



DOI: 10.31388/2220-8674-2022-1-19

УДК 537.874:528.27

Н. А. Дьоміна, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-1118-1834

М. В. Морозов, к.ф.-м.н.

ORCID: 0000-0002-5122-8449

*Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*

e-mail: natalia.domina@tsatu.edu.ua, тел.: (0619) 42-68-74

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У СУПУТНИКОВІЙ ГЕОДЕЗІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИМІРЮВАНЬ

Анотація. Під час дослідження розглянуто методи лазерної доплерівської інтерферометри вимірювання швидкості та прискорення вільного падіння в гравіметрії. До одного з методів геофізики вивчення структури земної кори та пошуку корисних копалин належить визначення прискорення вільного падіння. Метод лазерної доплерівської інтерферометри визначення миттєвої швидкості є найбільш точним і перспективним. Проведено комп'ютерне моделювання процесу вимірювання в доплерівській інтерферометрії і автоматизації вимірювання, що забезпечує підвищення точності і автоматизацію визначення прискорення у реальному часі. Розглянуто комп'ютерне математичне моделювання процесу вимірювання прискорення вільного падіння балістичним методом. Представлено оптичну схему експериментальної вимірювальної установки диференціальним методом. Застосовано лазерний інтерферометр Майкельсона для вимірювання швидкості дифузновідбиваючої поверхні. Для розробки програми визначення прискорення та забезпечення автоматизації вимірювання у реальному часі проведено моделювання форми доплерівського сигналу в залежності від початкової фази. Проведено аналіз методів визначення площі поверхні ділянок у землеробстві при формуванні земельних кадастрів. У випадку криволінійної поверхні перспективним є метод триангуляції представлення складної поверхні у вигляді набору суміжних трикутників, що дає змогу обчислити площу кожного окремого трикутника. За допомогою векторної алгебри визначається площа ділянок через відомі координати реперних точок, що визначаються методами супутникової геодезії та GPS-приймачами. Розроблено алгоритм та програму обчислення площі криволінійної поверхні з використанням пакету MathCAD, якщо визначені за допомогою GPS-приймачів координати відповідних реперних точок.



Ключові слова: комп'ютерне моделювання, супутникова геодезія, доплерівська інтерферометрія, автоматизація вимірювань, площа поверхні ділянки.

Постановка проблеми. Для вивчення характеристик гравітаційного поля Землі у гравіметрії використовують балістичний метод вимірювання прискорення вільного падіння. Найбільш точним і перспективним є метод лазерної доплерівської інтерферометри визначення миттєвої швидкості та у подальшому прискорення вільного падіння. Моделювання процесу вимірювання забезпечує підвищення точності і автоматизацію визначення прискорення у реальному часі. Крім того, застосування супутникової геодезії та GPS-приймачів забезпечує позиціонування земельних ділянок, у першу чергу в сільському господарстві, та визначення периметру і площі. При застосуванні супутникової геодезії у сільському господарстві супутникові технології використовують для складання земельних кадастрів та визначення площі ділянок. Вдосконалення методів визначення площі у випадку криволінійних поверхонь є актуальним. Актуальними також є програмні розробки моделювання процесу вимірювання прискорення вільного падіння у гравіметрії.

