

УДК 629.371.21

ВИКОРИСТАННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ GPS ДЛЯ ВІДТВОРЕННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ГОНОЧНОГО АВТОМОБІЛЯ

А.М. Туренко, професор, д.т.н., А.В. Ужва, доцент, к.т.н.,
І.В. Лукашов, зав. ЛША, Є.Л. Савченко, майстер виробничого навчання ЛША,
ХНАДУ, М.С. Щербак, інженер, ТОВ «ЕКТОС Україна»

Анотація. Представлено алгоритми, які встановлюють зв'язок між геодезичними і картографічними системами для відтворення з найменшими викривленнями траєкторії руху гоночного автомобіля за допомогою пристрою ГНСС GPS, наведено концепцію моделювання траєкторії руху одиночного гоночного автомобіля.

Ключові слова: гоночний автомобіль, траса, траєкторія.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ GPS ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГОНОЧНОГО АВТОМОБИЛЯ

А.Н. Туренко, профессор, д.т.н., А.В. Ужва, доцент, к.т.н.,
И.В. Лукашов, зав. ЛСА, Е.Л. Савченко, мастер производственного
обучения ЛСА, ХНАДУ, М.С. Щербак, инженер, ООО «ЕКТОС Украина»

Аннотация. Представлены алгоритмы, которые устанавливают связь между геодезическими и картографическими системами для воспроизведения с наименьшими искажениями траектории движения гоночного автомобиля с помощью устройства ГНСС GPS, приведена концепция моделирования траектории движения одиночного гоночного автомобиля.

Ключевые слова: гоночный автомобиль, трасса, траектория.

USE OF GPS NAVIGATION SATELLITE SYSTEM FOR TRAJECTORY PLAYBACK OF A RACING VEHICLE

A. Turenko, Professor, Doctor of Technical Science, A. Uzhva, Associate Professor,
Doctor of Technical Science, I. Lukashov, Head of LSV, E. Savchenko, Training Officer,
KhNAHU, M. Shcherbak, engineer, A/S «EKTOS Ukraine»

Abstract. The algorithms that establish the link between the surveying and mapping systems to play the trajectory of a racing vehicle with minimal distortion by means of GPS device were presented. The concept of modeling the trajectory of a particular race vehicle is given.

Key words: race vehicle, track, trajectory.

Вступ

З уведенням в геодезичну практику глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) визначення місцеположення з'явилася можливість визначати координати точок земної поверхні в загальноземній системі просторових координат. Карти земної поверхні складаються в різних картографічних проекціях, що використовують, як правило,

системи плоских прямокутних координат для відображення об'єктів місцевості.

Разом з тим практика впровадження сучасних супутникових технологій показала, що їх ефективно використання у багатьох випадках не можливе через розбіжність супутникових та картографічних систем координат (СК). Багато країн світу для цілей картографування своїх територій використовують як різні

референц-еліпсоїди, так і різні картографічні проекції, серед яких найбільшого поширення набули проекція Гауса–Крюгера, конформна поперечно-циліндрична проекція Меркатора (UTM), конічна рівнокутова проекція Ламберта та ін. Параметри референц-еліпсоїдів, що використовуються для картографування в цих проекціях, їх орієнтування, як правило, відрізняються від параметрів загальноземного еліпсоїда WGS (World Geodetic System), який використовується ГНСС GPS як базовий для своєї системи координат.

Аналіз публікацій

Для розв'язання плоскої двовимірної задачі дослідження траєкторії руху гоночного автомобіля важливо визначити тип використовуваних супутникових та картографічних систем координат (СК) і встановити зв'язок між ними.

Просторові дані – це дані про місцезнаходження, взаємне розташування об'єктів або розповсюдження явищ, представлені в певній системі координат, тобто такі дані розглядаються з точки зору їх розміщення на поверхні Землі (або відносно поверхні Землі). Геодезична основа просторових даних визначає способи переходу від фізичної поверхні Землі до математичної поверхні (геоїд, еліпсоїд обертання, площина).

