ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2007
Seria: GÓRNICTWO z. 278 Nr kol. 1752

Łukasz ORTYL, Tomasz OWERKO
Akademia Górniczo – Hutnicza, Kraków

KOREKTA WPŁYWU DENIWELACJI TERENU ORAZ CZĘSTOTLIWOŚCI WYZNACZENIA POZYCJI PRZEZ SYSTEM GNSS LUB TACHYMETRY TCA W PROCESIE PRZESTRZENNEJ LOKALIZACJI OBJEKTÓW WYKRYWANYCH GEORADAREM

Streszczenie. Niniejszy artykuł przedstawia zagadnienie uwzględniania odpowiednich korekt, które podnoszą dokładność pozycjonowania obiektów podpowierzchniowych wykrywanych georadarem pozycjonowanym systemem GPS lub tachymetrem typu TCA. Korekty te wynikaj z konieczności uwzględniania prędkości prowadzenia pomiarów, częstotliwości wyznaczenia pozycji przez system geodezyjny oraz deniwelacji terenu wzdłuż linii profilowej w procesie wyznaczenia współrzędnych obiektów podpowierzchniowych. Omówiono metodykę badań i zaprezentowano wyniki prac doświadczalnych, które pozwoliły ustalić rzeczywisty wpływ i dokładność lokalizacji pozycji obiektów podpowierzchniowych z uwzględnieniem tych korekt w przypadku typowej prędkości przesuwu anten georadarowych. Zaprezentowano również zagadnienie dostosowania instrumentów typu TCA do prowadzenia ruchu anteny GPR i wymiany informacji z systemem GAMAC/GPR firmy Mala Geoscience.

THE CORRECTION OF AREA'S DROP AND FREQUENCY OF DETERMINING A POSITION BY THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM OR TCRA TOTAL STATIONS IN THE PROCESS OF SPATIAL LOCALISATION OF THE OBJECTS DETECTED BY A GEORADAR

Summary. The article presents the issue of taking into account certain corrections which icrease the precision while positioning undersurface objects detected by the GPS or total station, type TCRA. Those corrections stem from the the crucial need of considering the speed of measurements, the frequency of determining a position by the geodetic system and the area's drop along the profile line in the process of fixing the undersurface objects coordinates . Not only has the surveying methodology been discussed but the results of the experimental research has been presented as well. Those results made it possible to calculate the real influence and the precision of udersurface objects' localisation when taking into account those corrections (in the situation of the typical velocity of a georadar aerial's shift). Last but not least, the problems of the type TCA instruments' adjustment to leading the movement of a GPR as well as the information exchange with the GAMAC/GPR system (Mala Geoscience) have been introduced.

1. Wprowadzenie

Współczesne systemy georadarowe ze względu na swój cyfrowy charakter umożliwiają gromadzenie dużych ilości informacji. Dzięki temu możliwe jest prowadzenie pomiarów o charakterze „globalnym", poprzez realizacje profili o znacznej długości, pokrywające rozleglejszy obszar terenu. Tak uzyskane dane georadarowe dostarczają dodatkowej informacji geoprzestrzennej, która sprowadzona do układu współrzędnych umożliwia połączenie z innymi danymi gromadzonymi, np. w Systemach Informacji Przestrzennej, i podnosi możliwości poprawnej interpretacji analizowanych zjawisk. Warunki terenowe występujące na rozległym obszarze zazwyczaj nie pozwalają na prowadzenie profilowań prostoliniowych i równoległych. Dodatkowo pomiary georadarowe niejednokrotnie realizowane są na obszarze o pewnych deniwelacjach terenu, a znajomość zmian wysokości terenu ma znaczenie w przypadku dokładności lokalizacji obiektów i w zakresie interpretacji uzyskanych wyników georadarowych. W przypadku realizacji takich pomiarów klasyczny sposób określania pozycji oparty jedynie na pomiarze na kółko zliczające georadaru okazuje się niewystarczający i uniemożliwia poprawną przestrzenną lokalizację wykrywanych obiektów i struktur podpowierzchniowych. Zawsze istnieje możliwość realizacji takich pomiarów wraz z markowaniem w terenie punktów początkowych, końcowych oraz punktów zmian kierunku przebiegu profilu, a następnie ich pomiar metodami geodezyjnymi wraz z pomiarem deniwelacji terenu. Jednak dwuetapowy sposób realizacji pomiarów jest czasochłonny zarówno na etapie pozyskania danych geodezyjnych, jak również podczas postprocessingu danych georadarowych. Alternatywę może stanowić pomiar jednoetapowy, gdzie dane georadarowe pozyskiwane są przy równoczesnym wyznaczaniu i rejestracji pozycji anteny GPR poprzez system GPS w trybie RTK [9]. Natomiast w przypadku braku możliwości stosowania technik satelitarnych wykorzystane mogą być tachymetry typu TCA, posiadające opcję automatycznego rozpoznawania celu (ATR) [3]. Producenci aparatury georadarowej stwarzają na poziomie software'u możliwości jednoczesnego gromadzenia pomiarów georadarowych i geodezyjnych. Jednak w zakresie rozwiązań standardowych nie oferują zintegrowanego systemu, umożliwiającego techniczne połączenia tych dwóch technik i synchronizacji uzyskanych danych pomiarowych. Właściwe rozwiązanie tych zagadnień jest o tyle ważne, że przekłada się na dokładność określenia pozycji przestrzennej struktur i obiektów lokalizowanych georadarem. Propozycję fizycznego połączenia systemów pomiarowych omówiono w publikacji [2], prezentując autorski zestaw, który umożliwia umieszczenie nad anteną georadarową szwedzkiej firmy Mala GeoScience anteny systemu

