

ANALIZA BŁĘDÓW GENEROWANYCH PODCZAS POMIARU SZCZEGÓŁÓW SYTUACYJNYCH METODĄ GPS RTK

Kamil Kowalczyk

Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Olsztyn

Streszczenie. Celem niniejszej pracy jest opisanie źródeł błędów mających lub mogących mieć wpływ na jakość wyznaczenia współrzędnych szczegółów sytuacyjnych podczas pomiaru metodą GPS RTK z punktu widzenia użytkownika. Źródła błędów podczas pomiaru szczegółów sytuacyjnych można podzielić na dwie grupy. Pierwsze to te, na które jako użytkownik systemu nie mamy wpływu. Do tej grupy można zaliczyć m.in. błędy wynikające z samej dokładności działania GPS, a także te związane z zastosowaniem metody pomiaru, np. RTK. Do drugiej grupy błędów można zaliczyć te, które powstają podczas właściwego pomiaru takie jak: nieprostokątność tyczki, niecentryczne jej ustawienie nad mierzonym szczegółem, zły dobór punktów wpasowania na istniejącą osnowę itp. W pracy omówiono szczegółowo przyczyny powstawania błędów należących do obu grup, oceniono ich wpływ na ostateczną wartość współrzędnych oraz opisano możliwości ich ograniczenia lub eliminacji.

Słowa kluczowe: pomiary szczegółów sytuacyjnych i wysokościowych, GPS RTK, punkt niedostępny, błędy RTK

WSTĘP

Aby wykonać bądź zaktualizować mapę zasadniczą lub mapę ewidencyjną, należy w terenie pomierzyć szczegóły sytuacyjne. Metody pomiaru tych szczegółów zmieniały się wraz z rozwojem technik pomiarowych. Pierwsze metody opierały się na pomiarach liniowych (taśma i węgielnica), pomiarach kątowno liniowych z użyciem teodolitów i dalmierzy kreskowych. Wraz z rozwojem i miniaturyzacją podzespołów elektronicznych pojawiły się elektroniczne nasadki na dalmierze, a w rezultacie instrumenty geodezyjne typu *total station* zawierające w sobie moduły pomiarowe i obliczeniowe. Obecnie coraz popularniejszą metodą pomiaru szczegółów sytuacyjnych jest metoda GPS RTK.

Szczegóły sytuacyjne ze względu na specyfikę pomiaru metodą RTK można podzielić na dwie grupy. Pierwszą grupę stanowią szczegóły, nad którymi bezpośrednio w terenie

można postawić tyczkę z odbiornikiem GPS i wykonać pomiar. Drugą grupę stanowią szczegóły, do których nie ma bezpośredniego dostępu lub nie można nad nimi postawić tyczki z odbiornikiem (np. latarnia). Są to tak zwane punkty niedostępne. Opis metod pomiaru niedostępnych punktów sytuacyjnych metodą RTK można znaleźć np. w pracach Beluch i Krzyżek [2005], Kowalczyk i Węgliński [2010].

Celem niniejszej pracy jest omówienie jak największej liczby błędów mających wpływ na ostateczne współrzędne wyznaczone metodą GPS RTK oraz określenie możliwości ich eliminacji lub ograniczenia ich wpływu.

BŁĘDY WYNIKAJĄCE Z DZIAŁANIA SYSTEMU GPS

Podstawą wyznaczania pozycji i czasu w GPS są odległości anteny odbiornika od satelitów mierzone jako odcinek czasu, w którym sygnał radiowy przebywa drogę satelita–antena. Według wzoru (1) odcinek, w którym sygnał przebywa drogę od satelity do odbiornika, można przedstawić jako sumę trzech składników [Narkiewicz 2003]:

$$\Delta t_c = \Delta t_p + \Delta t_z + \Delta t_b \quad (1)$$

gdzie:

- czas potrzebny na przebycie drogi odbiornik–satelita,
- błąd zegara odbiornika, jest to różnica pomiędzy czasem wskazanym przez odbiornik i czasem GPS,
- błędy systemu.

Składnik pierwszy i drugi są niewiadomymi w równaniu pozycji. Natomiast na składnik trzeci składa się szereg błędów wynikających z działania systemu. Można je podzielić na błędy:

- propagacji sygnału i nieskompensowane efekty relatywistyczne,
- wynikające z działania segmentów kosmicznego i naziemnego,
- powstające w odbiornikach.

W pracy pominięto opis tych błędów ze względu na wszechstronne ich omówienie w literaturze [Narkiewicz 2003, Hofmann-Wellenhof i in. 2000, Lamparski 2001, El-Rabbany 2002].

ŹRÓDŁA BŁĘDÓW I ICH WPŁYW NA DOKŁADNOŚĆ POMIARÓW SZCZEGÓŁÓW SYTUACYJNYCH METODĄ GPS RTK

Do tej grupy błędów można zaliczyć błędy, które są generowane (lub mogą być) podczas właściwego pomiaru.

Podczas pomiarów szczegółów sytuacyjnych powstaje szereg błędów, które ogólnie można sklasyfikować według następującego podziału: błędy wynikające z braku staranności pomiarowej, błędy wynikające z zastosowanej konstrukcji geometrycznej w trakcie pomiaru metodami pośrednimi oraz błędy wynikające z wykorzystania lub niewykorzystania dodatkowego pomiaru punktów wiążących użytych w procesie transformacji z układu satelitarnego na układ płaski lub wysokościowy. Ogólnie, powyższe błędy można zapisać w postaci wzoru (2) [Kowalczyk 2011a]:

$$m_p^2 = m_{pb}^{RTK^2} + m_{dk}^w{}^2 + m_j^2 \quad (2)$$

gdzie:

m_p – błąd wyznaczenia współrzędnych punktu, m_{pb}^{RTK} – błąd wyznaczenia współrzędnych szczegółów sytuacyjnych względem istniejącej osnowy (punktów bazowych – pomiar metodami pośrednimi), m_{dk}^w – wewnętrzna dokładność konstrukcji pośredniej, – błąd wynikający z braku staranności pomiarowego.

W przypadku pomiarów bezpośrednio nad punktem błąd m_{dk}^w jest pomijany.

Do poszczególnych grup błędów wyznaczenia współrzędnych punktu metodą GPS RTK zaliczamy błędy:

- wynikające z wyznaczenia współrzędnych punktów względem istniejącej osnowy geodezyjnej,
- wynikające z braku staranności osoby wykonującej pomiary,
- wynikające z wewnętrznej konstrukcji geometrycznej (metody pośrednie).