Геометричну форму поверхні планети найбільш точно описує геоїд – фігура, утворена поверхнею рівня вод Світового океану, продовженою під материками, яка у всіх точках є перпендикулярною вектору сили тяжіння. У геодезії форму Землі моделюють еліпсоїдом – тілом, отриманим обертанням еліпса навколо його малої осі. Параметри еліпсоїда підбирають так, щоб середньоквадратичне відхилення моделі від поверхні геоїда було мінімальним або по всій поверхні Землі, або для будь-якої окремої країни чи регіону. Обрана модель еліпсоїда (референц-еліпсоїд) і система координат на основі цього еліпсоїда складають геодезичний датум.

Робота з просторовими даними вимагає знання СК, обраних для використання, і параметрів перетворення координат на основі їх геодезичного датуму для зв'язку і переходу між ними. У найбільш загальному випадку при дослідженні місця розташування об'єкта на земній поверхні використовуються географічна (за Гринвічем) СК і топогра-

фічна СК. Географічні СК бувають геоцентричними (геодезичними загальноземними) і топоцентричними (національними або геодезичними референцними).

ГНСС GPS для визначення місцезнаходження точок на земній поверхні використовує СК WGS-84 (World Geodetic System), що базується на моделі еліпсоїда WGS-84. Для картографування земної поверхні в загальносвіттовому масштабі з кінця XX сторіччя використовується загальноземний еліпсоїд GRS-80 (Geodetic Reference System), параметри якого є близькими до еліпсоїда системи WGS-84.

Для картографування окремих регіонів земної поверхні використовуються еліпсоїди з іншими параметрами, які відрізняються від еліпсоїдів WGS-84 та GRS-80, пристосовані для кращого відображення на своїй поверхні цих регіонів. Найбільш часто у практиці використовуються референц-еліпсоїди Красовського, Бесселя, Кларка [1–3]. Основні параметри цих еліпсоїдів наведені в табл. 1.

Таблиця 1 Параметри еліпсоїдів

Назва еліпсоїда	Екваторіальний радіус	Полярне стиснення
WGS - 84	6378137	1/298.257223563
GRS - 80	6378137	1/298.257222101
SGS-85	6378136	1/298,257839303
Красовського (1940)	6378245	1/298.3
Кларка (1880)	6378249.145	1/298.465
Бесселя (1841)	6377397.155	1/299.1528128
Південно-американський (1969)	6378160	1/298.25

В останні десятиліття в геодезичній практиці окремих держав і на окремих континентах також набули поширення наступні референцні системи координат [4]:

- ITRS – загальноземна міжнародна референцна СК;
- ETRS-89 – загальноземна європейська референцна СК 1989 р.;
- ПЗ-90 (Параметри Землі 1990 р.) – геоцентрична СК 1990 р.;
- СК-95 – єдина державна система геодезичних координат Російської Федерації 1995 р.;
- СК-ГК – геоцентрична СК на еліпсоїді Красовського;
- СК-42М (Пулково 1942 р.) – Модернізована СК 1942 р.

Розглянемо докладніше топографічну систему координат та її зв'язок з географічною СК. Перехід від математичної поверхні, що не є площиною, до площини здійснюється за допомогою картографічних проекцій. У силу того, що поверхню земного еліпсоїда неможливо розгорнути на площину без розривів і спотворень, при проектуванні відбуваються порушення однієї або декількох властивостей проекції: рівномасштабності, рівнокутності, рівновеликості [5].

Картографічна проекція визначає відповідність точок еліпсоїда, або його частини, і точок площини, або її частини. Таку відповідність може бути іноді визначено і чисто геометрично, але в геоінформаційних технологіях, як правило, використовується аналітичний спосіб визначення проекції. Тобто формули картографічної проекції пов'язують системи координат, задані на еліпсоїді і на площині. Прямокутні системи координат на площині можуть відрізнятися одна від одної зрушенням початку координат, поворотом координатних осей, зміною масштабу. Вибір картографічної проекції дозволяє в певних межах керувати розподілом спотворень і, як наслідок, властивостями картографічного зображення.