GPS lub pryzmatu dalmierczego w sposób współosiowy. Przeprowadzone pomiary testowe wykazały brak znaczących zniekształceń wyników pomiarów GPS i GPR uzyskiwanych tym zestawem, które mogłyby wystąpić ze względu na wzajemne sąsiedztwo tych dwóch systemów pomiarowych [6] i [7]. W publikacji [5] przedstawiono wstępne wyniki pomiarów doświadczalnych, które pozwoliły zweryfikować poprawność pracy i gromadzenia informacji przez przygotowany zestaw w warunkach terenowych. Omówiono w niej zagadnienie synchronizacji pomiarów georadarowych i geodezyjnych pozyskanych systemem GPS w trybie RTK. Wstępne wyniki oceny dokładności wskazały na występowanie czynnika systematycznego, który kształtuje dokładność określenia pozycji lokalizowanych obiektów. Analiza procesu poboru danych georadarowych i geodezyjnych wskazała na konieczność uwzględniania wpływu: prędkości prowadzenia pomiarów, częstotliwości wyznaczenia pozycji przez system geodezyjny oraz deniwelacji terenu wzdłuż linii profilowej w procesie wyznaczenia współrzędnych obiektów podpowierzchniowych.

Niniejszy artykuł przedstawia szerokie studium tego zagadnienia. Przedstawiono w nim zależności matematyczne, które umożliwiają korekcje uzyskanych współrzędnych i częściową eliminację wpływu tych czynników na dokładność pomiaru. Omówiono metodykę badań i zaprezentowano wyniki prac doświadczalnych, które pozwoliły ustalić rzeczywistą dokładność lokalizacji pozycji obiektów podpowierzchniowych z uwzględnieniem omówionych korekt. Do wyznaczania pozycji anteny radarowej wykorzystano system GPS SR 500 firmy Leica i tachymetr TCRA 1102. W procesie akwizycji danych wykorzystano firmowe oprogramowanie Ground Vision wersja 1.4.3. Wymiana informacji pomiędzy systemem GPS a RAMAC/GPR jest stosunkowo prosta i omówiono ją w pozycji [5]. Użycie tachymetrów wymagało dodatkowych prac techniczno–informatycznych, które zaprezentowano w jednym z rozdziałów niniejszego artykułu.

2. Wyznaczenie współrzędnych obiektów podpowierzchniowych na podstawie pomiarów systemem GPR – GPS i GPR – tachymetr samonaprowadzający

Wyznaczenie współrzędnych obiektów podpowierzchniowych przy zastosowaniu pozycjonowania anteny GPR systemem GPS i tachymetrem typu TCA jest procesem złożonym. Do podstawowych etapów wyznaczenia pozycji przestrzennej obiektu podpowierzchniowego należy:

