



УКРАЇНА

(19) UA (11) 60573 (13) A

(51) 7 G01C5/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДВИДАЄТЬСЯ ПІД
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ
ВЛАСНИКА
ПАТЕНТУ

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ТОЧОК НА ЗЕМНІЙ ПОВЕРХНІ

1

2

(21) 2003010082

(22) 03 01 2003

(24) 15 10 2003

(46) 15 10 2003, Бюл. № 10, 2003 р.

(72) Третяк Корнилій Романович

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА
ПОЛІТЕХНІКА"

(57) Спосіб визначення положення точок на земній поверхні, який полягає у тому, що проводять польове рекогносцирування місцевості, позначають на місцевості точки геодезичної мережі, встановлюють у кожній з них одну систему GPS, визначають нею наближені координати точок мережі, розраховують попередню точність положення точок, визначають інформативність кожного з векторів вимірів, а також оптимальну схему вимірів

максимальної інформативності, формують сесії вимірів, і визначають оптимально необхідні сесії вимірів, та розташовують одночасно не менше трьох систем GPS, послідовно у визначених точках геодезичної мережі, проводять виміри і визначають положення точок на земній поверхні, який відрізняється тим, що перед розташуванням у точках систем GPS визначають з топографічної карти витрати на переміщення між точками, на яких виконують виміри, визначають скорочений ряд послідовності виконуваних сесій вимірів з оптимально необхідних сесій за рахунок їх додаткової інформативності, якому відповідає мінімум витрат на переміщення систем GPS, і розташовують їх у точках мережі за визначеною схемою

Винахід відноситься до геодезичних вимірів, а, конкретно, до способів визначення положення точок на земній поверхні

Відомий спосіб визначення положення точок на земній поверхні полягає у тому, що проводять польове рекогносцирування місцевості, позначають на місцевості точки геодезичної мережі, встановлюють у кожній з них одну систему GPS, визначають нею наближені координати точок мережі, розраховують попередню точність положення точок, визначають інформативність кожного з векторів вимірів, а також оптимальну схему вимірів максимальної інформативності, формують сесії вимірів і визначають оптимально необхідні сесії вимірів, розташовують одночасно не менше трьох систем GPS у визначених точках геодезичної мережі, проводять виміри і визначають положення точок на земній поверхні (Спосіб визначення положення точок на земній поверхні Деклараційний патент 42431 Україна, МПК G01C5/00/ К Р Третяк (Україна) - №2001021169, заявлено 19 02 2001, публ. 15 10 2001 бюл. №9, 5ст.)

Але тривалість польових робіт, і відповідно, їхня вартість залежить від тривалості власне спостережень і витрат часу та ресурсів на переїзди між точками спостережень, тобто, на переміщення приладів з точки на точку. Відсутність оптимізації переміщень систем GPS між точками мережі у згаданому способі, не дає можливості комплексно

оптимізувати вимірювання з тією ж точністю але з меншими витратами

В основу винаходу поставлене завдання вдосконалити спосіб визначення положення точок на земній поверхні, в якому визначення скороченого ряду послідовності виконуваних сесій вимірів з оптимально необхідних сесій за рахунок їх додаткової інформативності дає б можливість мінімізувати витрати на переміщення систем GPS та зменшити вартість робіт із визначення положення точок на земній поверхні

Поставлене завдання вирішують тим, що у способі визначення положення точок на земній поверхні, який полягає у тому, що проводять польове рекогносцирування місцевості, позначають на місцевості точки геодезичної мережі, встановлюють у кожній з них одну систему GPS, визначають нею наближені координати точок мережі, розраховують попередню точність положення точок, визначають інформативність кожного з векторів вимірів, а також оптимальну схему вимірів максимальної інформативності, формують сесії вимірів і визначають оптимально необхідні сесії вимірів, розташовують одночасно не менше трьох систем GPS у визначених точках геодезичної мережі, проводять виміри і визначають положення точок на земній поверхні, згідно з винаходом після визначення оптимально необхідних сесій вимірів додатково визначають з топографічної карти ви-