BŁĘDY WYNIKAJĄCE Z WYZNACZENIA WSPÓLRZĘDNYCH WZGLĘDEM ISTNIEJĄCEJ OSNOWY GEODEZYJNEJ

Rodzaj użytej stacji referencyjnej

Metoda RTK jest to metoda kinematyczna z jednoczesnym wyznaczeniem pozycji odbiornika w czasie rzeczywistym. Proces wyznaczenia pozycji przebiega w zestawie ruchomym (Odbiornik GPS + kontroler lub zestaw zintegrowany), do którego informacje ze stacji bazowej docierają drogą radiową albo przez Internet (GPRS). Zaletą tej metody jest natychmiastowe wyznaczenie pozycji odbiornika ruchomego. Można wyróżnić pomiary RTK z użyciem własnej stacji bazowej lub też z użyciem stacji wirtualnej. Prezentowane poniżej informacje zaczerpnięto ze strony www.asgeupos.pl.

W pierwszym wariantcie informacje przesyłane są drogą radiową, natomiast pozycja wyznaczana jest z dokładnością $\pm 1 \div 2 \text{cm} + 2 \text{ppm} \cdot S$ w przypadku składowych horyzontalnych i około $\pm 3 \text{cm} + 2 \text{ppm} \cdot S$ w odniesieniu do składowej wysokościowej. Ograniczeniem jest w tym przypadku zasięg radia uzależniony od jego jakości oraz ilości przeszkód terenowych (pagórki, las, budynki itp.). Zasięg radia można poprawić poprzez stosowanie dodatkowej anteny ze wzmacniaczem.

W drugim wariantcie poprawki RTK przesyłane są poprzez Internet z Centrum Zarządzania. Centrum Zarządzania otrzymuje dane obserwacyjne z sieci stacji permanentnych, które spełniają rolę stacji bazowej, a następnie wysyła gotowe informacje do odbiornika. Rodzaj informacji wysyłany do odbiornika uzależniony jest od wyboru przez użytkownika rodzaju poprawek: FKP i MAC (powierzchniowe RTK) lub VRS (z Wirtualnej Stacji Referencyjnej). Wielką zaletą tego rozwiązania jest możliwość użycia tylko jednego odbiornika (Rovera), gdyż rolę stacji bazowej spełnia system Centrum Zarządzania. Odległości pomiędzy stacjami permanentnymi mogą wynosić nawet kilkadziesiąt kilometrów. Wadą tej metody jest konieczność dostępu do Internetu poprzez GPRS. Zdarza się, że nie wszyscy operatorzy telefonii komórkowej mają taki sam zasięg w tym samym miejscu kraju. Receptą na brak zasięgu od jednego operatora jest zmiana karty GSM na kartę innego operatora (przyp. Autora).

W Polsce w ramach systemu ASG-EUPOS do obliczeń i wysyłania poprawek utworzony został serwis czasu rzeczywistego NAWGEO, w którym poprawki wysyłane są w następujących formatach: RTCM (2.3 i 3.1), RTCM FKP (2.3), RTCM VRS (2.3 i 3.1). Może się zdarzyć, iż w danym momencie pomiaru nie otrzymujemy poprawek z tego serwisu w wybranym formacie, wówczas najlepszym rozwiązaniem jest wybranie innego formatu przesyłanych danych.

Dokładność wyznaczenia pozycji z użyciem poprawek powierzchniowych wynosi: $\pm 1 \div 2 \text{ cm} + 2 \cdot \text{ppm} \cdot S$ w odniesieniu do składowych horyzontalnych i około $\pm 3 \text{ cm} + 2 \cdot \text{ppm} \cdot S$ w przypadku składowej wysokościowej.

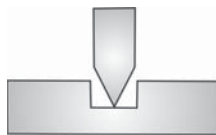
Błąd pomiaru punktów dostosowania w celu wpasowania w układ płaski, wynikający z niecentryczności ustawienia tyczki nad punktem oraz stabilności tyczki

Podczas pomiarów szczegółów sytuacyjnych metodą RTK, szczególnie w układzie 65, należy wykonać pomiar przynajmniej 4 punktów osnowy geodezyjnej traktowanych jako punkty dostosowania w procesie transformacji współrzędnych GPS na współrzędne płaskie w układzie 65 (Wytyczne techniczne G-1.12 2008). Podczas takiego pomiaru należy ustawić tyczkę centrycznie nad punktem osnowy i wykonać pomiar. Pomiar powinien trwać około 30 s. W trakcie tego pomiaru tyczkę należy trzymać pionowo nad punktem. Na jakość pomiaru współrzędnych wpływa stabilność tyczki, wielkość przewagi libelli pudełkowej zamocowanej na tyczce, a także odległość odbiornika GPS zamontowanego na górze tyczki do znaku geodezyjnego. Błąd wynikający z niepionowości ustawienia tyczki na punktem jest trudny do oszacowania. Zależy on w głównej mierze od warunków terenowych (silny wiatr, deszcz, temperatura) oraz użytej libelli pudełkowej (rektyfikacja), a także od jakości jej zamontowania na tyczce.

Jakość centrowania można poprawić poprzez stałą kontrolę techniczną libelli, pomiar w warunkach korzystnych do utrzymania tyczki w pionie lub też stosowania podpórek w przypadku pomiarów w warunkach niekorzystnych.

Błąd pomiaru punktów dostosowania w celu wpasowania w układ wysokościowy

O ile wpływ pionowości tyczki na wyznaczenie współrzędnej x i y może mieć znaczenie, o tyle podczas pomiarów punktów dostosowania w celu wpasowania w układ wysokościowy wpływ ten jest minimalny. Błąd wpasowania może powstać w wyniku nieprawidłowego ustawienia tyczki nad znakiem geodezyjnym (rys. 1).



Rys. 1. Nieprawidłowe ustawienie tyczki nad punktem o znanej wysokości

Fig. 1. Improper survey rod placement over the point with known height

Powstały w wyniku takiego ustawienia tyczki błąd jest rzędu od 1 cm (kamień z krzyżem) do 4 cm (kamień z rurką). Aby zapobiec powstawaniu tego rodzaju błędów, można zastosować dwa rozwiązania. Pierwsze polega na pomiarze przy ustawionej tyczce na punkcie, ale nie na jego środku. Natomiast drugi wymaga zastosowania specjalnej podstawki pod tyczkę geodezyjną (rys. 2).