Існують різні види картографічних проекцій, кожному з них відповідають певна картографічна сітка і властиві їй спотворення. Картографічні проекції класифікують за характером спотворень, видом зображення меридіанів і паралелей (географічною сіткою) та деякими іншими ознаками.

За характером спотворень розрізняють такі картографічні проекції:

- рівнокутні – зберігають рівність кутів між напрямками на карті та в реальності;
- рівновеликі – зберігають пропорційність площ на карті відповідним площам на земній еліпсоїді. Взаємна перпендикулярність меридіанів і паралелей на такій карті зберігається лише по середньому меридіану;
- рівнопроміжкові – зберігають постійність масштабу за певним напрямком;
- довільні – не зберігають ні рівності кутів, ні пропорційності площ, ні сталості масштабу. Сенс застосування довільних проекцій полягає в більш рівномірному розподілі спотворень на карті і зручності розв'язання деяких практичних задач.

За видом зображення сітки меридіанів і паралелей картографічні проекції поділяються на конічні, циліндричні, азимутальні та ін. Причому в межах кожної з цих груп можуть бути різні за характером спотворень проекції (рівнокутові, рівновеликі і т.д.).

Геометрична сутність конічних і циліндричних проекцій полягає в тому, що сітка меридіанів і паралелей проектується на бічну поверхню конуса чи циліндра з наступним розгортанням цих поверхонь у площину. Геометрична сутність азимутальних проекцій полягає в тому, що сітка меридіанів і паралелей проектується на площину, дотичну до кулі в одному з полюсів або січну за певною паралеллю.

Вибір картографічної проекції для топографічних карт залежить від розмірів території, що картографується, та її географічного положення.

Більшість країн світу для складання топографічних карт використовують рівнокутові циліндричні проекції.

Проекції і Гауса-Крюгера, і Universal Transverse Mercator (UTM) – це різновиди поперечно-циліндричної проекції. Уявний циліндр, на який відбувається проекція, охоплює земний еліпсоїд по меридіану, що зветься центральним (осьовим) меридіаном зони. Зона – це ділянка земної поверхні, обмежена двома меридіанами. Обидві проекції поділяють земний еліпсоїд на 60 зон шириною 6° . У Росії для топографічних карт масштабів 1:10000 – 1:1000000 прийнято єдину рівнокутну поперечно-циліндричну проекцію Гауса-Крюгера [5]. У проекції Гауса-Крюгера циліндр є дотичним до еліпсоїда по осьовому меридіану, масштаб уздовж нього дорівнює 1. Зони нумеруються із заходу на схід, починаючи з 0° : так, зона 1 простягається від меридіана 0° до меридіана 6° , її осьовий меридіан – 3° східної довготи. Нумерація номенклатурних листів карт починається від меридіана 180° із заходу на схід. Вісь абсцис системи координат цієї проекції спрямована на північ (нагору) вздовж середнього меридіана, а вісь ординат має напрям на схід (вправо).

На відміну проекції Гауса-Крюгера, UTM – універсальна поперечно-циліндрична проекція (Universal Transverse Mercator projection) – це проекція на січний циліндр, і для осьо-

вого меридіана використовується масштабний коефіцієнт, що дорівнює 0,9996. Тому ця проекція зберігає масштаби не на осьовому меридіані, а на деякій відстані (близько 180 км) від нього, через що максимальне спотворення масштабу в межах шестиградусної зони у неї менше. Іншою відмінністю є нумерація зон, починаючи із зони, осьовий меридіан якої має довготу 177° західної довготи. Таким чином, наприклад, 7-а зона у проекції Гауса-Крюгера за географічним охопленням відповідає 37-й зоні UTM. Вісь абсцис у системі координат даної проекції спрямована на схід, а вісь ординат – на північ. Щоб уникнути негативних значень координат, до значень абсциси додаються 500000 м (Східне зміщення), а до значення ординати в південній півкулі – 10000000 м (Північне зміщення).

