

TECHNIKA SIECI MODULARNYCH JAKO UNIWERSALNA METODA POMIARÓW SYTUACYJNO-WYSOKOŚCIOWYCH

Tadeusz Gargula

Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji Akademii Rolniczej w Krakowie

Katedra Geodezji

ul. Balicka 253A, Kraków

1. Wstęp

Na obecnym etapie rozwoju w zakresie sprzętu oraz metod pomiarów geodezyjnych, a także technik opracowania wyników, coraz mniej atrakcyjna (oraz mało praktyczna) w tym zakresie staje się tradycyjna wiedza „podręcznikowa”, zdobywana w szkołach czy na uczelniach geodezyjnych. Dodatkowo, co najmniej od kilkunastu lat obowiązują nas mocno nieaktualne instrukcje i wytyczne techniczne.

Abstrahując jednak od przyczyn takiej sytuacji, warto zwrócić uwagę na pewien naturalny kierunek zauważalny w praktyce geodezyjnej (tzw. „produkcji”), polegający na dostosowywaniu się technik pomiaru do aktualnych możliwości sprzętowych. Powszechnie stosowany jest np. pomiar sytuacyjno-wysokościowy szczegółów terenowych z równoczesnym pomiarem osnowy, bez wcześniejszego etapu projektowego. Instrument ustawiany jest w miejscu najdogodniejszym, a nie nad założonym punktem osnowy. Takie postępowanie jest jak najbardziej racjonalne i uzasadnione, bowiem stosowane instrumenty *total station* zapewniają uzyskanie odpowiednich wskaźników dokładności wyznażeń. W konstrukcjach pomiarowych tego typu można się dopatrywać pewnych elementów tzw. **sieci modularnych**, którym poświęcone były wytyczne techniczne G-4.1 (Wytyczne, 1986). Sieci te określane są przez Wytyczne jako „zbiór wzajemnie powiązanych konstrukcji zwanych modułami”. Pojedynczy moduł jest natomiast zbiorem obserwacji niezbędnych do wyznaczenia punktów pomierzonych na danym stanowisku.

Sieci modularne posiadają wiele praktycznych zalet, dających im przewagę nad sieciami klasycznymi. Jedną z nich jest szeroko pojęta elastyczność konstrukcji, rozumiana m.in. jako podatność na dostosowywanie do charakteru mierzonego obszaru, stosowanego sprzętu, sposobu opracowania wyników itp. Oprócz osnów pomiarowych, pewne elementy sieci modularnych mogą również znaleźć efektywne zastosowanie jako prosty sposób polepszenia wartości technicznej sieci precyzyjnych (w pomiarach przemieszczeń i odkształceń obiektów). Mogą być one także wykorzystane w tworzeniu osnów miejskich, gdzie istnieje podstawowy problem związany z niską trwałością znaków stabilizowanych naziemnie. Korzystnym rozwiązaniem byłyby w tej sytuacji punkty ściennie (jako tzw. punkty wiążące), służące do zakładania tarcz celowniczych.

2. Geneza zagadnienia

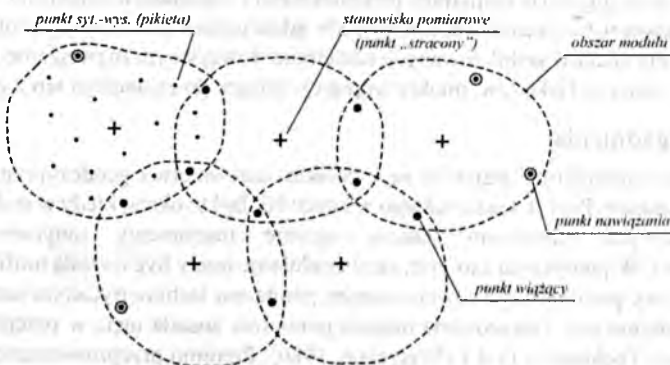
Pojęcie „sieci modularnej” pojawiło się w polskim nazewnictwie geodezyjnym w pracach zespołu pod kierunkiem Prof. J. Gaździckiego w latach 80. Był to okres, kiedy w technologiach pomiarów masowych stosowano jeszcze ogólnie instrumenty optyczne (tachimetry autoredukcyjne). W pierwszym zamyśle, sieci modularne miały być metodą unifikującą szybkie tworzenie osnowy pomiarowej z równoczesnym pomiarem tachimetrycznym szczegółów sytuacyjno-wysokościowych. Opracowana metoda pomiarów została ujęta w przepisach technicznych: Wytyczne Techniczne G-4.1 (Wytyczne, 1986). Pomimo przeprowadzenia w niektórych ówczesnych przedsiębiorstwach geodezyjnych (OPGK) specjalnych prób wdrożeniowych na