Rys. 2. Podstawka do tyczki geodezyjnej (rozwiązanie własne autora)
Fig. 2. Survey rod stand (author's design)

Dokładność wyznaczenia współrzędnych punktów bazowych (pomiar pośredni)

Aby ocenić wpływ błędów wyznaczenia współrzędnych punktów bazowych podczas obserwacji niedostępnych do bezpośredniego pomiaru szczegółów sytuacyjnych, autor przeprowadził pomiary na obiektach testowych [Kowalczyk 2011a]. Poniżej zamieszczono jedynie opis wyników końcowych.

Podczas pomiaru punktów bazowych w układzie 65 istnieje bezwzględna konieczność pomiaru punktów dostosowania na istniejącą osnowę geodezyjną, jeżeli wyznaczeniu podlegają szczegóły 1 i 2 grupy dokładności (średni błąd wyznaczenia pozycji punktu bazowego względem osnowy wyniósł 4 cm). Zastosowane rozwiązanie matematyczne (bez punktów dostosowania) powoduje jego przydatność jedynie do pomiaru szczegółów sytuacyjnych trzeciej grupy dokładnościowej (średni błąd wyznaczenia pozycji punktu bazowego względem osnowy wyniósł 30 cm).

Podczas pomiaru punktów bazowych w układzie 2000 średni błąd wyznaczenia pozycji punktu bazowego z uwzględnieniem punktów dostosowania względem osnowy geodezyjnej wyniósł 2 cm. Natomiast zastosowanie rozwiązań matematycznych spowodowało zwiększenie tego błędu do 3 cm.

Z przeprowadzonych analiz [Kowalczyk 2011a] wynika, że przy wykorzystaniu metod pośrednich pomiaru punktów niedostępnych (metoda wcięć liniowych) może być zastosowana metoda wyznaczenia punktów bazowych w układzie 1965 tylko z wpasowaniem na istniejącą osnowę geodezyjną. W przypadku układu 2000 można wykorzystać oba sposoby, tj. z punktami dostosowania lub też z rozwiązań matematycznych. We wszystkich trzech wariantach błąd położenia punktu bazowego względem osnowy nie może przekroczyć wartości 9 cm.

BŁĘDY WYNIKAJĄCE Z BRAKU STARANNOŚCI MIERNICZEGO

Błąd pomiaru szczegółu sytuacyjnego „płaskiego”

Na wielkość tego błędu wpływają pionowość tyczki nad punktem oraz jej stabilność. Ze względu na to, iż pomiar nad szczegółem sytuacyjnym trwa tylko kilka sekund, błąd ten przyjmuje minimalne wartości. Oczywiście najważniejsza jest tu staranność mierniczego.

Błąd pomiaru szczegółu sytuacyjnego „wypukłego”

Błąd ten występuje podczas pomiarów inżynierskich, np. pomiar linki stalowej wyznaczającej poziom masy jezdnej, inwentaryzacja przewodów sieci uzbrojenia terenu itp. Wynika on z samej trudności ustawienia tyczki w najwyższym punkcie np. rury kanalizacyjnej oraz jej pionowego i stabilnego utrzymania. Wielkość tego błędu zależy od staranności mierniczego. Aby błąd ten zminimalizować, można stosować widelki korekcyjne (rys. 3) pomagające ustabilizować tyczkę na rurze (lince).



Rys. 3. Widelki korekcyjne (rozwiązanie własne autora)

Fig. 3. Correction fork (author's design)

BŁĄD WYNIKAJĄCY Z POMIARU ODLEGŁOŚCI RĘCZNYM DALMIERZEM LASEROWYM

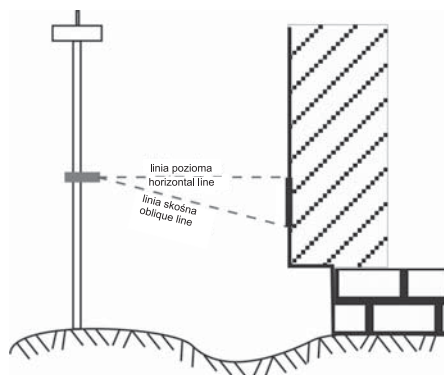
Na błąd wynikający z pomiaru ręcznym dalmierzem laserowym składa się pięć czynników:

- niepoziome usytuowanie ręcznego dalmierza laserowego,
- kąt, pod jakim mierzona jest odległość w stosunku do ściany budynku,
- grubość ocieplenia budynku,
- pionowe ustawienie tyczki, na której zamocowany jest ręczny dalmierz laserowy,
- rodzaj materiału, z jakiego wykonany jest szczegół sytuacyjny (materiał budowlany).

Niepoziome usytuowanie ręcznego dalmierza laserowego

Wpływ na pomiar odległości ręcznym dalmierzem laserowym na jego poziome usytuowanie (rys. 4).

W tabeli 1 zaprezentowano przykładowe przedziały, w jakich można celować na ścianę, aby różnica odległości pomiędzy linią poziomą i skośną nie była większa niż 1 cm. Przedstawione wyniki ograniczają się tylko do odległości 10 metrów od punktu mierzonego, gdyż większe odległości rzadko wykorzystuje się w praktyce. Przedział celowania obliczono z twierdzenia Pitagorasa.



Rys. 4. Pionowy przedział celowania
Fig. 4. Vertical targeting range

Tabela 1. Przykładowe przedziały celowania podczas pomiaru ręcznym dalmierzem laserowym
Table 1. Sample aiming ranges during handheld rangefinder measurement

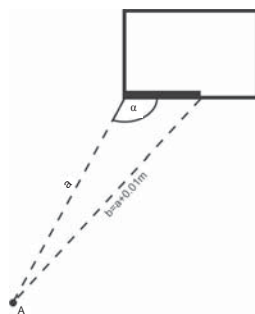
Długość linii poziomej D [m] (length of the horizontal line D)	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Pionowy przedział celowania [m] (Vertical targeting range)	0,45	0,42	0,40	0,37	0,35	0,32	0,28	0,24	0,20	0,14

Z tabeli 1 widać, iż podczas pomiaru odległości ręcznym dalmierzem laserowym wraz ze wzrastającą odległością celowania rośnie także przedział celowania. Podczas pomiaru odległości 1 m przedział ten wynosi 14 cm, natomiast przy odległości 10 m wzrasta do 45 cm.