Мета і постановка задачі

Метою є встановлення функціональної залежності між СК різних референц-еліпсоїдів, знаходження алгоритмів зв'язку між системами картографічних та референцних координат і переобчислення координат з однієї СК в іншу для відтворення траєкторії руху гоночного автомобіля по трасі автодрому. Мета дослідження – формулювання алгоритмів, що встановлюють зв'язок між СК і дозволяють здійснювати перетворення координат з однієї системи в іншу.

Подання, обчислення та перетворення координат

Для математичного і візуального представлення положення об'єкта у просторі використовують геоінформаційні системи (ГІС) – системи збору, зберігання, аналізу та графічної візуалізації просторових (географічних) даних і пов'язаної з ними інформації про необхідні об'єкти. У даному випадку ГІС використовують як інструмент (програмний продукт), що дозволяє користувачеві аналізувати цифрові карти.

Оскільки побудова траєкторії руху гоночного автомобіля не ставить завданням точну топографічну прив'язку до географічних точок, необхідну, наприклад, при прокладці і контролі протяжних маршрутів або курсів у навігаційній практиці, необхідно всього лише домогтися точного взаємного розташування точок послідовної зміни положення досліджуваного об'єкта на площині протягом фік-

сованого часового відрізка. При цьому, враховуючи той факт, що об'єкт переміщається на відносно невеликій ділянці земного простору, має значення відсутність спотворень форми траєкторії його руху і вихід її за межі, обмежені можливим коридором руху – полотном траси автодрому. Ця обставина передбачає використання ГІС для візуального контролю спотворень форми траєкторії руху автомобіля щодо меж можливого коридору його руху.

Траєкторія руху гоночного автомобіля може бути отримана кількома способами. Фактична траєкторія руху по трасі автодрому ілюструє закон керування гоночним автомобілем, характер його руху і може бути отримана експериментально за допомогою ГНСС у вигляді просторових даних. Отримані дані занурюються в ГІС для візуального контролю і, якщо ГІС має таку можливість, приводяться до прямокутної декартової системи координат, пов'язаної з трасою автодрому, для подальшого аналізу. Початок координат знаходиться в точці початку руху на лінії «Старт» траси автодрому. Розрахункова траєкторія руху є результатом математичного моделювання руху точки, що збігається з центром мас гоночного автомобіля (для плоскої двовимірної постановки задачі), виходячи з умови стійкого руху автомобіля. Розрахункова траєкторія ілюструє закон керування гоночним автомобілем і характер його руху для досягнення мінімального часу подолання дистанції від лінії «Старт» до лінії «Фініш», обмеженої коридором траси автодрому. Результати моделювання виражаються в координатах прямокутної декартової системи координат, пов'язаної з трасою автодрому. Початок координат знаходиться в точці початку руху на лінії «Старт» траси автодрому.

Таким чином, фактична і розрахункова траєкторії, приведені до однієї системи координат, можуть накладатись одна на одну і подаватись у вигляді матриці, або у графічній формі для подальшого аналізу. Також координати розрахункової траєкторії можуть бути перетворені в географічні координати і занурені в ГІС для візуального контролю і формулювання інструкцій для пояснення закону керування гоночним автомобілем.

Через те, що ГІС різняться предметною областю інформаційного моделювання і, як наслідок, функціональними можливостями, складністю, умовами розповсюдження та ви-

користання (платні, безкоштовні, безкоштовні з обмеженим періодом використання), а також особливостями перетворення просторових даних через неспівпадіння супутникових та картографічних систем координат різних країн, постала задача – віднайти алгоритми, які допоможуть встановити зв'язок між найбільш поширеними системами координат і дозволять здійснити перетворення координат з однієї системи в іншу.