wybranych obiektach, metoda ta nie znalazła później szerszego zastosowania praktycznego. Jedną z istotnych barier był bowiem ograniczony dostęp do techniki komputerowej, jako istotnego składnika kosztu realizacji przedsięwzięcia. Tymczasem w opracowaniach pomiarów sytuacyjno-wysokościowych stosowano jeszcze wtedy dość powszechnie obliczenia manualne, wspomagane kalkulatorami. Ten system dotyczył również opracowania osnów pomiarowych, zakładanych typowo w postaci ciągów sytuacyjnych i wielorzędowych układów linii pomiarowych. Drugą przyczynę braku zainteresowania sieciami modularnymi można widzieć w samej merytorycznej części Wytycznych Technicznych G-4.1. Od wykonawcy wymagały one bowiem projektowania konstrukcji sieci (rozmieszczenie stanowisk i punktów wiążących, zachowania specjalnych wymogów geometrycznych) przy nieco trudniejszych (szerszych) uwarunkowaniach niż w przypadku technologii klasycznych, dobrze „wyuczonych”. Można więc powiedzieć, że wykonawca „dla świętego spokoju” wolał nie komplikować sobie tradycyjnego wyobrażenia o pomiarach geodezyjnych.

Idea geometryczna sieci modularnych ma podobieństwo do zadań fotogrametrii analitycznej, gdzie wyrównanie aerotriangulacji blokowej odbywa się poprzez jednoczesną transformację zdjęć lub modeli. Niektóre własności sieci modularnych wykorzystał prof. R. Kadaj do opracowania geodezyjnego systemu obliczeniowego GEONET (Kadaj 1995). Problematyka sieci modularnych była również tematem rozprawy doktorskiej autora (Gargula 1998). Konstrukcjami zbliżonymi do sieci modularnych („sieci o specjalnej strukturze”) zajmował się w swoich badaniach Kadaj (1975, 1978).

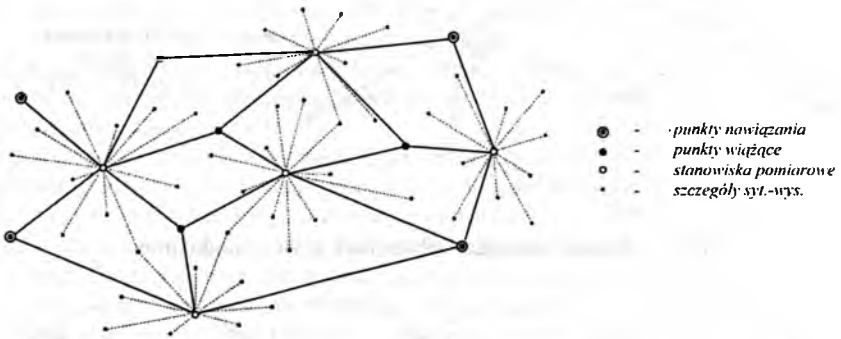
3. Struktura geometryczna i własności topologiczne sieci modularnych