Zmniejszenie wpływu niepoziomego usytuowania ręcznego dalmierza laserowego można osiągnąć poprzez stosowanie dodatkowej libelli rurkowej sprzężonej z dalmierzem lub też używanie ręcznych dalmierzy laserowych z wbudowanym inklinometrem korygującym niepoziome usytuowanie osi dalmierza.

Wpływ kąta pod jakim mierzona jest odległość w stosunku do ściany budynku

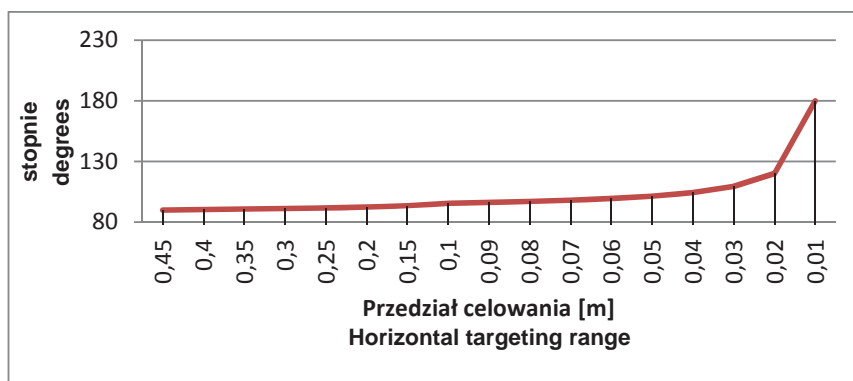
Obliczenie pionowego przedziału celowania nie stanowi problemu, gdyż z reguły ściany budynku są pionowe. Inna sytuacja występuje w przypadku poziomego przedziału celowania (rys. 5). Dlatego też zamiast obliczać poziomy przedział celowania, przyjęto kilka wariantów tego przedziału, a skupiono się na zależności pomiędzy kątem celowania α , poziomym przedziałem celowania oraz mierzoną odległością. Wartości graniczne kąta α przyjęto jako 90° i 180° . Maksymalny poziomy przedział celowania przyjęto jako 45 cm zmniejszający się co 5 cm, natomiast odległości od ściany budynku przyjęto od 1 m do 10 m ze zmianą co 1 m. Założono także, iż różnica pomiędzy teoretyczną odległością od ściany budynku a odległością zmierzoną nie może przekroczyć wartości 1 cm. Do obliczenia wartości kąta α wykorzystano twierdzenie cosinusów.



Rys. 5. Poziomy przedział celowania

Fig. 5. Horizontal targeting range

Po przeprowadzeniu obliczeń okazało się, iż różne odległości od ściany w przypadku tych samych poziomych przedziałów celowania dają bardzo podobne wartości kąta α . Dlatego też na rysunku 6 pokazano tylko zmianę kąta α w zależności od zmieniającego się poziomego przedziału celowania.

Rys. 6. Zmiana wartości kąta α w zależności od przedziału celowaniaFig. 6. Change in the α angle in dependency from targeting range

Kąt α zmienia się w granicach od 90° do 100° , gdy przedział celowania wynosi od 0,45 do 5 cm, natomiast przy przedziale celowania od 5 do 1 cm zmiana ta postępuje bardzo gwałtownie. Odwracając rozumowanie i uzależniając zmianę poziomego przedziału celowania od zmiany kąta α , można stwierdzić, iż największy poziomy przedział celowania otrzymamy, gdy kąt α wynosi 90° .

Wpływ izolacji cieplnej budynku

Podczas pomiaru odległości od punktu bazy wyznaczonego metodą GPS RTK ręcznym dalmierzem laserowym na błąd określenia odległości do właściwego narożnika ma także grubość izolacji cieplnej budynku. Jak pokazano na rysunku 4, ręczny dalmierz laserowy umieszczony jest zazwyczaj na specjalnej podstawie połączonej z tyczką na wysokości około 1,2 metra (w zależności od wysokości pomiarowego). Według instrukcji K1 na mapach wykazuje się położenie budynku zgodnie z położeniem jego przyziemia.

Wykonując pomiar do ocieplonej ściany, mierzone są odległości do ściany, a nie do przyziemia budynku. Dlatego też należy przed pomiarem zmierzyć grubość ocieplenia wystającą poza przyziemie i uwzględnić ją w obliczeniach. Nieuwzględnienie tej grubości może powodować zwiększenie błędu wyznaczenia współrzędnych naroża przyziemia, co przy różnicy 5 cm daje błąd od 8 cm w przypadku kąta 90° do 11 cm w odniesieniu do kąta 45° (135°). Pomijając fakt grubości ocieplenia i nałożenia się także innych błędów podczas pomiaru, wyznaczenie współrzędnych naroża budynku może przekroczyć dopuszczalny błąd położenia szczegółu I grupy (dokładność 10 cm).

Podobnie jak wyżej należy postąpić przy pomiarze punktu niedostępnego, jakim jest podpora (latarni, podcienia itp.), uwzględniając jej promień.

Błędy ze względu na rodzaj materiału, z jakiego zrobiony jest szczegół sytuacyjny

Aby ocenić błąd, jaki powstaje podczas pomiaru odległości ręcznym dalmierzem laserowym, autor przeprowadził szereg testów [Kowalczyk 2011b]. Otrzymane wyniki wykazały, iż maksymalny błąd wynikający z rodzaju materiału budowlanego wynosi 9 mm – styropian biały. Błędy w odniesieniu do pozostałych materiałów wahały się od 1 do 6 mm. Można więc wysunąć wniosek, iż materiał, z jakiego zrobiony jest szczegół sytuacyjny, nie ma znaczącego wpływu na dokładność pomiaru odległości ręcznym dalmierzem laserowym, o ile materiał ten całkowicie nie odbija promienia (lustro, powierzchnia wypolerowana) (www.riegl.com) lub go przepuszcza (szyba).