- nawiązanie pomiarów geodezyjnych do wymaganego układu współrzędnych,
- wykonanie pomiarów georadarowych i geodezyjnych zintegrowanym systemem (otrzymuje się radargram i plik ze współrzędnymi geodezyjnymi śladów),
- interpolacja współrzędnych,
- korekcja wyinterpolowanych współrzędnych śladu X_G, Y_G, Z_G ze względu na wpływ częstotliwości pracy instrumentów geodezyjnych i pochylenie terenu,
- import współrzędnych skorygowanych X_T, Y_T, Z_T w programie do postprocessingu danych georadarowych,
- filtracja i interpretacja wyników pomiarów georadarowych,
- wektoryzacja warstw i obiektów zidentyfikowanych na radargramie w układzie współrzędnych geodezyjnych,
- eksport uzyskanych wyników wektoryzacji X_T, Y_T, d (d oznacza głębokość obiektu wyznaczoną na radargramie),
- wyznaczenie ostatecznych współrzędnych obiektu z uwzględnieniem korekcji ze względu na pochylenie terenu i głębokość zalegania obiektu.

Wprowadzenie korekt ma istotny wpływ na dokładność wyznaczenia pozycji lokalizowanych warstw lub obiektów podpowierzchniowych, dlatego zostaną one omówione szerzej w kolejnych podrozdziałach.

2.1. Wpływ częstotliwości pracy instrumentów geodezyjnych na określenie pozycji śladu

Program Ground Vision odbiera i zapisuje współrzędne co 1 s. W tym samym czasie rejestrowana jest pewna liczba śladów tworzących obraz radarowy, która zależna jest od prędkości ruchu anteny GPR i ustawień interwału odległości zapisu śladów w profilu. Oznacza to, że część śladów posiada powielone współrzędne odebrane przez system georadarowy. Dla tych śladów należy interpolować nowe współrzędne na podstawie śladów, które posiadają odmienne współrzędnych od poprzednich. Ze względu na takie działanie sytemu istotnym czynnikiem kształtującym dokładność wyznaczenia pozycji śladu rejestrowanego w systemie GPR jest aktualność odebranych współrzędnych. Aktualność współrzędnych zależy od częstotliwości, z jaką instrument geodezyjny może wyznaczyć i przesłać nową obserwację. W ten sposób dokładność zarejestrowanej w systemie GPR pozycji kształtowana będzie przez rozdzielczość liniową pomiarów geodezyjnych, która zależy od prędkości $V_{ŚrSys}$ przejazdu systemu pomiarowego i częstotliwości f_z wyznaczania nowych współrzędnych. Rozdzielczość liniową Δs pomiarów można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta s = \frac{V_{Sys}}{f_z} \tag{1}$$

gdzie:

$V_{ŚrSys}$ – obliczona na podstawie czasu zapisanego w pliku ze współrzędnymi i całkowitej długości profilu zapisanej w pliku nagłówkowym radargramu.

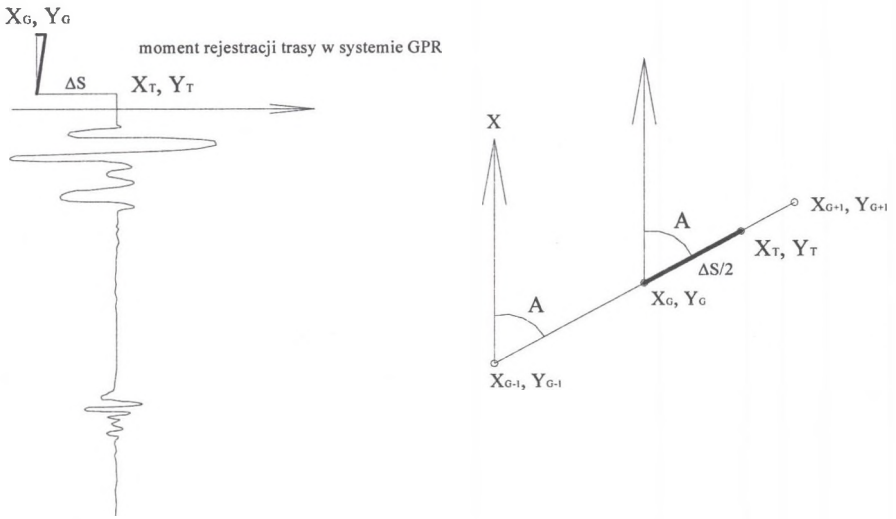
Maksymalna częstotliwość wyznaczenia i przesyłu nowych współrzędnych w typowych systemach GPS do zastosowań geodezyjnych wynosi 10 Hz, wyjątkowo 20 Hz. W przypadku tachymetrów standard to około 0,3 Hz. Typowe prędkości przesuwu anteny georadarowej przez operatora to 0,25 m/s - 0,50 m/s (0,9 km/h - 1,8 km/h), ale może być większa, np. gdy antena będzie przemieszczana za samochodem bądź motorówką. Tabela 1 przedstawia rozdzielczość liniową pomiarów pozycji śladu radarowego z uwzględnieniem prędkości przesuwu anten i częstotliwości wyznaczenia pozycji.