Z pojęciem sieci modularnej wiążą się 4 typy punktów geodezyjnych. **Punkty nawiązania**, podobnie jak w innych typach sieci, definiują powiązanie sieci z układem współrzędnych. Z założenia mogą być one niedostępne jako stanowiska instrumentu. Mogą pełnić również funkcję **punktów wiążących**, których zadaniem jest powiązanie (połączenie) sąsiadujących ze sobą modułów. Punkty wiążące pełnią zwykle rolę punktów celowania, gdyż oznaczają one miejsce ustawienia sygnału dla pomiaru kierunku lub (i) odległości. **Stanowiska pomiaru biegunowego** mogą być traktowane jako punkty tymczasowe („stracone”), tzn. nie muszą być stabilizowane lub też mogą być oznaczane prowizorycznie w terenie jedynie na czas pomiaru. W tym sensie, stanowiska pomiaru biegunowego w sieciach modularnych upodabniają się funkcjonalnie do stanowisk niwelatora w ciągu niwelacyjnym. **Punkty sytuacyjne**, czyli punkty reprezentujące obiekt pomiaru, są również związane z samą strukturą sieci modularnej. Zgodnie z ideą sieci modularnych pomiar tych punktów odbywa się bowiem nierozłącznie z pomiarem osnowy.



Rys. 1. Ogólna struktura sieci modularnej

Na rys.1 przedstawiono w sposób symboliczny ogólną strukturę sieci modularnej, jako konstrukcji złożonej z powiązanych wzajemnie ze sobą pojedynczych modułów. Pary sąsiednich modułów zawierają punkty wiążące (wspólne). W sieciach powierzchniowych, jeden punkt wiążący jest zwykle punktem wspólnym dla większej liczby modułów, np. trzech. **Obszar modułu** wyznacza zbiór punktów wiążących oraz punktów sytuacyjnych podlegających pomiarowi na danym stanowisku. Moduły powiązane szeregowo ze sobą za pomocą par punktów wiążących tworzą tzw. **ciąg modularny**, który może być podstawą dla pomiaru obiektów o charakterze liniowym.



Rys. 2. Przykład powierzchniowej sieci modularnej

Zbiór pojedynczych, powiązanych ze sobą modułów tworzy powierzchniową sieć modularną (rys. 2). W praktyce, zakładana sieć modularna posiada zwykle kształt nieregularny, zależny od rozmieszczenia punktów wiążących i stanowisk względem siebie oraz względem szczegółów sytuacyjnych. Konstrukcja geometryczna nie może być jednak zupełnie przypadkowa; powinna ona odpowiadać podstawowym wymaganiom wyznaczalności oraz niezawodności realizowanej sieci.

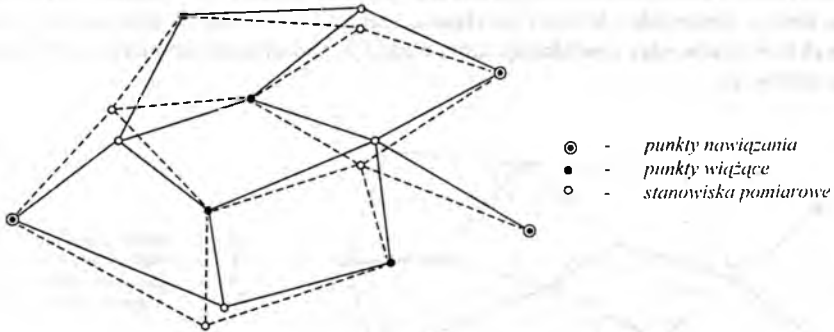
4. Elementy sieci modularnych: moduły jako quasi-observacje, ciągi modularne

Pojedyncze moduły, obejmujące pełny zestaw obserwacji biegunowych, mogą być traktowane jako pewnego rodzaju „quasi-observacje”. Pojedyncza quasi-observacja to w istocie zbiór obserwacji odległościowo-kątowych, który wiąże wszystkie punkty celowania na danym stanowisku. Podobnie, jak w klasycznej sieci (np. poligonowej) dokonuje się kilkukrotnego pomiaru długości lub kąta, tak w sieci modularnej nic nie stoi na przeszkodzie, aby każdą quasi-observację powtórzyć z zupełnie odmiennych stanowisk (rys. 3), przy czym za każdym razem, stanowiska mogłyby być traktowane jako punkty stracone (bez stabilizacji). Taki sposób postępowania zapewnia zwiększenie dokładności wyznaczenia punktów wiążących (Garguła 1998). Stanowiska pełniłyby w tym procesie rolę pośrednią.

