

УДК 625.1:519.222:528.4

С.И. Долганюк

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО РЕШЕНИЯ ПРИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИИ МАНЕВРОВЫХ ЛОКОМОТИВОВ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПУТЕВОГО РАЗВИТИЯ

Описаны алгоритмы уточнения навигационного решения за счет использования цифровых моделей путевого развития (ЦМГР). Рассмотрены два алгоритма: позиционирование статических и движущихся локомотивов.

Ключевые слова: цифровая модель путевого развития, позиционирование маневровых локомотивов, навигационное решение, точность позиционирования, спутниковая навигация на железных дорогах.

В системах контроля и мониторинга железнодорожного транспорта маневровые и магистральные локомотивы оборудованы навигационным связевым комплексом. Его основная функция – вычисление собственной координаты и передача ее по стовым устройствам. Для решения задачи определения позиции на перегонах достаточно десятиметровой точности и использования дешевых навигационных приемников, но для работы на станции точность определения не должна превышать 2 м (для устранения угрозы позиционирования на соседнем пути или изолированном участке). В данной статье предлагается метод повышения точности определения координат для локомотивов, оборудованных приемником спутниковой навигации на станциях, для которых имеется цифровая модель путевого развития (ЦМГР). Цифровая модель путевого развития станции – база данных, в которой содержится список точек и полиномов, описывающих реальную геометрию путевого развития на станции. Ниже приведен фрагмент базы данных и визуальная интерпретация модели.

Цифровая модель представляет собой набор точек, соединенных между собой кривыми отрезками (рис 1). Каждая из точек определяет границу изолированной секции, а кривой отрезок описывает точную геометрию секции на плоскости. Под геометрией понимается расположение оси пути на плоскости станции. В местах, где расположены стрелки, отрезки пересекаются. Кривые отрезки описываются в пространстве полиномами 3-го порядка. База данных состоит из двух таблиц: «Points» (точки) и «Polinomials» (полиномы). В таблице Points каждая точка имеет широту, долготу и высоту. Это опорные координаты, которые пересчитываются в локальные координаты X, Y, Z. В зависимости от метода пересчета поля X, Y, Z могут меняться. Привязка к секции, полиному и тип объекта задаются один раз на этапе создания ЦМГР. В таблице Polinomials задаются коэффициенты полинома и привязка к таблице Points. Полином может быть максимум 3-й степени, так как более сложная геометрия пути на небольшом участке невозможна.

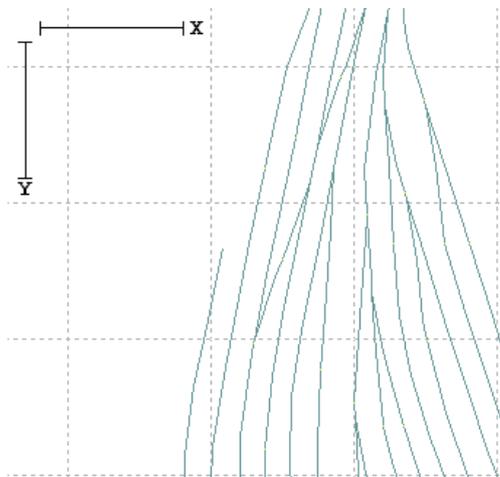


Рис. 1. Цифровая модель путевого развития

Идея метода. Если определенная приемником координата локомотива находится между путями, то можно принять что локомотив находится на ближайшем из них, так как перемещается он только по путевому развитию. Это утверждение адекватно при точности позиционирования не более 2 м. А при следовании локомотива по криволинейным участкам станций, сравнение эталонных (из ЦМГПР) и вычисленных траекторий является дополнительным критерием определения позиции. На основании этих утверждений далее будут представлены статическая и динамическая модели позиционирования с использованием ЦМГПР.

Уточнение при статическом позиционировании. Алгоритм уточнения при статическом позиционировании основан на отсечке измерений, которые сильно ухудшают навигационное решение и статистической оценке за некоторое время с целью определения усредненного решения. Далее приведены измерения позиции статического маневрового ло-

комотива в течение 30 минут с частотой 1 Гц (рис. 2). К измерениям применяется фильтр отсечки (ФО). Алгоритм фильтрации итерационный и представлен ниже.

Обозначения:

I – номер итерации. X^o_I, Y^o_I – усредненные координаты, $[A]$ – множество точек, исключенных в результате фильтрации.

Итерации фильтрации:

Итерация (I)	1	2	3	4
Отсечка, м	1000	100	20	2

Итерационный алгоритм:

$$I = 1..4$$

$$X^o_I = \frac{\sum_{j=1, j \notin [A]}^N X_j}{N}, \quad (1)$$

$$Y^o_I = \frac{\sum_{j=1, j \notin [A]}^N Y_j}{N}, \quad (2)$$

$$R_j = \sqrt{(X_j - X^o_I)^2 + (Y_j - Y^o_I)^2}. \quad (3)$$

Если $R_j < R_I$, то включить j -ю точку в множество $[A]$.