Алгоритм обчислення плоских прямокутних координат за відомими геодезичними координатами у проекції Гауса–Крюгера

В теорії проекції Гауса–Крюгера відомі формули [6–8], що встановлюють зв'язок між геодезичними координатами B , L і плоскими прямокутними зональними координатами x , y .

Для обчислення на ЕОМ ці формули є незручними, тому, з урахуванням розробок в [9–11] і [3], після перетворення цих формул до виду, зручного для програмування, з урахуванням вищевикладеного, алгоритм обчислення плоских координат x і y в проекції Гауса–Крюгера буде таким:

- 1) за відомою довготою L обчислюють довготу осевого меридіана L_0 і різницю довгот l ;
- 2) заносять у пам'ять комп'ютера вихідні значення B і L в радіанах;
- 3) обчислюють значення коефіцієнтів a_i і b_i ;
- 4) обчислюють координати x і y в проекції Гауса–Крюгера;
- 5) перетворюють ординату y до умовного виду з урахуванням перенесення початку координат у кожній зоні на 500 км на захід і з урахуванням номера зони.

Алгоритм обчислення плоских прямокутних координат за відомими геодезичними координатами у проекції UTM

Відповідно до [10, 11] за відомими формулами для обчислення плоских прямокутних координат x і y в проекції UTM алгоритм обчислення цих координат буде таким:

- 1) за геодезичною довготою L визначають довготу осевого меридіана L_0 в зональній системі координат проекції UTM;
- 2) визначають різницю довгот l ;
- 3) використовуючи параметри заданого еліпсоїда a і e^2 обчислюють значення коефіцієн-

тів A_i і значення довжини дуги осевого меридіана X ;

4) обчислюють величини t і η^2 , а також значення коефіцієнтів k_i і a_i ;

5) обчислюють плоскі прямокутні координати x , y в проекції UTM.

Перевірка працездатності та результати тестових заїздів

Тестування працездатності вищенаведених алгоритмів проводилося в ході проведення ходових випробувань на дорозі загального користування зі встановленням обладнання на легковому автомобілі. Місцем проведення тестових заїздів було обрано транспортну розв'язку на перетині Кільцевої дороги та Бєлгородського шосе. Автомобіль рухався із середньою швидкістю 40,65 км/год по кільцевому маршруту довжиною 1700 м. Для візуальної оцінки форми траєкторії було застосовано ГІС «Google Планета Земля», яка використовує СК WGS-84 як референцну загальносвітову систему. Для візуалізації зображень використовувалися перетворені просторові дані, перенесені на динамічні ша-ри (*.kml), відображені накладенням поверх карт відповідної місцевості. При цьому алгоритми перетворення просторових даних в ГІС «Google Планета Земля» не відомі.

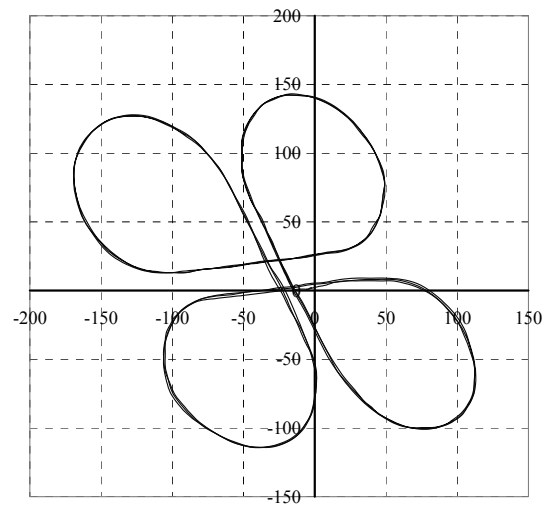
Очевидно, що траєкторія руху, побудована без перетворення координат за просторовими даними, отриманими безпосередньо з приймача ГНСС GPS в СК WGS-84, не відповідає зображенню траєкторії ГІС «Google Планета Земля», побудованої за тими самими просторовими даними, але підданим певним перетворенням, закладеним в ГІС (рис. 1).