Аналіз останніх досліджень. В роботах [1-4] розглянуто застосування супутникової геодезії у землеробстві і технології прецизійного водіння сільгоспмашин. В статті [5] представлено методи лазерної доплерівської інтерферометрії та моделювання процесу вимірювання швидкості частинок. Використання лазерної доплерівської інтерферометрії у гравіметрії для визначення швидкості та прискорення вільного падіння у різних точках поверхні Землі розглядається у статтях [6-10]. Застосування супутникової геодезії у землеробстві для вимірювання площі сільськогосподарських ділянок в першу чергу з криволінійної поверхнею та складання кадастрів представлені у роботах [11-13]. Дослідження точності визначення координат в системах точного цифрового землеробства та методи підвищення точності та інформативності вимірювань представлені в статтях [14,15]. В роботах [16-17] розглянуто методи радіолокаційної інтерферометрії та доплерівської інтерферометрії для моніторингу поверхні Землі за допомогою штучних супутників. Для точного вимірювання великих об'єктів широко використовуються лазерні трекери [18-23, 25, 27-31]. Дослідження різних вимірювальних систем наведено в статтях [24, 26, 32-35]. У гравіметрії найбільш точним і перспективним є метод лазерної доплерівської інтерферометрії визначення миттєвої швидкості та вільного прискорення. Моделювання процесу вимірювання забезпечує підвищення точності і автоматизацію визначення прискорення у реальному часі.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо комп'ютерне математичне моделювання процесу вимірювання прискорення g вільного падіння балістичним методом. Миттєва швидкість v тіла при падінні у вакуумі зі стану спокою ($v_0 = 0$) дорівнює:

$$v = gt \quad (1)$$

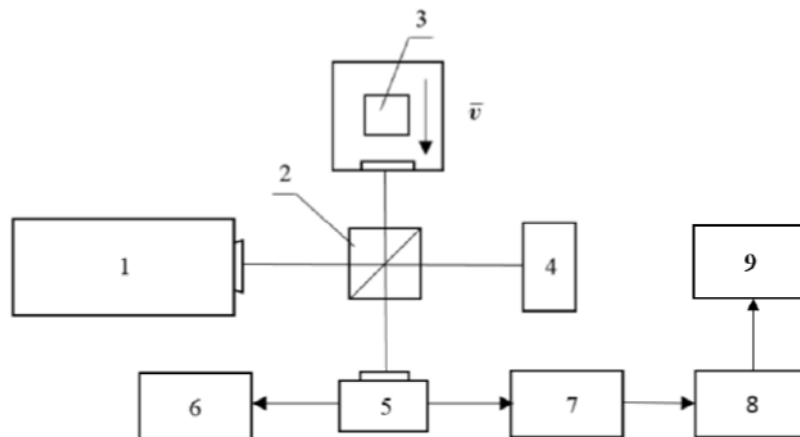
Визначаємо швидкість v тіла в момент часу t_1 хта t_2 :

$$v_1 = v_0 + gt_1, v_2 = v_0 + gt_2 \quad (2)$$

Тоді прискорення вільного падіння дорівнює:

$$g = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (3)$$

Миттєва швидкість вимірюється за допомогою лазерної доплерівської інтерферометри. Оптична схема експериментальної вимірювальної установки (диференціальний метод) представлена на рис 1. Застосовуємо лазерний інтерферометр Майкельсона для вимірювання швидкості дифузновідбиваючої поверхні.



1 – лазер ЛГН-222; 2 – світлоподільник; 3 – тіло, що падає у вакуумі; 4 – нерухома відбиваюча поверхня; 5 – фотоприймач; 6 – осцилограф (С 9-8); 7 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП); 8 – персональний комп'ютер (ПК); 9 – частотомір.

Рисунок 1. Оптична схема лазерної вимірювальної установки

Дифузновідбиваючі поверхні тіла 3 швидкість v і якого визначають та нерухома референтна поверхня 4 освітлюють сфокусованим когерентним випромінюванням лазера 1. У просторі реєстрації фотоприймача 5 утворюється інтерференційна спекл-структура двох когерентних хвиль. У першому наближенні приведена інтенсивність доплерівського сигналу наступним чином залежить від часу:

$$I(t) = I_0 \sin(2\pi \nu t + \varphi_0) \quad (4)$$

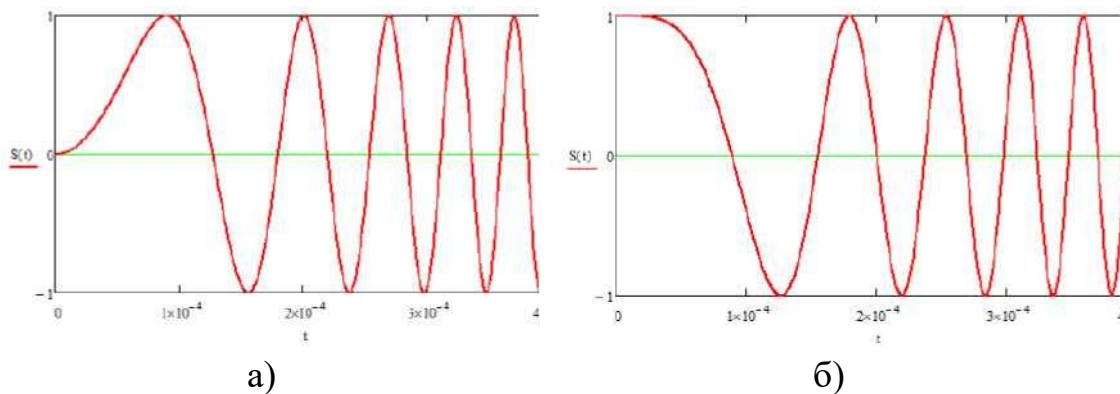
де $\nu = \frac{2v}{\lambda}$ – частота доплерівського сигналу;

$I_0=1$ – відносна амплітуда доплерівського сигналу;
 $\lambda = 0,6328$ мкм – довжина хвилі когерентного випромінювання гелій-неонового лазера;
 φ_0 – початкова фаза, яка залежить від юстировки оптичної схеми.

При вільному падінні у вакуумі ($v = gt$) доплерівський сигнал дорівнює:

$$I(t) = I_0 \sin\left(\frac{4\pi g}{\lambda} t^2 + \varphi_0\right)$$

Якщо відомий вигляд доплерівського сигналу, можливо визначити залежність частоти $\nu(t)$, швидкості $u(t)$ від часу та значення прискорення δ вільного падіння. Для розробки програми визначення прискорення та забезпечення автоматизації вимірювання у реальному часі проведено моделювання форми доплерівського сигналу в залежності від початкової фази φ_0 (рис.2). Для цього використано середовище програмування MathCAD.



а) для випадку $\varphi_{0,1} = 0$; б) $\varphi_{0,2} = \pi/2$

Рисунок 2. Вигляд доплерівського сигналу

Математичне комп'ютерне моделювання дозволяє розглянути алгоритм та програму вирішення оберненої задачі - визначення частоти доплерівського сигналу, миттєву швидкість та прискорення вільного падіння, якщо відома форма доплерівського сигналу. За допомогою аналого-цифрового перетворення отримують залежність інтенсивності I від часу та визначають період T та частоту сигналу. Алгоритм визначення періоду T для довільного значення початкової фази: по- перше знаходять значення t_{ml} , при якому величина сигналу максимальна I_{T1} , потім визначають час t_2 при якому величина доплерівського сигналу дорівнює 0. Для знаходження доплерівської частоти у першому наближенні (рис. 3):

$$I'(t) = 2\pi v \cdot \cos(2\pi vt + \varphi_0) = \frac{8\pi g}{\lambda} \cdot t \cdot \cos\left(\frac{4\pi g}{\lambda} \cdot t^2 + \varphi_0\right) \quad (6)$$