Область отфильтрованных точек сузилась, а треугольником указано среднее значение координаты за 30 минут измерений (рис. 2).

Алгоритм позволяет на первом этапе исключить точки, имеющие отклонение 1 км, на втором – 100 м, на третьем 20 м и в конце отфильтровать измерения до 2 м. Подобный метод, во-первых, исключает влияние единичных сильных отклонений от среднего и, во вторых, при минимальных нагрузках на процессор позволяет сделать усреднение, последовательно исключая неблагоприятные измерения. Применение фильтра для статического позиционирования дает надежный результат. Поскольку локомотив до задания маршрута может находиться в состоянии покоя несколько минут, то для статистической

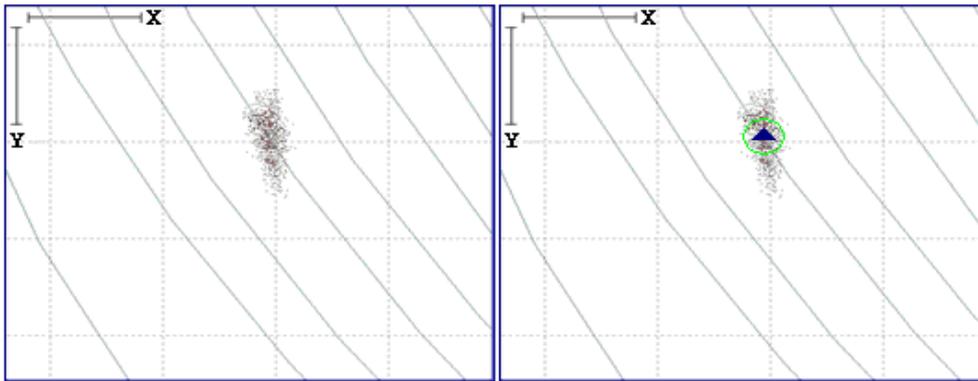


Рис. 2. Измерения координат локомотива до и после фильтрации

оценки имеется сотни измерений, чего по результатам экспериментов достаточно.

Уточнение при позиционировании в движении. Алгоритм уточнения при статическом позиционировании действительно надежен, но может быть применен только для начального позиционирования. Для дальнейшего отслеживания координаты фазового центра антенны локомотива применяется следующий метод.

В начале, аналогично статическому методу, применяется фильтр ФО, но с другими параметрами, на трех итерациях и применяется фильтр не к множеству измерений, а к одному измерению, но по всем возможным созвездиям спутников:

Итерация	1	2	3
Отсечка, м	1000	70	10

Далее, после отсечки неблагоприятных созвездий производится алгоритм идентификации «сбойных» спутников методом перебора созвездий (созвездия спутников, измерения по которым за пределами фильтра считаются потенциально негодными, а при высокой корреляции измерения от спутника с вероятностью нахождения вне фильтра, спутник исключается из дальнейших вычислений). В ре-

зультате выдвигаются 3 критерия. При выполнении любого из них спутник или созвездие не учитывается в решении:

- Угол возвышения менее 10°
- Геометрический фактор понижения точности (GDOP) меньше 4
- Исключенный в результате фильтрации спутник

После устранения спутников, неблагоприятно влияющих на результат, необходимо определить опорное созвездие спутников. Для этого требуется найти кратчайшее расстояние от каждого из решений до ближайшего полинома. Для каждой из точек найдется расстояние до ближайшего из полиномов, т.е. отрезок R_i (или нормаль) от точки до полинома, перпендикулярный касательной (рис. 3). Выбирается наименьший отрезок и считается, что созвездие спутников, по которому был получен такой результат, является оптимальным.

После определения нужного полинома и оптимального созвездия производится отслеживание координаты движущегося локомотива, а после – алгоритм отслеживания координаты движущегося локомотива по криволинейному участку и сопоставлению его с геометрией путей в ЦМГР.

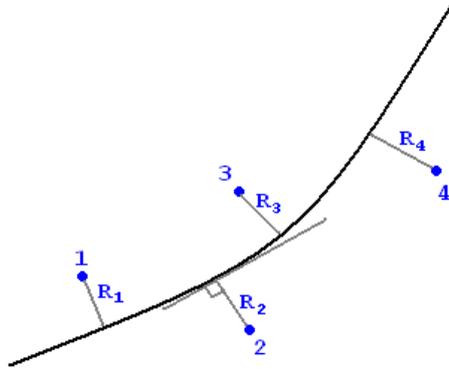


Рис. 3. Определение ближайшего полинома

Рассмотрен участок полинома, разбитый на несколько равных N сегментов (рис. 4). Длина каждого сегмента равна S . R_j – вектор фактического перемещения локомотива на каждом из сегментов, а L_j – вектор измеренного перемещения локомотива навигационным приемником, где $j = 1..N$. N – суммарное количество сегментов. Сам полином задан функцией $F(x)$.