Після перетворення просторових даних за допомогою віднайдених алгоритмів до плоскої прямокутної декартової системи координат, пов'язаної з місцем проведення заїзду (початок координат знаходиться в точці початку руху), зобразити траєкторію руху автомобіля стало можливим без спотворень (рис. 2).

Експериментальні дослідження проводилися на гоночній трасі автодрому «Автоград» (м. Харків) із залученням досвідчених водіїв гоночних автомобілів. Довжина траси, виміряна по середній лінії, становить 1000 м, довжина прямолінійної ділянки становить 250 м, довжина дуги криволінійної ділянки –

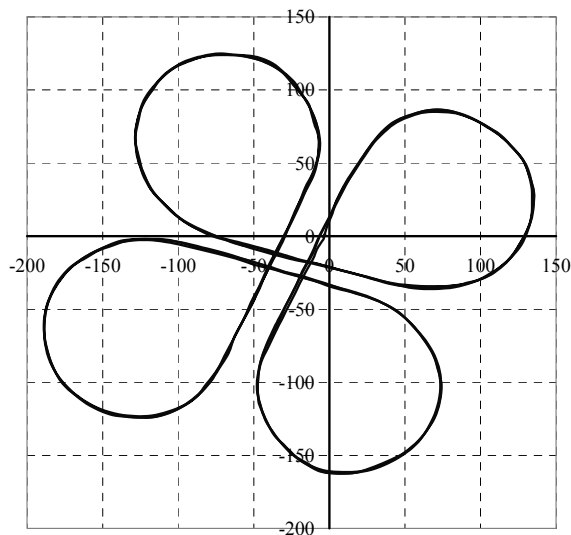


а

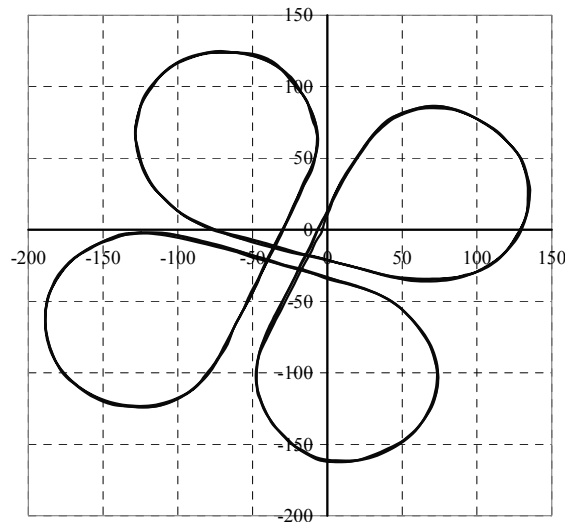


б

Рис. 1. Зображення траєкторії руху ГІС «Google Планета Земля» (а), та траєкторія руху, побудована без перетворення координат (б)



а



б

Рис. 2. Зображення траєкторії руху, побудоване за обчисленими координатами у проекції Гауса–Крюгера (а) та UTM (б)

250 м, радіус криволінійної ділянки – 75 м, ширина полотна траси – 12 м. Траса не має перепадів висот.

Дослідним зразком виступав гоночний автомобіль «ХАДИ-33», побудований лабораторією швидкісних автомобілів.

Висновки

Віднайдені алгоритми дозволяють перетворювати геодезичні координати у плоскі прямокутні координати, віднесені до тієї або іншої картографічної проекції.

Ці задачі розв'язані для координат у проекції Гауса–Крюгера і для координат в універсальній поперечно-циліндричній проекції UTM (Universal Transverse Mercator Projection). Алгоритми розв'язують задачу визначення плоских прямокутних координат X , Y відповідної проекції за геодезичними координатами B , L для довільного еліпсоїда.