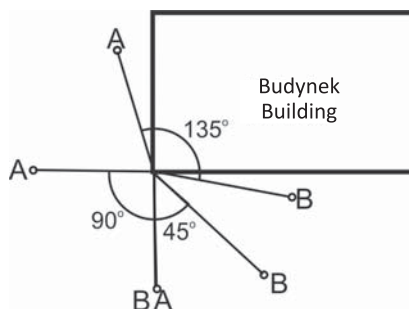
Automatyczny przesył pomierzonej długości ręcznym dalmierzem laserowym do kontrolera

Podczas przepisywania pomierzonej odległości mogą wystąpić pomyłki (błędy grubo) – w zasadzie nie do wykrycia przy pomiarze pojedynczego szczegółu sytuacyjnego. Dlatego też najlepszym rozwiązaniem jest automatyczny przesył pomierzonej wartości do kontrolera. Większość ręcznych dalmierzy laserowych wyposażona jest w złącze Bluetooth, umożliwiając komunikację z komputerem. Niestety, nie wszystkie dalmierze współpracują z kontrolerami innych firm.

Inne czynniki mające wpływ na usytuowanie punktów bazowych podczas pomiaru punktu niedostępnego

Innymi czynnikami wpływającymi na usytuowanie punktów bazowych podczas pomiaru punktu niedostępnego są między innymi założenia planistyczne, zaistniała sytuacja terenowa czy dostępność wystarczającej liczby satelitów. O ile na terenach o rozproszonej zabudowie lub we wsiach gminnych nie powinno być problemu z doбором odpowiedniej konstrukcji, o tyle na terenach silnie zurbanizowanych istnieją przeszkody wynikające m.in. z wielkości działek, zabudowy szeregowej, szerokości chodnika, bliskości jezdni. W miastach są także miejsca, gdzie budynki usytuowane są na granicy działek, wówczas dobór konstrukcji wycięcia jest ograniczony poprzez np. szerokość chodnika.

Punkty niedostępne, mierzone metodą wycięć, to najczęściej szczegóły terenowe I i II grupy dokładności takie jak: narożniki budynków i obiekty podobne (cieplarnie, rampy, podpory), latarnie, ogrodzenia, drzewa, krzaki. Na terenach wiejskich budynki rzadko przewyższają ilość dwóch, trzech kondygnacji. Na terenach miejskich, szczególnie w większych aglomeracjach, występuje zwarta zabudowa wysoka. Na rysunku 7 pokazano usytuowanie punktów bazowych względem narożnika budynku (punktu wcinanego).



Rys. 7. Usytuowanie punktów bazowych względem naroża budynku na potrzeby określenia wpływu przysłony terenowej

Fig. 7. Placement of base points along building corner for the purpose of obstacle determination

Biorąc pod uwagę tylko usytuowanie punktów bazowych ze względu na przysłony terenowe (mierzone naroża budynku), najlepszym rozwiązaniem jest umiejscowienie punktów bazowych tak, aby horyzont od strony południowej był jak najbardziej odkryty. Takie założenie wymusza stosowanie małych kątów wcinających lub też zamianę konstrukcji wcięcia liniowego na konstrukcję przedłużenia prostej.

Obecność urządzeń elektrycznych, nadajników

Podczas pomiarów wykonywanych blisko urządzeń wytwarzających pole elektromagnetyczne może ono powodować zakłócenia, które wpłyną na ostateczną jakość otrzymanych współrzędnych. W pracy [In-Su Lee, Linlin Ge 2006] można znaleźć wyniki prób przeprowadzonych pomiarów w pobliżu masztów wysokiego napięcia. Błąd średni otrzymany na podstawie wyników przyjął wartość $\pm 0,05$ m. Wielkość wpływu urządzeń elektrycznych na jakość pomiaru przyjmuje przypadkowe wielkości, których nie jesteśmy w stanie wyeliminować bez ponownego pomiaru. Tak więc zaleca się, aby wykonywać pomiary RTK z dala od tych urządzeń.

BŁĘDY WYNIKAJĄCE Z WEWNĘTRZNEJ KONSTRUKCJI POŚREDNIEJ

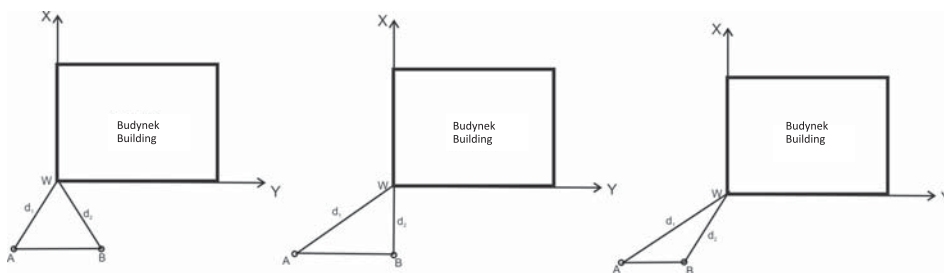
Metody pośrednie pomiaru szczegółów w trybie RTK opierają się na zastosowaniu metod znanych od lat. Należą do nich: metoda wcięcia liniowego, metoda przedłużenia prostej, metoda przecięcia prostych, metoda domiarów prostokątnych.

W metodzie klasycznej punktami bazowymi były punkty osnowy pomiarowej lub szczegółowej albo punkty na linii pomiarowej. W metodzie RTK wybór położenia punktów bazowych jest w zasadzie dowolny w zależności od dostępności satelitów i sytuacji terenowej.

Błędy przy wyznaczeniu współrzędnych punktu niedostępnego metodą wcięć liniowych

Pomiar szczegółu z punktów bazowych metodą wcięcia liniowego polega na wyznaczeniu położenia punktu na podstawie pomierzonych odległości dalmierzem laserowym, np. DISTO lub ruletką między wyznaczanym punktem a punktami o znanym położeniu (punktami bazowymi).

Wcięcie liniowe do punktu niedostępnego można rozważyć w trzech przypadkach ukazanych na rysunku 8 [Beluch i Krzyżek 2005].



Rys. 8. Różne warianty rozmieszczenia punktów bazowych w przypadku wcięcia liniowego
Fig. 8. Different variants of base points placement while linear back section survey

Jeżeli odległości do punktu niedostępnego pomierzone zostały z tym samym błędem $m_1 = m_2 = m$, to wzór na obliczenie błędu średniego położenia punktu wcinanego przyjmie postać wzoru (3) (wytyczne techniczne G-4.1):

$$Mp = \pm \frac{m\sqrt{2}}{\sin(\alpha)} \quad (3)$$

gdzie: α jest kątem przy punkcie niedostępnym W.