Tabela 1

Rozdzielczość liniowa pomiarów pozycji śladu radarowego

Δs[m]		f_z [Hz]			
		10	5	1	0.3
V_{Sys}[m/s]	0,25	0,025	0,125	0,25	0,70
	0,50	0,05	0,25	0,5	1,40

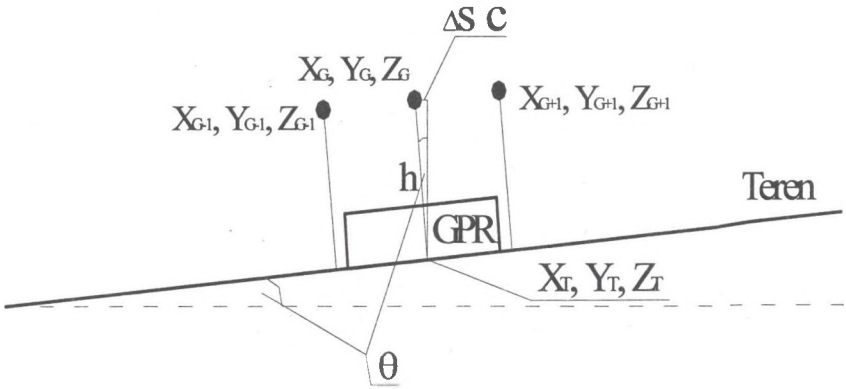
Stosując pewne uproszczenie, można uznać, iż wartość Δs stanowi równocześnie próg nieoznaczoności pozycji śladów georadarowych. Oznacza to, że podczas rejestracji pojawi się opóźnienie w zakresie Δs, które będzie kształtować dokładność wyznaczanych współrzędnych (rys. 1). Założono losowy rozrzut opóźnienia podczas pomiaru i uznano, że jego wartość przeciętna będzie wynosić $\Delta s/2$. Z powodu opóźnienia wyznaczone i interpolowane współrzędne śladów X_G, Y_G, Z_G anteny GPS bądź reflektora należy poddać korekcji. W przypadku powierzchni nachylonych w procesie wyznaczenia pozycji obiektu należy uwzględnić dodatkowo wartość powstającego wychylenia.



Rys. 1. Korekcja współrzędnych trasy oparta na wartości opóźnienia
Fig. 1. Line coordinates corection based on the delay value

2.2. Wpływ pochylenia terenu na określenie pozycji śladu

Pomiary georadarowe realizowane w przypadku zagadnień geodezyjnych wykonywane są zazwyczaj po powierzchniach, które wykazują umiarkowane regularne pochylenie przeciętnie około 2,5%. W niektórych przypadkach terenu lub na podjazdach drogowych może pojawić się pochylenie około 5%, a w wyjątkowych przypadkach 10%. Pochylenia powierzchni będą powodować niedokładności w procesie wyznaczenia pozycji śladu. Z punktu widzenia poprawności geometrycznej w procesie określania pozycji śladu należy uwzględniać odchylenie anteny bądź pryzmatu od linii pionu, które jest następstwem nachylenia terenu. Podpowierzchniowe obiekty, takie jak przewody czy elementy zbrojenia obiektów inżynierskich są rozpoznawalne w obrazie radarowym, przede wszystkim w przypadku, kiedy pomiar odbywa się do nich prostopadle. Z tego powodu pomiary georadarowe realizowane są wzdłuż zdeterminowanego kierunku. Wychylenie anteny lub pryzmatu będzie więc najbardziej istotne na kierunku realizacji profilu, natomiast wychylenia boczne będą mniej istotne. Wychylenie c na kierunku realizacji profilu będzie tym większe, im wyższa będzie wysokość h anteny GPS bądź pryzmatu nad anteną GPR i im większe nachylenie terenu e (rys. 2).