Тоді

$$v_D = \frac{I'(t_2)}{2\pi} \quad (7)$$

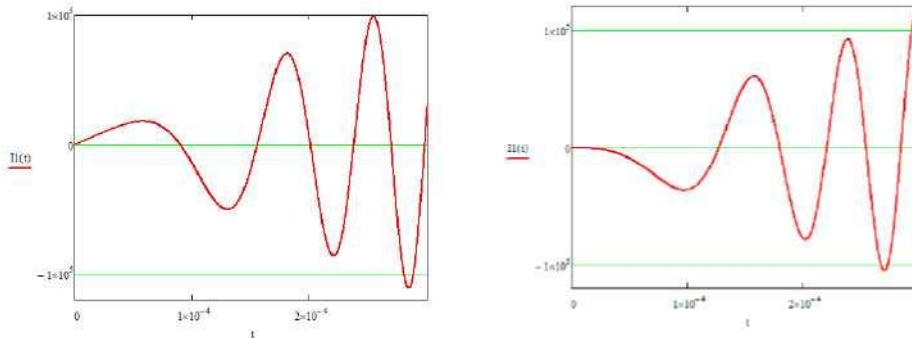


Рисунок 3. Графік залежності $I'(t)$

За допомогою частотоміра визначаємо частоту ν_1 доплерівського сигналу в момент часу t_1 та частоту ν_2 при t_2 , потім миттєві швидкості v_1 та v_2 :

$$v_1 = \frac{\nu_1 \cdot \lambda}{2} \quad (8)$$

$$v_2 = \frac{\nu_2 \cdot \lambda}{2} \quad (9)$$

Тоді прискорення вільного падіння дорівнює:

$$g = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\lambda}{2} \frac{(\nu_2 - \nu_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (10)$$

Частоту доплерівського сигналу $\nu_0(f)$ та її залежність від часу можливо виміряти за допомогою частотоміра (9). Розроблений алгоритм та програма визначення прискорення вільного падіння. Якщо за допомогою АЦП визначити похідну $I'(t)$ можливо визначити прискорення вільного падіння:

$$g = \frac{I'(t) \cdot \lambda}{8\pi t} \quad (11)$$

Методи супутникової геодезії використовують для визначення периметра та площі ділянок сільгоспугідь та садово-дачних кооперативів. За допомогою GPS-приймачів визначають координати реперних точок на межі ділянки та методами векторної алгебри розраховують площу поверхні. У випадку криволінійної поверхні типу «пагорб» (рис. 4а) додатково вимірюють координати вершини [15], представляють поверхню у вигляді чотирьох трикутників та визначають площу поверхні:

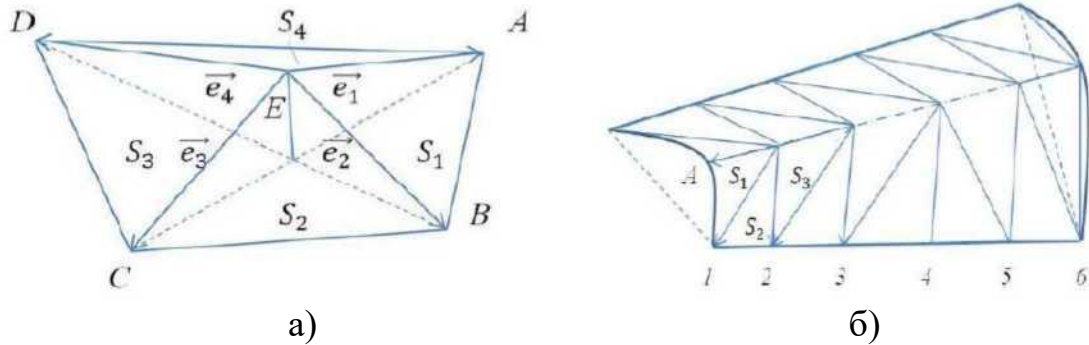
$$\begin{aligned} S(ABCDE) &= S_1(ABE) + S_2(BCE) + S_3(CDE) + S_4(ADE) = \\ &= \frac{1}{2} (|\vec{e}_1 \times \vec{e}_2| + |\vec{e}_2 \times \vec{e}_3| + |\vec{e}_3 \times \vec{e}_4| + |\vec{e}_4 \times \vec{e}_1|) \quad (12) \end{aligned}$$

Якщо криволінійна поверхня має більш складну форму (рис.4б) використовують метод триангуляції та представляють криволінійну

гладку поверхню набором відповідних трикутників та обчислюють площу [5,7,8] ділянки:

$$S = \sum_{i=1}^N s_i \quad (13)$$

де $s_i = \frac{1}{2} [|\vec{e}_i \times \vec{e}_{i+1}|]$ – площа і-го трикутника.