(19) UA (11) 60573 (13) A

трати на переміщення між точками, на яких виконують виміри, визначають скорочений ряд послідовності виконуваних сесій вимірів з оптимально необхідних сесій, якому відповідає мінімум витрат на переміщення систем GPS, і розташовують їх у точках мережі за визначеною схемою

Оптимально необхідна кількість сесій оптимізує процес вимірів і одночасно надає можливість виконати їх з потрібною точністю, проте не враховує величини витрат на переміщення станцій GPS між точками. Послідовність ряду оптимально необхідних сесій може бути скорочена за рахунок їх додаткової інформативності тобто, загальна кількість оптимально необхідних сесій і точність вимірів лишаються незмінними, але час виконання польових робіт скорочується внаслідок зменшення часу на переміщення системи GPS між точками. Скорочення послідовності виконуваних сесій вимірів відповідає мінімум витрат на переміщення систем GPS. Це тягне за собою зменшення вартості виконуваних робіт із визначення положення точок на земній поверхні.

Щоб врахувати вплив фактору переміщень систем GPS на комплексну оптимізацію вимірів у геодезичній мережі слід визначити співвідношення витрат на безпосереднє проведення спостережень та на переміщення GPS-бригад між точками мережі. Затрати безпосередньо на вимірювання пропорційні часу спостережень. Затрати на переміщення GPS-систем між точками включають транспортні витрати, які залежать від тривалості та складності переїздів. За критерієм вибору технології оптимізації GPS-мережі можна умовно поділити на три групи:

1) мережі у яких тривалість спостережень окремих векторів і витрати на них у порівнянні з тривалістю переїздів і транспортними витратами значно більше,

2) приблизно рівноцінна,

3) значно менша.

Очевидно, що для другої та третьої груп необхідна оптимізація переміщень GPS-систем між точками мережі. Скорочений ряд послідовності виконаних сесій вимірів з оптимально необхідних сесій відповідає мінімум витрат на переміщення систем GPS.

Спосіб визначення положення точок на земній поверхні здійснюють таким чином. Проводять польове рекогносцирування місцевості. Для цього виїжджають на місце майбутньої мережі. Якщо це новостворювана мережа намічають місця розташування її точок, причому відстані між точками має бути більшою від 20° для безперешкодного поля зору. Вибрані точки мережі позначають спеціальними реперами. Положення точок наносять на карти з метою легкого знаходження їх у майбутньому. Якщо це існуюча мережа, координати якої втрачені, точки її не вимагають закріплення. Встановлюють у кожній точці геодезичної мережі одну систему (приймач) GPS згідно з інструкціями до установлення системи GPS на точці. Визначають нею наближені, наприклад, з точністю до 100 м, координати точок мережі.

Після опрацювання вихідних даних, розраховують попередню точність положення точок. Для цього складають матрицю рівнянь поправок усіх

можливих векторів A . Повне рівняння поправок має такий вид:

$$-\xi_i - \eta_i - \zeta_i + \xi_j + \eta_j + \zeta_j + l_{ij} = v_{ij} \quad (1)$$

де $\xi_i, \eta_i, \zeta_i, \xi_j, \eta_j, \zeta_j$ - поправки у відповідні координати точок i та j , між якими вимірюється вектор, l_{ij} - вільний член (при моделюванні мережі у матрицю A він не входить).

Матриця ваг вимірів формується з регресійних рівнянь точності визначення компонент векторів, які входять у вихідні дані. Вага вектора визначається зі співвідношення

$$p_{ij} = \frac{\mu^2}{m_{ij}^2} = \frac{\mu^2}{f(L, \Delta t)} \quad (2)$$

де μ - середня квадратична похибка одиниці ваги (як правило, середня квадратична похибка виміру вектора завдовжки 1 км), L - довжина вектора, Δt - тривалість вимірювання вектора, f - регресійна функція. Матриця ваг вимірів має діагональний вигляд, недиагональні елементи дорівнюють нулю. Далі знаходимо коваріаційну матрицю всіх можливих векторів