Z powyższego wzoru wynika, iż na dokładność wyznaczenia współrzędnych punktu wcinanego W mają wpływ dwa czynniki: błąd pomiaru długości oraz wielkość kąta wcinanego α (przy punkcie wcinanym W). Im sinus kąta wcinanego α jest bliższy wartości 1, tym kąt ma mniejszy wpływ na wartość błędu średniego. W tabeli 2 pokazano wartości błędu średniego w zależności od dokładności pomiaru oraz wartości kąta wcinanego. Błąd pomiaru ręcznym dalmierzem laserowym przyjęto jako 0,3 cm.

Tabela 2. Kształtowanie się wartości błędu średniego punktu niedostępnego w zależności od wielkości błędu pomiaru odległości i kąta wcinanego

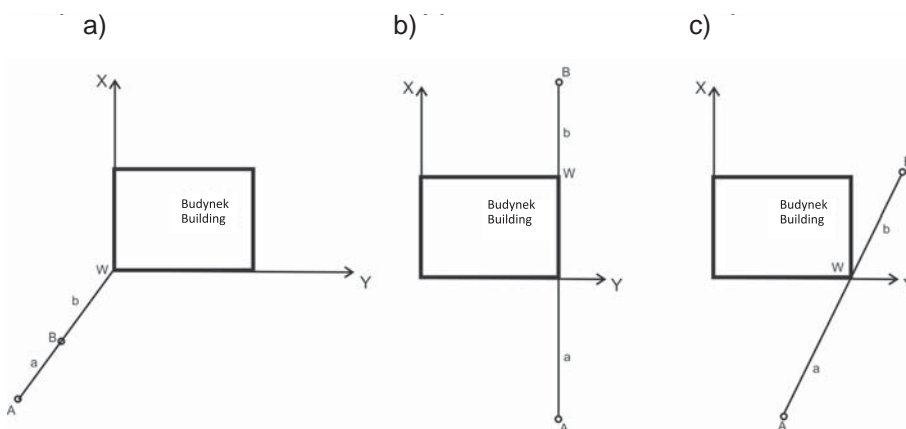
Table 2. The size of mean error of unavailable point in dependency from the size of angle and distance measurement errors

Kąt wcinany Size of angle	Wartość błędu średniego punktu niedostępnego The size of mean error of unavailable [cm]
90°	0,4
45° lub 135°	0,6
22,5° lub 157,5°	1,1
Kąt graniczny (2,5° lub 177,5°)	9,8

Kąt graniczny obliczono z założeniem, iż maksymalny błąd średni Mp może osiągnąć wartość 10 cm [instrukcja techniczna G-4].

Błędy przy wyznaczeniu współrzędnych punktu sytuacyjnego metodą przedłużenia

Na rysunku 9 pokazano przykłady zastosowania pomiaru punktu sytuacyjnego niedostępnego metodą przedłużenia prostej. Współrzędne punktu A zostały wyznaczone techniką GPS RTK. Problemem w tym rozwiązaniu pomiarowym jest wpasowanie punktu B na prostą AW.



Rys. 9. Wyznaczenie współrzędnych punktu niedostępnego metodą przedłużenia prostej
Fig. 9. Determination of coordinates of unavailable point with extension method

Współrzędne narożnika w metodzie przedłużenia prostej mogą być obliczane z następujących wzorów (4), (5):

$$X_W = X_A + (a + b) \cos A_{AB} \quad (4)$$

$$Y_W = Y_A + (a + b) \sin A_{AB} \quad (5)$$

Na wyznaczenie współrzędnych punktu W mają wpływ: odległość pomiędzy punktami A, B i B, W – ich wzajemny stosunek [Cederholm and Jensen 2009] oraz jakość tyczenia punktu B (rys. 9).

Wpływ wzajemnych odległości pomiędzy punktami A, B i B, W

Opis wpływu wzajemnych odległości pomiędzy punktami A, B i B, W można znaleźć w pracy Cederholm i Jensen [2009]. Poniżej przedstawiono wzór [Cederholm and Jensen 2009], który mówi o wpływie długości boków na błąd średni m_k w kierunku linii AW.

$$m_k = \sqrt{2 \left(\frac{d_{BW}}{d_{AB}} \right)^2 + 2 \frac{d_{BW}}{d_{AB}} + 1} \quad (6)$$

Ze wzoru (6) wynika, iż kwadrat wielomianu zależy od stosunku wartości d_{BW} do wartości d_{AB} . Im odległość d_{AB} jest większa do d_{BW} , to błąd m_k jest mniejszy.

Aby poprawić jakość mierzenia, należałoby tak sytuować punkty bazy, by stanowiły przedłużenie ściany budynku, w ten sposób osoba dokonująca pomiar będzie miała stałe punkty odniesienia.

Błąd średni wyznaczenia położenia punktu niedostępnego

Błąd średni położenia punktu niedostępnego przy użyciu metody przedłużeń przyjmie postać wzoru (7) [Beluch i Krzyżek 2005]:

$$Mp = \sqrt{(\sin^4 A_{AB} + \cos^4 A_{AB})m_n^2 + m_d^2} \quad (7)$$

gdzie:

m_n – błąd średni pokrycia naroży budynku przy wyznaczeniu kierunku ściany (cm),

m_d – błąd pomiaru długości.

W tabeli 3 pokazano przykładowe błędy średnie położenia punktu W, przyjmując za błąd średni pomiaru odległości dalmierzem laserowym 3 mm.

Tabela 3. Błąd średni M_p położenia punktu W dla pomiaru punktu niedostępnego metodą przedłużeń prostych

Table 3. Mean error M_p of point W surveyed with line extension method

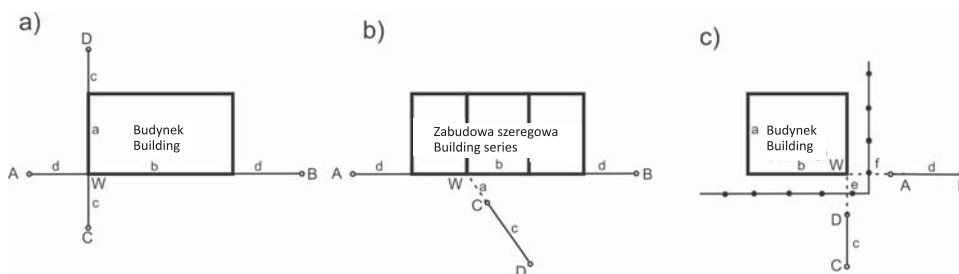
Błąd średni pokrycia naroży budynku przy wyznaczeniu kierunku ściany m_n [cm] Mean error of building corners cover during determination of wall direction m_n [cm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M_p [cm] (Azymut 45° lub 135°)	1	1	2	3	4	4	5	6	6	7
M_p [cm] (Azymut 90° lub 180°)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Na rysunku 10b pokazano inną konstrukcję stosowaną w metodzie przedłużeń prostej. W tym przypadku w odniesieniu do obu punktów A i B należy uwzględnić błąd tyczenia. Wzór (8) na kwadrat błędu średniego przyjmie postać [Beluch i Krzyżek 2005]:

$$M^2_{PW1} = \left[\left(a \frac{\sin 2A_{AB}}{2d_{AB}} \right)^2 + \left(\frac{d_{AB} - a \sin^2 A_{AB}}{d_{AB}} \right)^2 \right] m^2_{XA} + \left[\left(\frac{a \sin 2A_{AB}}{2d_{AB}} \right)^2 + \left(\frac{d_{AB} - a \cos^2 A_{AB}}{d_{AB}} \right)^2 \right] m^2_{YA} + \left(\frac{a \sin A_{AB}}{d_{AB}} \right)^2 m^2_{XB} + \left(\frac{a \cos A_{AB}}{d_{AB}} \right)^2 m^2_{YB} + m^2_a \quad (8)$$

Błędy przy wyznaczeniu współrzędnych punktu niedostępnego metodą przecięć

Metoda przecięć prostych [Kowalczyk i Węgliński 2010] polega na pomiarze punktów znajdujących się na przedłużeniu ścian budynku (rys. 10). Wpływ na umiejscowienie poszczególnych punktów pomiarowych ma głównie jakość wyznaczenia kierunku. Zakładając, iż budynek jest prostokątem, możemy wyliczyć błąd wyznaczenia kierunku, posługując się wzorami na przecięcie dwóch prostych oraz prawem przenoszenia się błędów.



Rys. 10. Określenie współrzędnych punktu niedostępnego metodą przecięć prostych
Fig. 10. Determination of coordinates of unavailable point with intersection method

Aby policzyć błędy średnie współrzędnych X_w i Y_w wyznaczenia punktu niedostępnego, można posłużyć się następującymi wzorami (9), (10) [Beluch i Krzyżek 2005] (rys. 10a):

$$m^2 X_w = \left[\frac{(X_C Y_D - Y_C X_D) - Y_B (X_D - X_C)}{(Y_B - Y_A)(X_D - X_C)} \right]^2 m^2 X_A + \left[\frac{(X_D Y_C - Y_D X_C) + Y_A (X_D - X_C)}{(Y_B - Y_A)(X_D - X_C)} \right]^2 m^2 X_B \quad (9)$$

$$m^2 Y_w = \left[\frac{(X_B Y_A - Y_B X_A) - X_D (Y_B - Y_A)}{(Y_B - Y_A)(X_D - X_C)} \right]^2 m^2 Y_A + \left[\frac{(X_A Y_B - Y_A X_B) + X_C (Y_B - Y_A)}{(Y_B - Y_A)(X_D - X_C)} \right]^2 m^2 Y_D \quad (10)$$

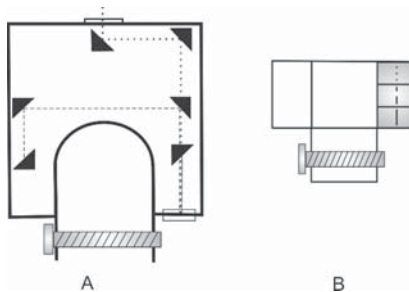
Sumując błędy średnie współrzędnych X_w i Y_w , otrzymamy kwadrat błędu średniego położenia punktu W. W tabeli 4 pokazano obliczone błędy średnie położenia punktu w dwóch przypadkach. Zgodnie z instrukcją G4 długość przedłużona nie może być dłuższa niż połowa linii przedłużanej, dlatego też rozpatrzono dwa warianty. W pierwszym wariantcie: $b=a$, $c=1/2a$, $d=1/2a$, natomiast w drugim wariantcie przyjęto iż: $b=2a$, $c=1/2a$, $d=a$.

Tabela 4. Błąd średni wyznaczenia kierunku ściany Mp w metodzie przecięć
Table 4. Mean error of the wall direction Mp in the intersection method

Błąd pokrycia naroży budynku przy wyznaczeniu kierunku ściany [cm] Mean error of building corners cover during determination of wall direction m_n [cm]	1	2	3	4	5	6
Mp [cm] wariant pierwszy – The first variant	1,7	3,4	5,0	6,7	8,4	10,01
Mp [cm] wariant drugi – The second variant	1,7	3,4	5,0	6,7	8,4	10,01

Należy zauważyć, iż ta metoda dobrze sprawdzi się w przypadku budynków o większych długościach ścian. Natomiast w odniesieniu do budynków o długości ścian 2, 3, 4, 5 metrów (np. suszarnie do płodów rolnych) może nie dawać dobrych rezultatów, gdyż mierniczy musi stać blisko budynku, co wpływa na błąd ustawienia się osoby wykonującej pomiar na przedłużeniu ściany budynku.

Aby poprawić jakość tyczenia punktów bazy, można zastosować do tego celu urządzenie optyczne np. w postaci węgielnicy. Aby uniknąć jednoczesnego trzymania węgielnicy oraz tyczki z odbiornikiem GPS, można zastosować węgielnicę mimośrodową (rys. 11.)



Rys. 11. Węgielnica mimośrodowa (A – schemat działania, B – rzut z przodu), opracowanie własne autora

Fig. 11. Eccentric prism (A – working outline, B – front view), author's own work

Konstrukcja węgielnicy mimośrodowej z zastosowaniem kilku pryzmatów umożliwia obserwowanie obiektów znajdujących się po lewej i prawej stronie oraz obiektu wytyczonego bądź rzutowanego na prostą. Węgielnica jest tak zaprojektowana, aby można ją było przymocować do tyczki geodezyjnej, tak by środek węgielnicy pokrywał się ze środkiem tyczki. Promienie przebiegają wewnątrz węgielnicy, omijając przeszkodę, jaką jest tyczka geodezyjna. Przy rzutowaniu punktu na powierzchnię terenu zamiast pionu sznurkowego wykorzystywana jest tyczka geodezyjna. Położenie węgielnicy na tyczce można dostosować do wysokości osoby dokonującej pomiaru.