а) поверхня типу «пагорба»; б) метод триангуляції
Рисунок 4. Визначення площі криволінійної поверхні

Розроблено алгоритм та програма обчислення площі криволінійної поверхні з використанням пакету MathCAD, якщо визначені за допомогою GPS-приймачів координати відповідних реперних точок.

Висновки. Розглянуто методи лазерної доплерівської інтерферометри вимірювання швидкості та прискорення вільного падіння в гравіметрії. Визначення прискорення вільного падіння є одним з методів геофізики вивчення структури земної кори та пошуку корисних копалин. Розглянуто комп'ютерне моделювання процесу вимірювання в доплерівській інтерферометри і автоматизації вимірювання. З метою подальшого вдосконалення методів є актуальним дослідження та зменшення похибок вимірювання.

Зроблено аналіз методів визначення площі поверхні ділянок у землеробстві при формуванні земельних кадастрів. У випадку криволінійної поверхні перспективним є метод триангуляції представлення складної поверхні у вигляді набору суміжних трикутників. За допомогою векторної алгебри визначається площа ділянок, якщо відомі координати реперних точок, які визначаються методами супутникової геодезії та GPS-приймачами. У подальшому представляє інтерес дослідження залежності похибок (відносної, абсолютної) вимірювання площі від кривини складної криволінійної поверхні.

Список використаних джерел

1. Касім М. М., Васюхін М. І. Основні тенденції розвитку геоінформаційних навігаційних систем прецизійного землеробства в Україні. *Енергетика і автоматика*. 2016. № 2. С. 64–73.



2. Касім М. М., Васюхін М. І., Касім А. М. Високоточні методи отримання супутникових навігаційних даних для задач прецизійного водіння. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2016. № 1. С. 299–309.

3. Белавцева Т. М. Технологии точного земледелия, их перспективы и возможности использования на мелиорированных землях. *Научно-технический обзор*. М.: ФГНУ ЦНТИ «Мелиоводинформ», 2009. 110 с.

4. Васюхін М. І., Ткаченко О. М., Касім А. М., Іваник Ю. Ю. Проблеми побудови системи прецизійного землеробства на Україні. *Проблеми інформаційних технологій*. 2014. № 1. С. 112–118.

5. Morozov N. V. Simulation and automatization of measurements process in laser interferometry. *Functional Materials*. 2005. Т. 12, № 1. С. 117–119.

6. Дьоміна Н. А., Морозов М. В., Рожкова О. П., Халанчук Л. В. Математичне моделювання у супутниковій геодезії та гравіметрії з використанням пакету програм MathCad. *Сучасні комп'ютерні та інформаційні системи і технології: матер. І Всеукраїнської наук.-практ. інтернет-конф.* Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 29–32.

7. Сосницька Н. Л., Назарова О. П., Морозов М. В., Дьоміна Н. А. Фізико-математичне забезпечення дисциплін «Супутникова геодезія» і «Математична обробка геодезичних вимірів». *Актуальні проблеми та перспективи розвитку фундаментальних, прикладних, загальнотехнічних та безпекових наук: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції*. Київ: НПУ імені М.П. Драгоманова, 2021. С.80–82.

8. Арнаутов Г. П., Гик Л. Д., Коронкевич В. П. Измерение абсолютного значения ускорения силы тяжести лазерным баллистическим гравиметром. *Квантовая электроника*. 1979. Т. 6, № 3. С. 560–567.

9. Арнаутов Г. П., Вьюхин В. Н. Аналого-цифровой интерференционный метод измерения ускорения свободного падения. *Датчики и системы*. 2013. № 7. С. 48–52.

10. Морозов М., Сосницька Н., Дьоміна Н., Халанчук Л. Супутникова геодезія: навчально-методичний посібник. Мелітополь: ФОП Силаєва О. В., 2021. 88 с.

11. Сосницька Н. Л., Морозов М. В., Дьоміна Н. А., Онищенко Г. О., Халанчук Л. В. Застосування супутникової геодезії у землеробстві. *Праці ТДАТУ*. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. Вип. 20. Т. 3. С. 11–18.