$$K = \mu \sqrt{(A^T P A)^{-1}} \quad (3)$$

Середня квадратична похибка визначення координат точки обчислюється з виразу

$$m_i = \sqrt{K_{i,j} + K_{i,j+k-1} + K_{i,j+2(k-1)}} \quad (4)$$

де k - кількість точок у мережі. В залежності (4) використовується індекс $k-1$, оскільки перша точка мережі приймається за вихідну. Знаходять максимальну похибку визначення координат точок мережі

$$m_{\max} = \max(m_i), \quad i=1, \dots, k-1 \quad (5)$$

Далі визначають інформативність кожного вектора вимірів. Для цього тимчасово вага цього вектора прирівнюється до нуля і повторюється процедура обчислень за формулами (3-5). У

результаті за виразом (5) визначається m_{\max} . Інформативність i -го вектора становитиме

$$\Delta F_i = m_{\max} - m_{\max} \quad (6)$$

Так послідовно для всіх векторів визначається їхня інформативність, яка заноситься до масиву інформативності вимірів. В процесі визначення інформативності значення ваги попереднього вектора відновлюється.

Наступний етап - це вилучення максимальної кількості вимірів мінімальної інформативності, тобто, визначенні оптимальної схеми вимірів максимальної інформативності. Для цього масив вимірів сортується в порядку зростання інформативності і з моделі мережі послідовно вилучаються виміри в порядку зростання їх інформативності. Процес завершується, коли

$$m_{\max} \geq m_{\text{доп}} \quad (7)$$

де $m_{\text{доп}}$ - допустима похибка визначення координат точки задана в вихідних даних. Якщо $m_{\max} > m_{\text{доп}}$, то останній вектор повертається в оптимальну модель мережі.

Таку технологію вилучення вимірів відносять

до спрощеного алгоритму. При застосуванні цієї методики кінцева модель мережі може бути квазі-оптимальною. Це пояснюється тим, що під час чергового вилучення виміру з модельної мережі інформативність вимірів повільно змінюється і відповідно змінюється по черговість вимірів у порядку зростання інформативності. У спрощеному алгоритмі ця по черговість з першого етапу приймається незмінною. У точному алгоритмі по черговість вимірів визначається після вилучення кожного виміру з модельної мережі. Точний алгоритм дає строго оптимальний результат, але потребує значно більшого об'єму обчислень. Для великих мереж порядку 100 і більше точок його застосування вимагає застосування особливо потужної обчислювальної техніки.

Для цього послідовно визначаються точки, які входять до окремих сесій, тобто формують сесії вимірів. Визначення точок спостережень у кожній сесії виконується за принципом максимальної ефективності сесії. Ефективність сесії визначається зі співвідношення

$$E = \frac{q}{n} = \frac{2 \cdot q}{m(m-1)}, \quad (8)$$

де n - кількість усіх можливих векторів в окремій сесії, m - кількість приймачів, яка одночасно застосовується в сесії, q - кількість спільних векторів, які входять у сесію і в оптимальну модель мережі. Максимальне значення ефективності сесії E відповідає мінімальній кількості векторів, які можуть бути визначені з даної сесії, але які не входять до оптимальної моделі вимірів, тобто це сукупність малоінформативних вимірів, що вилучені з моделі вимірів. Коефіцієнт E визначається для всіх можливих сесій, утворених з усіх можливих комбінацій точок мережі. З ряду всіх можливих сесій визначається сесія з мінімальним коефіцієнтом E . Ця сесія заноситься в ряд послідовних сесій, а вектори, які до неї входять, вилучаються з оптимальної моделі вимірів. Аналогічно визначається кожна наступна сесія. У зв'язку з вилученням векторів з оптимальної моделі коефіцієнти E на кожному етапі можуть для одних і тих же сесій змінювати свої значення. Процес формування ряду послідовних сесій завершується після вилучення всіх векторів з оптимальної моделі.

