

*Андрійчук Тарас,
здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти
фізико-математичного факультету
Науковий керівник: Васильєва Регіна,
кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри фізики та методики її навчання,
Житомирський державний університет імені Івана Франка,
м. Житомир, Україна*

ВИКОРИСТАННЯ GPS-НАВІГАЦІЇ ДЛЯ ПОЯСНЕННЯ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ НА УРОКАХ ФІЗИКИ

Постановка проблеми. Спеціальна теорія відносності (СТВ) знайомить учнів з фундаментальними ідеями сучасної фізики, які змінили розуміння простору, часу, енергії та маси. Це допомагає школярам формувати цілісний і сучасний науковий світогляд, розуміти, як класична фізика поступово інтегрується в квантову та релятивістську[1]. Вивчення СТВ окрім розвитку логічного та критичного мислення має практичне застосування. Зокрема, робота GPS-навігації враховує релятивістські ефекти, щоб забезпечити точність позиціонування, у фізиці високих енергій і астрофізиці (наприклад, при вивченні чорних дір, квазарів або космічних променів) СТВ є ключовим інструментом [3].

Аналіз актуальних досліджень. Сучасні підходи до навчання учнів елементам спеціальної теорії відносності в своїх роботах розкрили П.С.Атаманчук, С.П.Величко, О.А.Коновал, О.І.Ляшенко, М.Т.Мартинюк, О.В.Сергеєв, В.П.Сергієнко, Б.А.Сусь, М.І.Шут. Автори зазначають, що викладання СТВ має ґрунтуватися на строгих наукових основах, але матеріал необхідно адаптувати до рівня учнів, складні поняття (відносність одночасності, скорочення довжини, уповільнення часу) мають пояснюватися за допомогою спрощених моделей, які враховують рівень математичної підготовки. Особливе значення має поетапність та логічність подання матеріалу, ілюстративність тощо. Проте складність сприйняття учнями спеціальної теорії відносності потребує застосування нових підходів до вивчення зазначеної теми.

Мета статті. Мета роботи полягає в аналізі особливостей використання прикладу роботи GPS-системи для пояснення елементів спеціальної теорії відносності.

Виклад основного матеріалу. Викладання елементів СТВ повинно враховувати вік учнів, їхній рівень знань і готовність до сприйняття нових, абстрактних понять, а також забезпечувати розвиток критичного мислення та глибоке розуміння явищ, які СТВ описує. Важливим є не лише теоретична частина, але й розуміння практичного застосування елементів СТВ в сучасних технологіях та наукових дослідженнях.

Один з найяскравіших прикладів – це GPS-системи. Зокрема, спеціальна теорія відносності відіграє ключову роль у роботі сучасних GPS-систем, оскільки забезпечує врахування релятивістських ефектів, що виникають через

високу швидкість супутників і відмінності в гравітаційних потенціалах між супутниками та поверхнею Землі. Без корекцій, зумовлених СТВ і загальною теорією відносності (ЗТВ), точність GPS була б значно меншою. Пояснення застосування СТВ на даному прикладі по-перше підвищує мотивацію до вивчення фізики та навички її застосування в сучасних технологіях [2].

При поясненні варто почати з проблеми синхронізації часу. Так, GPS-система працює на основі точного вимірювання часу, за який сигнал від супутника доходить до приймача на Землі. Для цього використовуються атомні годинники на супутниках, які мають точність до наносекунд.

Якщо час на супутнику і приймачі буде розходитися, це спричинить похибку у визначенні відстані. Світло (або радіосигнал) долає 300 000 км за секунду. Тому помилка в 1 наносекунду ($1/1\,000\,000\,000$ с) викликає похибку приблизно в 30 см у розрахунку відстані. Помилка в 1 мікросекунду ($1/1\,000\,000$ с) означає похибку в 300 метрів.

Наступним моментом

Супутники GPS рухаються навколо Землі на висоті 20200 км зі швидкістю близько 14 000 км/год (приблизно 3,9 км/с).

Згідно з СТВ: об'єкти, які рухаються швидко відносно спостерігача, зазнають уповільнення часу а також, для супутника GPS час тече повільніше на 7 мікросекунд за добу порівняно з часом на Землі.

Це уповільнення зумовлено формулою Лоренца:

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

де: t' — час, виміряний у системі координат супутника;

t — час у системі спостерігача (на Землі);

v — швидкість супутника (3,9 км/с);

c — швидкість світла (300 000 км/с).