PODSUMOWANIE

Podczas pomiarów szczegółów sytuacyjnych metodami GPS RTK spotykamy się z różnorodnością błędów mających ostateczny wpływ na jakość otrzymanych współrzędnych tych szczegółów: błędy wynikające z wyznaczenia współrzędnych punktów względem istniejącej osnowy geodezyjnej, błędy wynikające z braku staranności pomiarowej, błędy wynikające z wewnętrznej konstrukcji geometrycznej (metody pośrednie). W głównej mierze ocenę jakości współrzędnych trzeba rozpatrywać z punktu widzenia aktualizacji mapy zasadniczej z już naniesionymi innymi szczegółami pomierzonymi w zadanym układzie współrzędnych. Źródła błędów powstających podczas pomiaru mogą mieć różnorodny charakter, ale z reguły nie przekraczają wartości kilku centymetrów. Jednak brak staranności w pomiarze lub nieuwzględnienie wpływu niektórych błędów może spowodować fakt przekroczenia dokładności wyznaczonych współrzędnych względem istniejącej osnowy geodezyjnej (dobór warunków odpowiadających metodzie pośredniej podczas pomiarów punktów niedostępnych). Szczególnie jest to ważne w przypadku pomiaru szczegółów sytuacyjnych pierwszej i drugiej grupy dokładności. Niektóre błędy można zminimalizować, stosując zaproponowane w artykule rozwiązania techniczne (widelki korekcyjne, dodatkowe urządzenie optyczne).

Na podstawie przeprowadzonych analiz można wysnuć następujące wnioski szczegółowe:

1. Aby zwiększyć jakość wpasowania w istniejący układ geodezyjny, należy wyka-
zać się starannością przy ustawianiu tyczki geodezyjnej nad mierzonym punktem osnowy
oraz dokonywać takiego wpasowania w korzystnych warunkach atmosferycznych. Ko-
niecznie stosować to wpasowanie podczas pomiarów w układzie 1965.

2. Podczas pomiaru szczegółów sytuacyjnych płaskich utrzymywać tyczkę z odbior-
nikiem stabilnie, natomiast mierząc szczegóły wypukłe lub cienkie, wykorzystać widelki
korekcyjne pozwalające na centryczne ustawienie tyczki nad takim punktem.

3. Stosując do pomiaru odległości ręczny dalmierz laserowy, należy kontrolować jego
poziome usytuowanie, a także tak dobierać usytuowanie punktów bazowych, aby pomiar
odbywał się pod kątem zbliżonym do 90 stopni. Przesył danych z ręcznego dalmierza
laserowego do kontrolera powinien odbywać się w sposób automatyczny. W przypadku
pomiaru budynków ocieplonych uwzględniać szerokość zastosowanego ocieplenia, wy-
konując dodatkowy jego pomiar.

4. Punkty bazowe (metoda pośrednia pomiaru) powinny znajdować się możliwie od
południowej strony horyzontu. Miejsca pomiaru tych punktów powinny być tak dobrane,
aby w pobliżu nie znajdowały się urządzenia wytwarzające pole elektromagnetyczne,
a także by nie występowały inne przeszkody przysłaniające horyzont.

5. Jako metodę pośredniego pomiaru szczegółów sytuacyjnych należy stosować me-
todę wcięcia liniowego. W przypadku wyboru innej metody dobrze jest użyć dodatkowe-
go urządzenia celowniczego (np. zaproponowanej w pracy węgielnicy mimośrodowej).

PIŚMIENNICTWO

- Beluch J., Krzyżek R., 2005. GPS RTK technology used for indirect methods of topographical
surveys, Technical Sciences, Supplement No 2, UWM Olsztyn.
- Cederholm P., Jensen K., 2009. GPS Measurement of inaccessible detail points, Survey Review.
41, 314, 352–363.
- El-Rabbany A., 2002. Introduction to GPS, The Global Positioning System Artech House, Boston.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., 2000. GPS Theory and Practice. Fifth revised
edition. Springer-Verlag Wien, New York.
- In-Su Lee, Linlin Ge, 2006. The performance of RTK-GPS for surveying under challenging envi-
ronmental conditions, Earth Planets Space, 58, 515–522.
- Instrukcja techniczna G-4 1983. Pomiary sytuacyjne i wysokościowe.
- Instrukcja techniczna K-1 1998. Mapa zasadnicza.
- Kowalczyk K., Węgliński R., 2010. Analiza przydatności metod pomiaru szczegółów sytuacyjnych
w technologii GPS RTK, Przegląd Geodezyjny, 9/2010, 3–9.
- Kowalczyk K., 2011a. Ocena przydatności pomiaru punktów niedostępnych metodą GPS RTK
z uwzględnieniem błędów punktów bazowych. Przegląd Geodezyjny, w druku.
- Kowalczyk K., 2011b. Badanie wpływu materiałów budowlanych na dokładność pomiaru długości
ręcznym dalmierzem laserowym. Przegląd Geodezyjny, 6/2011.
- Lamparski J., 2001. Nawstar GPS od teorii do praktyki UWM Olsztyn.
- Narkiewicz J., 2003. Globalny System Pozycjonowania GPS, Wydawnictwo Komunikacji
i Łączności, Warszawa.
- Wytyczne techniczne G-1.12, 2008. Pomiary satelitarne oparte na systemie precyzyjnego pozyc-
jonowania ASGEUPOS (Projekt z dnia 1.03.2008 r. z poprawkami).
- www.riegl.com/...pxpriegldownloads/General-Information-Distancemeter.pdf

ANALYSIS OF THE ERRORS GENERATED DURING THE MEASUREMENT OF SITUATIONAL DETAILS RTK GPS METHOD

Abstract. The goal of this paper is to describe the error sources that may have influence on the accuracy of the determination of the terrain detail whittle GPS RTK survey from the user's point of view. The error sources can be divided in two groups. First, independent from user. This may be GPS system positioning error, or specific technique errors. Second group of errors are those, which are caused by the user: lack of rod perpendicularity, bad centering of rod, wrong choice of points used for transformation. The above errors are described in this paper with the ways to avoid them or at least minimize their effect.

Key words: Point Out, errors RTK, measurements of high and situational details

Accepted for print – Zaakceptowano do druku: 30.03.2011

For citation – do cytowania: Kowalczyk K., 2011. Analiza błędów generowanych podczas pomiaru szczegółów sytuacyjnych metodą GPS RTK. *Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr.* 10(1), 5–22.