За допомогою коефіцієнта E для будь-якої конкретної мережі можна дібрати оптимальну кількість приймачів, які одночасно використовуються в сесії. Чим більше співвідношення між кількістю вимірів в оптимальній моделі вимірів і кількістю всіх можливих вимірів, тим ефективніше використання більшої кількості приймачів. Оскільки в ряді послідовних сесій значення коефіцієнта E для кожної наступної сесії зменшується, то можна визначити сесію, на якій кількість приймачів доцільно зменшити.

Наступний етап оптимізації полягає в мінімізації ряду послідовних сесій. Необхідно врахувати, що з ряду послідовних сесій можна визначити вектори, які незалежно від нас підпадають під вимірювання, і які не входять до оптимальної моделі вимірів. Разом з вимірами оптимальної моделі ці виміри утворюють реальну модель мережі. Вони вносять певну інформативність у кінцевий варіант

мережі, але ця інформативність не враховується в оптимальній моделі мережі. Відповідно інформативність цих вимірів може замінити сумарну інформативність кінцевих сесій. В такому випадку їх можна вилучити з ряду послідовних сесій. Для цього вводиться поняття інформативності сесії, яке можна зобразити таким виразом

$$\Delta S = \sum_{i=1}^r \Delta F_i + \sum_{j=1}^g \Delta F_j = \Delta S_1 + \Delta S_2 \quad (9)$$

де $\Delta S_1 = \sum_{i=1}^r \Delta F_i$ - сумарна інформативність спільних векторів, які входять до сесії та до опти-

мальної моделі мережі, $\Delta S_2 = \sum_{j=1}^g \Delta F_j$ - сумарна інформативність векторів, які можуть бути визначені з сесії і які не входять до оптимальної моделі мережі.

Похибка визначення координат найслабшої точки в оптимальній моделі мережі

$$m_{\max} = \mathcal{R}(\sum_{i=1}^r \Delta S_{1i}) \quad (10)$$

де \mathcal{R} - неявна функція залежності m_{\max} від сумарної інформативності вимірів у оптимальній

моделі мережі $\sum_{i=1}^r \Delta S_{1i}$, r - кількість сесій в ряді послідовних сесій. Реальне значення m_{\max} після виконання вимірів згідно ряду послідовних сесій буде рівне

$$m_{\text{реал}} = \mathcal{R}(\sum_{i=1}^r (\Delta S_{1i} + \Delta S_{2i})) \quad (11)$$

Враховуючи залежність (1) і те, що

$$m_{\text{реал}} \leq m_{\max}, \text{ то різниця } m_{\text{реал}} - m_{\text{доп}} \text{ згідно з (7, } \sum_{i=1}^r \Delta S_{2i}$$

10, 11) викликана неврахуванням $\sum_{i=1}^r \Delta S_{2i}$ - сумарної інформативності вимірів, які входять у ряд послідовних сесій і не входять до оптимальної моделі мережі. Ця додаткова (зайва) інформативність може бути компенсована інформативністю останніх сесій вимірів, інформативність яких найнижча в ряді послідовних сесій. Для можливого вилучення цих сесій з ряду послідовних сесій визначаємо з ряду послідовних сесій реальну модель мережі та за залежностями (2-5) знаходимо $m_{\text{реал}}$. Виміри, які можуть бути визначені з останньої сесії, вилучаються з реальної моделі. За цією моделлю знаходиться нове значення $m_{\text{реал}}$. Зворотний процес вилучення сесій з ряду послідовних сесій завершується, коли $m_{\text{реал}} \geq m_{\text{доп}}$. Якщо $m_{\text{реал}} > m_{\text{доп}}$ то остання вилучена сесія повертається в ряд послідовних сесій, тобто визначають оптимально необхідні сесії вимірів. Остаточна реальна модель вимірів приймається за оптимальну модель вимірів.

Щоб оптимізувати витрати на переміщення систем GPS - мережі спочатку визначають з топографічної карти витрати на переміщення між точками, на яких виконують виміри. Результати закладають у матрицю транспортних витрат, яка є квадратичною і симетричною (табл. 1). На перетині відповідного i -того стовпця та j -того рядка матриці знаходять величину витрат на переміщення з i -тої точки до j -тої. Витрати вираховуються у грошовому виразі, одиницях часу, або відстані.