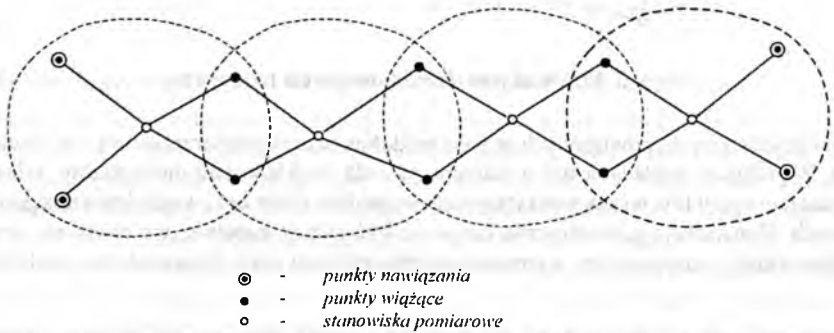
Sieć modularna zdefiniowana przez autorów Wytycznych Technicznych G-4.1 jest siecią powierzchniową o jednorodnej konstrukcji. W praktyce mogą być zakładane sieci innych typów, związane z konstrukcją modularną, lecz niekoniecznie o charakterze powierzchniowym czy o jednorodnej strukturze. Na rys. 4 przedstawiono przykładową postać tzw. **ciągu modularnego**, który należy traktować jako szczególny przypadek sieci modularnej (zob. Garguła 1995).

Określenie „ciąg modularny” jest propozycją nazwania konstrukcji złożonej z szeregu pojedynczych modułów, powiązanych ze sobą za pomocą par punktów wiążących. Standardowo, w skład modułu w ciągu modularnym wchodziłyby więc 2 pary punktów wiążących oraz stanowisko biegunowe. Nawiązanie ciągu modularnego następuje poprzez powiązanie modułu

początkowego i modułu końcowego z punktami osnowy wyższego rzędu. Punkty nawiązania zastępują w każdym z tych modułów jedną parę punktów wiążących. Ciąg modularny może być stosowany jako osnowa do pomiaru wąskiego wydłużonego pasa terenu lub obiektów o charakterze liniowym, np. drogi, linie kolejowe, ciekі itp.



Rys. 3. Powtórzenie quasi-observacji w sieci modularnej



Rys. 4. Ciąg modularny

5. Zagadnienia obliczeniowe

Opracowanie numeryczne sieci modularnych, według G-4.1, polega na przeprowadzeniu wyrównania transformacyjnego i analizie dokładności wyznaczanych punktów. Zaprezentowany tam algorytm pozwala na *przybliżone wyrównanie* sieci. Obecnie natomiast zalecane jest wyrównanie *ściśle* również dla osnów pomiarowych (Instrukcja G-4, 2002). Do tego celu potrzebne są jednak współrzędne przybliżone dla wszystkich punktów wyznaczanych. W przeszłości istotną barierą dla tego problemu był koszt (czas) obliczeń i z tego też względu zakładano relatywnie wysoką dokładność współrzędnych przybliżonych (do 20 cm) tak, aby wyrównanie sieci mogło się odbyć w jednym cyklu obliczeniowym. Obecnie przeprowadzanie całego procesu wyrównawczego przy każdorazowej aktualizacji współrzędnych przybliżonych, nie wiąże się już ze wzrostem kosztów obliczeń.