Вычисляемая величина R_i определяется по формуле (4):

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (F(x_i) - F(x_{i-1}))^2}, \quad (4)$$

Обозначения L_i^x и L_i^y интерпретируются как значения x и y для измеренного перемещения при $x=x_i$.

Наклон векторов фактического и вычисленного перемещений может быть вычислен по формулам (5) и (6):

$$\alpha_i = \arcsin \left(\frac{F(x_i) - F(x_{i-1})}{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (F(x_i) - F(x_{i-1}))^2}} \right) \quad (5)$$

$$\beta_i = \arcsin \left(\frac{L_i^y - L_{i-1}^y}{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (L_i^y - L_{i-1}^y)^2}} \right). \quad (6)$$

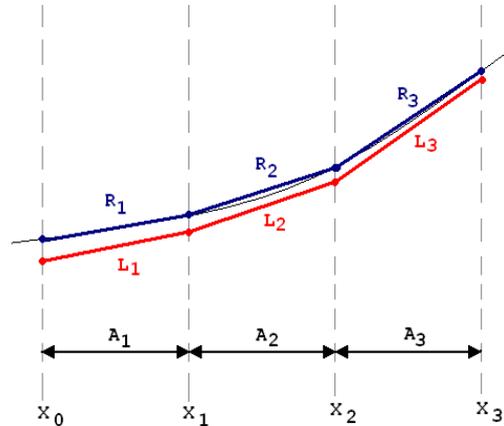


Рис. 4. Разбитие полинома на сегменты

Расстояние между точками фактического и вычисленного положения:

$$dS_i = |F(x_i) - L_i^y| \quad (7)$$

Таким образом можно сформулировать критерии определения позиции:

$$x_i - x_{i-1} < MIN_{step}, \quad (8)$$

$$N \geq MIN_{segments}, \quad (9)$$

$$|\alpha_i - \beta_i| < MIN_{angle}, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N dS_i^2 < MIN_{summ}, \quad (11)$$

где $i = 1..N$.

В зависимости от

MIN_{step} , $MIN_{segments}$, MIN_{angle} ,

MIN_{summ} определяется чувствительность алгоритма.

Результаты для статического позиционирования. Использование метода позволило определять позицию неподвижного локомотива при использовании приемников в режиме DGPS с вероятностью 95% после 15 измерений. Для маневровой группы, находящейся в режиме ожидания маршрута в системе автоматизированного управления локомотивами, это эквивалентно 30 секундам (частота 0.5 Гц), что является удовлетворительным.

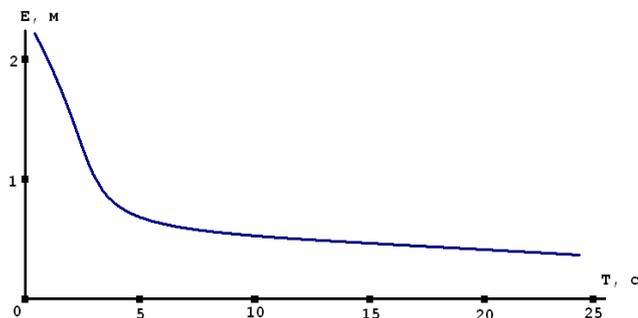


Рис. 5. Зависимость результирующей точности от времени наблюдения

Ниже приведена сглаженная зависимость точности определения усредненной координаты в метрах от времени ожидания в секундах (рис 5).

Результаты для динамического позиционирования. Алгоритм определения позиции был описан выше, а принятие решения о позиционировании зависит от выполнения следующих условий:

$$x_i - x_{i-1} < MIN_{step}, i = 1..N,$$

$$N \geq MIN_{segments}, |\alpha_i - \beta_i| < MIN_{angle},$$

$$\sum_{i=1}^N dS_i^2 < MIN_{summ}$$

Были выявлены оптимальные значения изменяемых параметров:

$$MIN_{step} = 15 \text{ м},$$

$$MIN_{segments} = 3, MIN_{angle} = 5^{\circ},$$

$$MIN_{summ} = 12 \text{ м}^2.$$

Использование специфических для конкретной области данных и знаний при решении прикладных задач часто является полезным инструментом, а иногда даже незаменимым. Метод уточнения позиции локомотивов, используя заранее известную цифровую модель путевого развития, дает значительное улучшение результатов, особенно для движущихся локомотивов. Идея сравнения эталонной траектории с вычисленной имеет развитие в дальнейшем и будет совершенствоваться по мере накопления данных на разных станциях и в различных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Серापина Б.Б.* «Глобальные системы позиционирования»: Учеб. изд., ИКФ «Каталог», Москва, 2002 г.
2. *Соловьев Ю.А.* «Системы спутниковой навигации», - М.: Эко-Трендз, 2000 г.
3. *Королев В.Ю.* Теория вероятностей и математическая статистика: учебник/В. Ю. Королев; МГУ им. М. В. Ломоносова.- М.: Проспект, 2006
4. *Ильин В.А., Позняк Э.Г.* Линейная алгебра, 1999. **ИДБ**

Коротко об авторе

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