Визначають скорочений ряд послідовності виконуваних сесій вимірів з оптимально необхідних сесій за рахунок їх додаткової інформативності. Постановлену задачу розв'язують способом динамічного програмування. Цільова функція має вигляд

$$\sum_{i=1}^n C(J_i, J_{i+1}) = \min_{J_i \in N_n, J=1,2} \quad (12)$$

де N_n - остаточний ряд сесій (n -сесій), J_i - та сесія оптимального ряду сесій, $C(J_i, J_{i+1})$ - транспортні витрати між i -тою та $i+1$ - сесіями ряду J_n . Розв'язок залежності (12) знаходять так. Вибирають початкову сесію з ряду N_n (наприклад, N_1) і визначають наступну j -ту сесію з ряду N_n , яка відповідає

умові

$$C(N_i, N_j) = \min_{j=2,n} \quad (13)$$

ці сесії заносяться у ряд J_n , як J , наступну сесію визначають аналогічно.

Такій послідовності виконуваних сесій вимірів відповідає мінімум витрат на переміщення системи GPS.

Розташовують одночасно мінімум три системи GPS послідовно у визначених точках мережі. Точки, у яких потрібно розташовувати системи GPS, визначені при формуванні оптимально необхідних сесій вимірів.

Таблиця 1

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	0,000	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	1,000	1,414	2,236	3,162	4,123	5,099	2,000	2,236	2,828	3,606	4,472	5,385	0,707	4,743	3,162	5,000
2	1,000	0,000	1,000	2,000	3,000	4,000	1,414	1,000	1,414	2,236	3,162	4,123	2,236	2,000	2,236	2,828	3,606	4,472	0,707	3,808	3,000	4,243
3	2,000	1,000	0,000	1,000	2,000	1,000	2,236	1,414	1,000	1,414	2,236	3,162	2,828	2,236	2,000	2,236	2,828	3,606	1,581	2,915	3,162	3,606
4	3,000	2,000	1,000	0,000	1,000	2,000	3,162	2,236	1,414	1,000	1,414	2,236	3,606	2,828	2,236	2,000	2,236	2,828	2,550	2,121	3,606	3,162
5	4,000	1,000	2,000	1,000	0,000	1,000	4,123	3,162	2,236	1,414	1,000	1,414	4,472	3,606	2,828	2,236	2,000	2,236	3,536	1,581	4,423	3,000
6	5,000	4,000	3,000	2,000	1,000	0,000	5,099	4,123	3,162	2,236	1,414	1,000	5,385	4,472	3,606	2,828	2,236	2,000	4,528	1,581	5,000	3,162
7	1,000	1,414	2,236	3,162	4,123	5,099	0,000	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	1,000	1,414	2,236	3,162	4,123	5,099	1,581	4,528	2,236	4,472
8	1,414	1,000	1,414	2,236	3,162	4,123	1,000	0,000	1,000	2,000	3,000	4,000	1,414	1,000	1,414	2,236	3,162	4,123	1,581	3,536	2,000	3,606
9	2,246	1,414	1,000	1,414	2,236	3,162	2,000	1,000	0,000	1,000	2,000	3,000	2,236	1,414	1,000	1,414	2,236	3,162	2,121	2,550	2,236	2,828
10	1,162	2,246	1,414	1,000	1,414	2,236	3,000	2,000	1,000	0,000	1,000	2,000	3,162	2,236	1,414	1,000	1,414	2,236	2,915	1,581	2,828	2,236
11	4,124	3,162	2,236	1,414	1,000	1,414	4,000	3,000	2,000	1,000	0,000	1,000	4,123	3,162	2,236	1,414	1,000	1,414	3,808	0,707	3,606	2,000
12	5,099	4,124	3,162	2,236	1,414	1,000	5,000	4,000	3,000	2,000	1,000	0,000	5,099	4,123	3,162	2,236	1,414	1,000	4,743	0,707	4,472	2,236
13	2,000	2,236	2,828	3,606	4,472	5,385	1,000	1,414	2,236	3,162	4,123	5,099	0,000	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	2,550	4,528	1,414	4,123
14	2,236	2,000	2,236	2,828	3,606	4,472	1,414	1,000	1,414	2,236	3,162	4,123	1,000	0,000	1,000	2,000	3,000	4,000	2,550	3,536	1,000	3,162
15	2,828	2,236	2,000	2,236	2,828	3,606	2,236	1,414	1,000	1,414	2,236	3,162	2,000	1,000	0,000	1,000	2,000	3,000	2,915	2,550	1,414	2,236
16	3,606	2,828	2,236	2,000	2,236	2,828	3,162	2,236	1,414	1,000	1,414	2,236	3,000	2,000	1,000	0,000	1,000	2,000	3,536	1,581	2,236	1,414
17	4,472	3,606	2,828	2,236	2,000	2,236	4,123	3,162	2,236	1,414	1,000	1,414	4,000	3,000	2,000	1,000	0,000	1,000	4,301	0,707	3,162	1,000
18	5,385	4,472	3,606	2,828	2,236	2,236	5,099	4,123	3,162	2,236	1,414	1,000	5,000	4,000	3,000	2,000	1,000	0,000	4,148	0,707	4,123	1,414
19	0,707	0,707	1,581	2,550	3,536	4,528	1,581	1,581	2,121	2,915	3,808	4,743	2,550	2,550	2,915	3,536	4,301	5,148	0,000	4,472	3,536	4,950
20	4,741	3,808	2,915	2,121	1,581	1,581	4,528	3,536	2,550	1,581	0,707	0,707	4,528	3,536	2,550	1,581	0,707	0,707	4,472	0,000	3,808	1,581
21	3,162	3,000	3,162	3,606	4,243	5,000	2,236	2,000	2,236	2,828	3,606	4,472	1,414	1,000	1,414	2,236	3,162	4,123	3,536	3,808	0,000	3,000
22	5,000	4,243	3,606	3,162	3,000	3,162	4,472	3,806	2,828	2,236	2,000	2,236	4,123	3,162	2,236	1,414	1,000	1,414	4,950	1,581	3,000	0,000