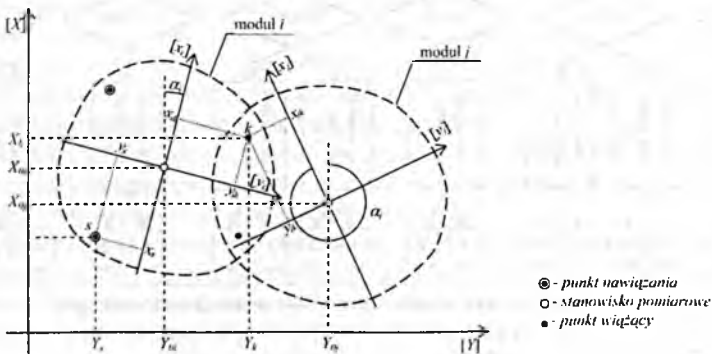
Zatem proces opracowania numerycznego sieci modularnych będzie się składał z dwóch etapów. Pierwszy etap obejmuje obliczenie *współrzędnych przybliżonych*, drugi zaś, *wyrównanie ściśle* metodą najmniejszych kwadratów. Konstrukcja układu równań poprawek zależna będzie od wymiaru sieci. W przypadku sieci modularnych możemy mieć do czynienia z wyrównaniem sieci płaskich (dwuwymiarowych) lub przestrzennych (trójwymiarowych). Sieci przestrzenne

możemy z kolei wyrównywać w dwóch niezależnych procesach: wyrównanie współrzędnych xy oraz wyrównanie różnic wysokości (jako sieci jednowymiarowych). Inna możliwość to jednoczesne wyrównanie całego układu obserwacyjnego sieci przestrzennej.

Modyfikacja koncepcji wyrównania transformacyjnego

Alternatywnym sposobem opracowania ścisłego (obok tradycyjnie stosowanej metody parametrycznej) sieci modularnej jest *wyrównanie transformacji wielogrupowej* według metody najmniejszych kwadratów. Wiąże się to z koniecznością modyfikacji klasycznej (Wytyczne, 1986) metody opracowania sieci modularnych. Zadanie związane z wyznaczeniem parametrów transformacji modułów (2 parametry translacji i 1 parametr obrotu dla każdego modułu) oraz poprawek do bezpośrednich obserwacji kierunków i długości, sprowadza się do ogólnego problemu nieliniowego wyrównania obserwacji zawarunkowanych z niewiadomymi metodą najmniejszych kwadratów (Gargula 2002).

Idea wyrównania transformacyjnego sieci modularnych została przejęta z aerotriangulacji analitycznej, gdzie opracowanie zdjęć odbywa się na zasadzie transformacji wielogrupowej modeli (Wytyczne 1984). Metoda klasyczna opracowania sieci modularnych (G-4.1) bazuje na znanych wzorach transformacji liniowej. Problematyka opracowania sieci modularnych wiąże się z transformacją wielogrupową, polegającą na jednoczesnym przetworzeniu współrzędnych wielu grup punktów (pojedynczych modułów) do układu wspólnego. Każdy moduł ma określone współrzędne w swoim układzie lokalnym, a układem docelowym jest układ globalny określony przez punkty stałe sieci. Dla dowolnej sieci modularnej możemy określić model funkcjonalny prowadzący do układu równań warunkowych z niewiadomymi. Wielkości niewiadome w tym układzie to parametry transformacji (różne dla każdego modułu). Przy założeniu pełnej wyznaczalności wewnętrznej modułu (znane wszystkie długości celowych) wyszczególnić można 2 rodzaje warunków: na punkty wiążące oraz na punkty nawiązania (zob. rys. 5).