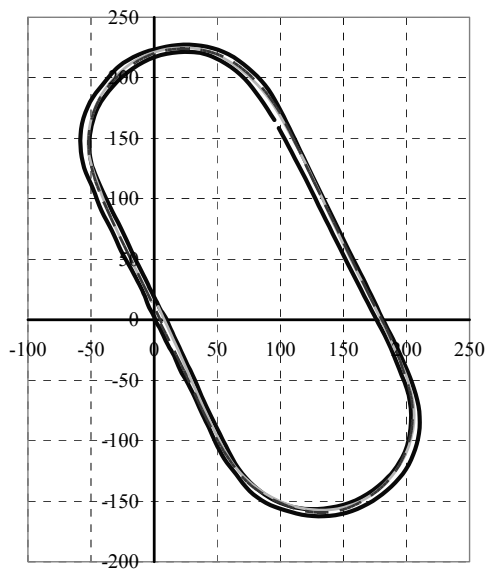
Розрахунки, виконані за розробленими алгоритмами, забезпечують точність обчислення координат X , Y до 0,001 м. Усі кутові величини необхідно виражати в радіанах. Після перетворення просторових даних, отриманих

із приймача ГНСС GPS, за допомогою розроблених алгоритмів до плоскої прямокутної декартової системи координат стало можливим зображати траєкторію руху гоночного автомобіля без спотворень.

Відтворено траєкторії руху гоночного автомобіля «ХАДІ-33» по замкнутому маршруту траси автодрому «Автоград» (м. Харків) під час довільного руху в режимі максимальних швидкостей (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Траєкторія руху гоночного автомобіля: зображення траєкторії руху ГІС «Google Планета Земля» (а); траєкторія, побудована за обчисленими координатами у проекції UTM (б)

Проведена імітація експериментального заїзду гоночного автомобіля цією ж трасою за допомогою математичного моделювання з наступним накладенням розрахованої траєкторії його руху на план траси з відтвореною траєкторією показала достатню точність, яка дозволяє фіксувати курсові відхилення та коригувати закон керування автомобілем.

Література

1. Христов В.К. Координаты Гаусса–Крюгера на эллипсоиде вращения / В.К. Христов. – М.: Геодезиздат, 1957. – 264 с.
2. Пеллинен Л.П. Высшая геодезия / Л.П. Пеллинен. – М.: Недра, 1978. – 238 с.
3. Czarnecki K. Geodezja wspolczesna w zarysie / K. Czarnecki. – Warszawa: Gall, 2010. – 496 s.
4. Красовский Ф.Н. Избранные сочинения: в 6 т. / Ф.Н. Красовский. – М.: Геодезиздат. – 1953. – Т.1. – 378 с.
5. Николаев А.С. Военная топография / А.С. Николаев. – М.: Воениздат, 1977. – 280 с.
6. Савчук С.Г. Вища геодезія / С.Г. Савчук. – Львів.: Ліга-Прес, 2000. – 248 с.
7. Машимов М.М. Уравнивание геодезических сетей / М.М. Машимов. – М.: Недра, 1979. – 368 с.
8. Вахромеев Л.А. Математическая картография / Л.А. Вахромеев, Л.М. Бугаевский, З.Л. Казакова. – М.: Недра, 1986. – 286 с.
9. Закатов П.С. Курс высшей геодезии / П.С. Закатов – М.: Недра, 1976. – 512 с.
10. Пилипюк Р.Г. Системы геодезических координат и их преобразование: отчёт по научно-исследовательской работе / Р.Г. Пилипюк. – Ивано-Франковск: Геоинформцентр, 2002. – 48 с.
11. Морозов В.П. Курс сфероидической геодезии / В.П. Морозов. – М.: Недра, 1979. – 296 с.

Рецензент: О.П. Алексієв, професор, д. т. н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 25 січня 2013 р.