12. Дьоміна Н. А., Морозов М. В., Халанчук Л. В. Інформаційнометодичне забезпечення курсів «Супутникова геодезія» а «Обробка геодезичних вимірів». *Розвиток сучасної науки та освіти*:



реалії, проблеми якості, інновації: матер. II Міжнародної наук.-практ. інтернет-конф. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. С. 290–295.

13. Патент на корисну модель 145672 “Спосіб визначення площини ділянки”, 2020 рік, Морозов М. В., Сосницька Н. Л., Дьоміна Н. А., Халанчук Л. В. Україна, опубл. 28.12.2020. Бюл. №24.

14. Касім М. М., Касім А. М. Алгоритмічні методи підвищення точності визначення просторово-часових координат мобільних агрегатів в системах цифрового землеробства. *Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні, 2016: збірник матеріалів IV Міжнар. наук.-практ. конф.* Немішаєве: НМЦ «Немішаєве», 2016. С. 58–60.

15. Віват А. Й., Літинський В. О., Колгунов В. М., Покотило І. Я. Дослідження точності визначення координат GNSS методом у режимі RTK. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. Вип. 74. 2011. С. 52–59.

16. Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Добрынин С. И., Захаров А. И., Чимитдоржиев Т.Н. Радиолокационная интерферометрия сезонных деформаций почвы и фазовая модель обратного рассеяния микроволн двухслойной средой с шероховатыми границами. *Оптика атмосферы и океана*. 2016, Т. 29, № 7. С. 585–591.

17. Рыхлова Л. В., Ключиков А. А. Искусственные спутники земли: Космическая геодезия и геодинамика. *Космічна наука і технологія*. 2019. Т. 25. № 4: 57–74.

18. Morse, E.; Welty, V. Dynamic testing of laser trackers. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2015, 64, 475–478.

19. Hughes, B.; Forbes, A.; Lewis, A.; Sun, W.; Veal, D.; Nasr, K. Laser tracker error determination using a network measurement. *Meas. Sci. Technol.* 2011, 22.

20. Nasr, K. M.; Forbes, A. B.; Hughes, B.; Lewis, A. ASME B89.4.19 standard for laser tracker verification—experiences and optimisations. *Int. J. Metrol. Qual. Eng.* 2012, 3, 89–95.

21. Aguado, S.; Pérez, P.; Albajez, J.A.; Santolaria, J.; Velázquez, J. Configuration Optimisation of Laser Tracker Location on Verification Process. *Material.s* 2020, 13, 331.

22. Aguado, S.; Santolaria, J.; Samper, D.; Aguilar, J.J. Forecasting method in multilateration accuracy based on laser tracker measurement. *Meas. Sci. Technol.* 2017, 28.

23. Gruza, M.; Gaska, P.; Gaska, A.; Harmatys, W.; Jedynek, M.; Kobiela, K. Assessment of Influence of Sample Averaging on Accuracy of Point Coordinates Measurement Performed Using Laser Tracking Systems. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 2019, 13, 94–99.

24. Clarke, T. A.; Wang, X.; Forbes, A. B.; Cross, N. R. The case for a consistent method of verifying the performance of large volume metrology



systems. *In Proceedings of the Coordinate Measurement Systems Committee Conference Proceedings*, Detroit, MI, USA, 12–16 July 2010.

25. Conte, J.; Santolaria, J.; Majarena, A.C.; Brau, A.; Aguilar, J.J. Identification and kinematic calculation of Laser Tracker errors. *Procedia Eng.* 2013, 63, 379–387.

26. Gassner, G.; Ruland, R. Laser Tracker Calibration—Testing the Angle Measurement System. *In Proceedings of the 15th Internationale Geodätische Woche, Obergurgl*, Austria, 8–14 February 2009.