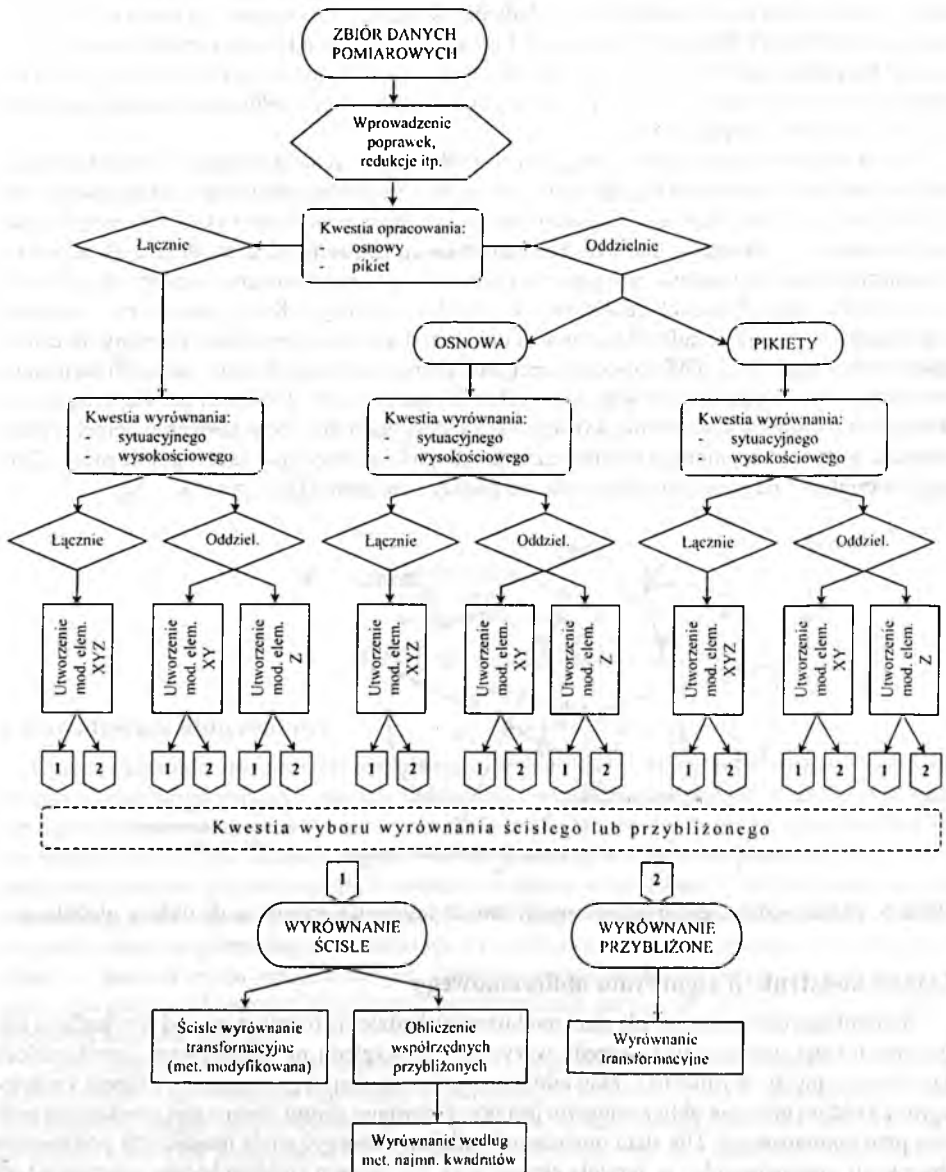


Rys. 5. Zasada jednoczesnej transformacji dwóch sąsiednich modułów do układu globalnego

