресс, 2006 г. **VIAS**

Коротко об авторе

Долганюк С.И. – аспирант кафедры АСУ, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
ЧИТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
ГЛОТОВ Валерий Васильевич	Основание параметров горнотехнических систем при комплексном освоении территориально рассредоточенных жильных месторождений	25.00.21	д.т.н.