Через те, що швидкість супутника v значно менша за c , ефект Лоренца дуже малий, але достатній, щоб вплинути на точність GPS.

При поясненні учням варто наголосити на тому, що крім уповільнення часу через високу швидкість супутників (ефект СТВ), впливає також гравітаційний потенціал (ефект ЗТВ). На висоті супутника гравітаційне поле слабше, ніж на поверхні Землі. Через це годинники на супутнику «йдуть швидше» на 45 мікросекунд за добу. Це призводить до того, що загальна різниця між супутниковим часом і земним часом складає +38 мікросекунд на добу (45 мкс через ЗТВ – 7 мкс через СТВ).

Враховуючи вище зазначене робота GPS із врахуванням СТВ полягає в наступному. Кожен супутник GPS передає сигнал, який містить поточний час на супутнику (за атомним годинником) та положення супутника в просторі (орбіту). Приймач GPS на Землі отримує сигнал із запізненням (через час, за який сигнал пройшов від супутника до приймача). Відстань до супутника розраховується за формулою:

$$R = c\Delta t,$$

Де R — відстань до супутника;

c — швидкість світла;

Δt — різниця між часом відправлення сигналу (на супутнику) і часом отримання сигналу (на приймачі).

При поясненні даної теми, також варто звернути увагу на використання цифрових технологій та програмного забезпечення для подолання зазначених ефектів. Програмне забезпечення для корекції релятивістських ефектів у GPS виконує кілька ключових функцій: обробку даних із супутників, врахування релятивістських ефектів, а також забезпечення точності позиціонування. Прикладом такого програмного забезпечення є OCC (Operational Control Center), яка використовується ВПС США для управління GPS-супутниками та MAGIC (Monitor Station Analysis and Graphical Interface Client), інструмент для моніторингу супутникових даних у реальному часі.

На борту кожного супутника встановлено програму, яка обчислює і коригує часові сигнали перед їх передачею. Ця програма виконує ряд функцій: корекцію годинників (враховує релятивістський ефект на рівні супутника перед передачею сигналу); передавача епіграфічних даних (надає інформацію про положення супутника, його швидкість і поточний час). Дане програмне забезпечення, оптимізоване для роботи з атомними годинниками.

GPS-приймачі (у смартфонах, автомобілях, дронах тощо) мають вбудоване програмне забезпечення, яке отримує сигнали від супутників і виконує необхідні розрахунки для визначення місцезнаходження. По-перше, приймач отримує сигнали від кількох супутників і обчислює час їх проходження до приймача. По-друге, визначає координати користувача методом трилатерації. По-третє, на основі даних із супутника здійснює корекцію часу та уточнює положення з урахуванням епіграфічних даних і релятивістських поправок.

У GPS-приймачах широко використовується програмне забезпечення u-blox Firmware та Trimble GNSS Software. Також в системах GPS використовується програмне забезпечення для обчислення координат з урахуванням даних кількох систем - SPP (Single Point Positioning) та PPP (Precise Point Positioning), що використовує релятивістські поправки для досягнення сантиметрової точності.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Отже, використання GPS як прикладу для вивчення спеціальної теорії відносності (СТВ) є ефективним способом підвищити зацікавленість учнів і продемонструвати практичну значущість фізичних теорій. Такий підхід дозволяє учням не лише зрозуміти базові принципи СТВ, а й усвідомити їх роль у сучасних технологіях.

Список використаних джерел та літератури

1. Грітченко А. Г., Мартинюк М. Т., Шут М. І. Сучасні технології візуалізації навчальної інформації у професійній підготовці учителів. Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна, Кам'янець-Подільський, 2020. С. 92–101.

Секція 1. Інформаційно-комунікаційні технології в освіті та науці

2. Ільніцька К. С., Краснобокий Ю. М., Ткаченко І. А. Спеціальна теорія відносності : (матеріали до практичних занять) : посіб. для студ. Бровари : ТОВ «АНФ ГРУП», 2024. 108 с.

3. Критично-конструктивний підхід до вивчення спеціальної теорії відносності в профільних класах закладів загальної середньої освіти: навч.-метод. посіб. / А. О. Соломенко, О. А. Коновал, М. А. Слюсаренко, Т. І. Туркот; за ред. О. А. Коновала. Кривий Ріг: КДПУ, 2018. 150 с.