Zasada konstrukcji algorytmu obliczeniowego

Metodologia obliczeniowa dla sieci modularnych będzie się różniła nieco od przypadków tradycyjnych sieci geodezyjnych, przede wszystkim ze względu na zastosowanie przekształceń transformacyjnych. Wynika to z faktu odmienności konstrukcji tego typu sieci. Etapem wyjściowym w każdym procesie obliczeniowym jest przygotowanie zbioru obserwacji uzyskanych podczas prac pomiarowych. Dla sieci modularnej będziemy tworzyć wiele mniejszych podzbiorów obserwacji, stanowiących tzw. moduły elementarne. Następnym krokiem będzie połączenie tych modułów w jedną całość na zasadzie transformacji wielogrupowej. Uzyskane w ten sposób

współrzędne przybliżone umożliwiają wyrównanie ściśle obserwacji, co daje możliwość precyzyjnego wyznaczenia punktów sieci. Metodologia obliczeniowa to nie tylko kwestia wyrównania ściślego lub przybliżonego. Istotne znaczenie ma tutaj wiele innych czynników, np. podział sieci na płaskie i przestrzenne, zagadnienie obliczenia pikiet (łącznie z siecią lub oddzielnie), typy stworzonych modułów elementarnych dla sieci sytuacyjno-wysokościowych (moduły przestrzenne lub płaskie i wysokościowe) itp. Schemat przedstawiony na rys. 6 pokazuje wiele różnych możliwości konstruowania algorytmu obliczeniowego.



Rys. 6. Schemat konstrukcji algorytmu opracowania sieci modularnej

6. Podsumowanie i uwagi końcowe

— Istotną cechą praktyczną sieci modularnej (w odniesieniu do konstrukcji klasycznych) jest mniejsza czasochłonność prac terenowych. Odpada konieczność stabilizacji punktu oraz centrowania instrumentu w czasie pomiaru (stanowiska pomiarowe nie muszą być oznaczane w terenie).

— Punkty wiążące mogą być wykorzystywane w dalszych pomiarach (np. pomiar uzupełniający). Punkty te mogą służyć również jako repery robocze osnowy wysokościowej. Szczególnie przydatne praktycznie (ze względu na dostępność do pomiaru i trwałość) mogą być punkty stabilizowane na ścianach budowli (punkty oporowe) lub jednoznacznie sygnalizowane wieże, maszty, itp.

— Dokładność położenia punktów, a także globalna niezawodność sieci, jest wyższa niż w innych stosowanych konstrukcjach sieci pomiarowych (wyższa redundancja).

— Pozorną wadą jest duża ilość obserwacji i złożoność konstrukcji. Pomiar odbywa się jednak tylko na punktach będących stanowiskami, a ich położenie istotne jest jedynie na czas pomiarów. W przeciwieństwie do klasycznych osnow geodezyjnych, położenie stanowiska obserwacyjnego *free station* może być wybierane najdogodniej na czas pomiarów.

— W celu podniesienia wartości technicznej (głównie w sensie dokładności wyznaczeń), proponuje się wprowadzać dodatkowe quasi-observacje. Polega to na powtarzaniu obserwacji biegunowych (lub tylko kierunkowych) na dodatkowym, dowolnie obranym stanowisku.

— Alternatywną formą realizacji sieci pomiarowych mogą być tzw. ciągi modułarne, zastosowane do pomiaru obszarów o charakterze liniowym (drogi, linie kolejowe, ciekі itp.).

— Zbiór obserwacji uzyskanych na pojedynczym stanowisku można traktować jako tzw. quasi-observację. Powtarzanie quasi-observacji na kolejnych niezależnych stanowiskach (dowolnie wybieranych) powoduje zmniejszenie błędu średniego obserwacji, czyli w rezultacie, wzrost dokładności wyznaczenia punktów sieci. Takie rozwiązanie może być propozycją polepszenia struktury sieci realizacyjnych lub sieci szczegółowych III klasy.

— Podczas pomiaru, do sieci przestrzennych należy włączać także punkty niedostępne dla pomiaru odległości. Odpowiednie elementy geometryczne, niezbędne do wyznaczenia ich współrzędnych xyz można uzyskać przez zastosowanie wcięcia przestrzennego. Nie wiąże się to z koniecznością zakładania dodatkowych stanowisk pomiarowych.

— Wyrównanie sieci modularnej i pomiarów „masowych” (opracowanie szczegółów terenowych) proponuje się przeprowadzać oddzielnie przy użyciu dostępnego powszechnie sprzętu komputerowego i odpowiednich programów obliczeniowych.