27. Lewis, A.; Hughes, B.; Forbes, A.; Sun, W.; Veal, D.; Nasr, K. Determination of misalignment and angular scale errors of a laser tracker using a new geometric model and a multi-target network approach. *In Proceedings of the MacroScale Proceedings*, Wabern, Switzerland, 2011.

28. Yan, Y.; Ouyang, J.; Liu, W.; Deng, X.; Wang, X. Error Correction for the Tracking Mirror. *In Proceedings of the International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation Proceedings, Changsha*, China, 20–22 October 2008; pp. 1048–1051.

29. Haitjema, H. Calibration of displacement laser interferometer systems for industrial metrology. *Sensors* 2019, 19, 4100.

30. Huo, D.; Maropoulos, P.G.; Cheng, C.H. The framework of the virtual laser tracker – A systematic approach to the assessment of error sources and uncertainty in laser tracker measurement. *In Proceedings of the Advances in Intelligent and Soft Computing, International Conference on Digital Enterprise Technology Proceedings (DET2009)*, Hong Kong, 14–16 December 2009; pp. 507–523.

31. Wang, J.; Guo, J.; Wang, H.; Deng, Y. The evaluation of measurement uncertainty for laser tracker based on Monte Carlo method. *In Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Automation Proceeding*, Beijing, China, 7–9 August 2011; pp. 608–612.

32. Mutilba, U.; Kortaberria, G.; Egaña, F.; Yagüe-Fabra, J.A. 3D Measurement Simulation and Relative Pointing Error Verification of the Telescope Mount Assembly Subsystem for the Large Synoptic Survey Telescope. *Sensors*. 2018, 18, 3023.

33. Sładek, J.; Gąska, A. Evaluation of coordinate measurement uncertainty with use of virtual machine model based on Monte Carlo method. *Measurement*. 2012, 45, 1564–1575.

34. Gąska, A.; Ostrowska, K.; Harmatys, W.; Gąska, P.; Gruza, M.; Owczarek, D.; Kupiec, R.; Gromczak, K.; Sładek, J. Virtual CMM model adapted for usage in industrial conditions. *In Proceedings of the IMEKO XXI World Congress Measurement in Research and Industry proceedings, Prague*. Czech Republic, 2015; pp. 1425–1429.

35. Ostrowska, K.; Gąska, A.; Sładek, J. Determining the uncertainty of measurement with the use of a Virtual Coordinate Measuring Arm. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014, 71, 529–537.



Стаття надійшла до редакції 25.03.2022 р.

N. Domina, M. Morozov
Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

COMPUTER MODELING IN SATELLITE GEODESY AND MEASUREMENT AUTOMATION

Summary

The article is formulated methods of laser Doppler interferometry for measuring the speed and acceleration of free fall in gravimetry. To study the characteristics of the Earth's gravitational field in gravimetry use the ballistic method of measuring the acceleration of free fall. The most accurate and promising is the method of laser Doppler interferometry to determine the instantaneous velocity and subsequent acceleration of free fall. Modeling the measurement process provides increased accuracy and automation of real-time acceleration determination. The use of satellite geodesy and GPS receivers provides positioning of land, especially in agriculture, and determining the perimeter and area. When using satellite geodesy in agriculture, satellite technologies are used to compile land cadastres and determine the area of plots. An analysis of methods for determining the surface area of plots in agriculture in the formation of land cadastres. In the case of a curved surface, the method of triangulation of the representation of a complex surface in the form of a set of adjacent triangles is promising. With the help of vector algebra the area of plots is determined, if the coordinates of reference points are known, which are determined by the methods of satellite geodesy and GPS receivers. Mathematical computer simulation allows us to consider the algorithm and program for solving the inverse problem - determining the frequency of the Doppler signal, instantaneous velocity and acceleration of free fall, if the shape of the Doppler signal is known. With the help of GPS receivers determine the coordinates of reference points on the boundary of the site and use vector algebra methods to calculate the surface area. If the curved surface has a complex shape, use the triangulation method and calculate the area.

Key words: computer modeling, satellite geodesy, Doppler interferometry, automation of measurements, surface area of the site.