Проводять виміри згідно інструкцій. Наприклад, центрують антени приймачів над точками мережі, які закріплені реперами, калібрують приймачі і т.д. Одержані результати вимірів заносяться у комп'ютер і згідно програми визначають положення точок на земній поверхні.

Переміщують системи GPS у точки мережі для проведення вимірів за визначеною схемою.

У табл. 2 приведено оптимальний послідовний ряд сесій, визначений згідно винаходу, якому відповідає мінімум витрат на переміщення системи GPS. Затрати на переміщення приймачів виражені в одиницях умовних витрат (у в.). Для переміщення системи GPS у виконуваних 12^{ти} сесіях необхідно витратити 37,618 одиниць у в.

У табл. 3 приведено розрахунок переміщення системи GPS у виконуваних сесіях за способом прототипом. Для переміщення систем GPS у тих же самих виконуваних 12^{ти} сесіях необхідно витратити 62,157 одиниць у в.

Таблиця 2

№ сесії	Приймачі			Затрати на переміщення приймачів у сесії (у в.)
	A	B	C	
1	1	3	6	3
2	1	2	4	3,65
3	1	7	8	2
4	1	13	9	2

5	1	14	15	3,915
6	1	21	19	7,301
7	1	22	17	3,65
8	1	18	6	4,576
9	10	11	6	2
10	16	12	6	1,707
11	17	20	6	3,817
12	4	5	6	
				Σ 37,618

Таблиця 3

№ сесії	Приймач А	Приймач В	Приймач С	Затрати на переміщення приймачів у сесії (у в.)
1	1	3	6	3
2	1	2	4	6,828
3	1	6	18	9,222
4	1	7	8	3,414
5	1	9	13	3,414
6	1	14	15	5,236
7	1	17	22	7,301
8	1	19	21	11,536
9	4	5	6	4,828
10	6	10	11	3,414
11	6	12	16	3,964
12	16	17	20	
				Σ 62,157