— Dla wyznaczenia współrzędnych punktów sieci (płaskiej lub przestrzennej) zaleca się stosować wyrównanie ścisłe (metodą najmniejszych kwadratów), jako sieci jednorzędowej, przy założeniu stałości punktów nawiązania. Obliczenie współrzędnych przybliżonych można uzyskać według algorytmu opartego na przekształceniach transformacyjnych. Algorytm taki powinien uwzględniać możliwość istnienia modułów elementarnych niewyznaczalnych wewnętrznie (np. z powodu braku niektórych odległości).

— Ścisłe opracowanie wyników pomiaru sieci modularnej można zrealizować także poprzez rozwiązanie układu równań warunkowych z niewiadomymi, utworzonego dla transformowanych punktów wiążących oraz punktów stałych. Współrzędne przybliżone uzyskuje się wówczas automatycznie w pierwszym etapie wyrównania.

Streszczenie

W zakresie pomiarów sytuacyjno-wysokościowych kończy się już epoka układów linii pomiarowych i wielorzędowych ciągów sytuacyjnych, natomiast nowoczesna metoda RTK GPS

znajduje zastosowanie jeszcze wciąż w niewielkiej skali. Pojawia się luka, którą wypełnić może metoda sieci modularnych, dostosowana do możliwości technicznych powszechnie dostępnych instrumentów typu *total-station*. Niniejsze opracowanie jest pewnym rozwinięciem koncepcji zawartych w istniejących wytycznych G-4.1 (1986). Poruszona jest problematyka dotycząca zakładania, pomiaru oraz opracowania numerycznego sieci modularnych.

Abstract

Modular networks technology as a universal method of the point by point surveys

The time of using the surveying lines and multi-order polygonal traverses within the scope of the point by point survey goes to an end. However, the modern method of RTK GPS is still not widely used. So there is a gap, which can be filled up with the modular networks method, adapted to technical abilities of contemporary instruments *total station* type. Presented study is an extension of the conception included in technical rules G-4.1 (1986). The paper deals with establishing, measuring and numerical computation of modular networks.

Tadeusz Gargula, Department of Geodesy, Agricultural University of Kraków.

Literatura

- Gargula T. 1995. Zastosowanie ciągów modularnych do pomiarów sytuacyjnych. Zeszyty Naukowe AR. Kraków, Sesja Naukowa z. 44, 33-41.
- Gargula T. 1998. Badania nad określeniem kryteriów technicznej poprawności oraz zasad konstruowania pomiarowych sieci modularnych. Rozprawa doktorska - maszynopis, AR-T Olsztyn.
- Gargula T. 2003. Algorithm for rigorous adjustment of modular networks. Geodezja i Kartografia, Warszawa, z.3, 144-152.
- Instrukcja Techniczna G-3. 1981. Geodezyjna obsługa inwestycji. Warszawa.
- Instrukcja Techniczna G-4. 2002. Pomiary sytuacyjne i wysokościowe. Warszawa.
- Kadaj R. 1975. Sieci geodezyjne poziome o specjalnej strukturze obserwacyjnej. Geodezja i Kartografia, z. 3, s. 249-255. Warszawa.
- Kadaj R. 1978. Sieci geodezyjne o specjalnej strukturze - c.d. Geodezja i Kartografia, s. 185-196. Warszawa.
- Kadaj R. 1995. Metodologia obliczeniowa osnów geodezyjnych. System geodezyjny GEONET (maszynopis), Kraków - Rzeszów.
- Lazzarini T. i inni 1990. Geodezja: Geodezyjna osnowa szczegółowa. PPWK, Warszawa
- Wytyczne Techniczne G-1.8. Aerotriangulacja analityczna. 1984. Warszawa.
- Wytyczne Techniczne G-4.1. Sieci modularne. 1986. Warszawa.

Recenzował: dr inż. Marek Plewako