Rys. 2. Korekcja współrzędnych trasy ze względu na odchylenie terenu
Fig. 2. Line coordinates corection based on the ground slop

Aby wyznaczyć wartość wychylenia anteny w określonym miejscu rejestracji śladu, należy wyznaczyć lokalne pochylenie terenu na danym obszarze. Wartość nachylenia oblicza się na podstawie współrzędnych śladu poprzedzającego i następnego z zależności:

$$e = tg\theta = \frac{Z_{G+1} - Z_{G-1}}{\sqrt{(X_{G+1} - X_{G-1})^2 + (Y_{G+1} - Y_{G-1})^2}} \tag{2}$$

Wartość nachylenia terenu będzie przyjmować wartość dodatnią w przypadku wykonywania pomiarów pod górę, w przypadku pomiarów wykonywanych w dół wartość ujemną. Na podstawie wartości nachylenia wyznacza się wychylenie punktu pomiarów geodezyjnych. Ze względu na nieznaczne kąty typowych nachyleń terenów stosuje się zależność uproszczoną:

$$c = e \cdot h \tag{3}$$

W przypadku pomiarów wykonanych na terenie o pewnym pochyleniu pełna korekcja wyznaczonych radarem współrzędnych śladu będzie obejmować oprócz opóźnienia dodatkowo wartość wychylenia punktu pomiarów geodezyjnych. Skorygowane wartości współrzędnych X_T, Y_T, Z_T pozycji śladu radarowego w profilu w przypadku realizacji pomiarów na terenie pochyłym wyraża się zależnością:

$$X_T = X_G + (\frac{\Delta s}{2} + c) \cdot \cos A \tag{4}$$

$$Y_T = Y_G + (\frac{\Delta s}{2} + c) \cdot \sin A \tag{5}$$

$$Z_T = Z_G + \frac{\Delta s}{2} \cdot e - h \tag{6}$$

gdzie: A – azymut odłożenia $\Delta s/2$ wyznaczony na podstawie X_{G-1}, Y_{G-1} i X_{G+1}, Y_{G+1} z zależności:

$$A = arctg \frac{Y_{G+1} - Y_{G-1}}{X_{G+1} - X_{G-1}} \tag{7}$$

W przygotowanym zestawie pomiarowym wysokość mierzonego punktu geodezyjnego nie przekracza 0,50 m dla największej z anten GPR. W takim przypadku nachylenie terenu będzie generować odchylenie rzędu 1,25 cm, 2,5 cm, 5 cm dla nachyleń 2,5%, 5%, 10%. Niekiedy konieczne będzie zastosowanie dłuższego drążka wspornikowego i wtedy korekcje będą proporcjonalnie większe.

2.3. Wpływ pochylenia terenu na określenie pozycji obiektu podpowierzchniowego

Wyznaczone i skorygowane w opisany powyżej sposób współrzędne śladu importuje się do programu umożliwiającego postprocessing danych georadarowych. W wyniku wektoryzacji zlokalizowanych na radargramie obiektów i struktur uzyskujemy ich głębokość *d* w danym śladzie o znanych współrzędnych X_T, Y_T, Z_T. Ostateczne wyznaczenie współrzędnych geodezyjnych płaskich rozpoznanego obiektu lub warstwy X_S, Y_S, wymaga redukcji uzyskanych wyników ze względu na pochylenie terenu. Nachylenie terenu wywołuje przesuniecie *k* wyznaczonych współrzędnych sytuacyjnych obiektu. Im głębiej zlokalizowany obiekt, tym wartość przesunięcia większa (rys. 3). W przypadku typowych prac geodezyjnych związanych z lokalizacją uzbrojenia terenu, detekcją warstw drogowych czy zbrojenia w obiektach inżynierskich będzie to głębokość do 3 metrów. Wyszczególnione powyżej spadki terenu mogą powodować na tej głębokości przesunięcie *k*, wyznaczenie pozycji rzędu 0,07 m, 0,15 m, 0,30 m. Nachylenie terenu nie będzie wpływać znacząco na wartość współrzędnej Z_S, ponieważ redukcja wyznaczonej na radargramie głębokości *d* o wartość nachylenia *e* będzie nieistotna przy wartościach typowych nachylenia terenu. Wartość przesunięcia współrzędnych płaskich oblicza się z zależności:

$$k = e \cdot d \tag{8}$$

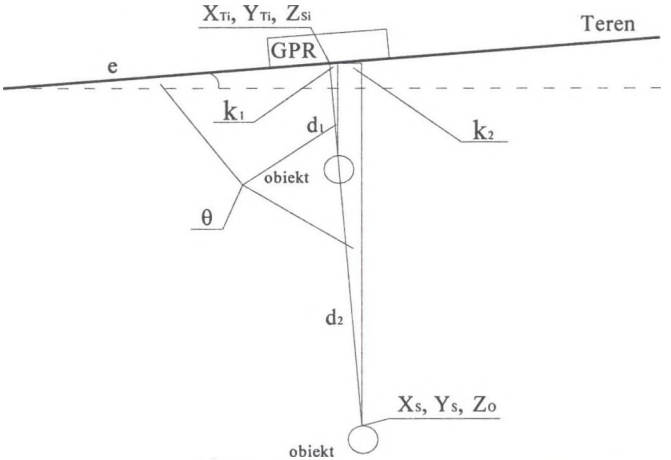
gdzie: e - nachylenie terenu obliczone z zależności (2).

Wartość ostatecznych współrzędnych obiektu podpowierzchniowego oblicza się na podstawie zależności:

$$X_S = X_T + k \cdot \cos A \tag{9}$$

$$Y_S = Y_T + k \cdot \sin A \tag{10}$$

$$Z_S = Z_T - d \tag{11}$$



Rys. 3. Korekcja wyznaczonych współrzędnych obiektu ze względu na pochylenie terenu
Fig. 3. Object coordinates corection based on the ground slop

3. Ocena dokładności pozycjonowania pomiarów georadarowych systemem GPR - GPS lub GPR – tachymetr samonaprowadzający z uwzględnieniem procedur korekcyjnych

Ustalenie i ocena wpływu proponowanych korekt na dokładność lokalizacji obiektów podpowierzchniowych wykrywanych georadarem pozycjonowanym systemem GPS lub tachymetrem samonaprowadzającym wymagała przeprowadzenia pomiarów doświadczalnych. Koncepcja przeprowadzonych pomiarów polegała na obserwacji obiektów podpowierzchniowych w zdefiniowanym układzie współrzędnych z wykorzystaniem zintegrowanego systemem pomiarowego przy różnych częstotliwościach wyznaczania pozycji. Lokalizacja momentu rejestracji przewodu odbywała się poprzez wyznaczenie na radargramie śladu, który identyfikowano jako oś przewodu odwzorowanego w kształcie hiperboli. Każdy ślad posiadał swoją współrzędną rejestracji w układzie geodezyjnym. Na jego podstawie wyznaczono odpowiednio wysokość terenu w miejscu rejestracji śladu Z_T oraz ostateczną pozycję lokalizowanego obiektu X_S, Y_S, Z_S bez i z uwzględnieniem procedur korekcjnych. Tak wyznaczone wartości współrzędnych odniesiono do znanej pozycji sytuacyjnej wyznaczonej w terenie poprzez pomiar bezpośredni X_W, Y_W. Znaną wysokość Z_{WT} powierzchni terenu w miejscu sytuacyjnej lokalizacji przewodu wykorzystano do oceny dokładności wyznaczenia wysokości śladu w profilu. Ocenie poddano również ostateczną wartość współrzędnej wysokościowej Z_{WS} przewodu wyznaczoną z pomiaru bezpośredniego.

W ten sposób otrzymano różnice współrzędnych, które pozwoliły na oceną dokładności pozycjonowania anteny georadarowej i obiektu podpowierzchniowego.

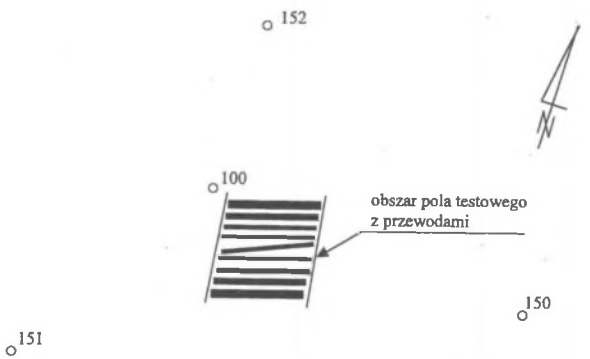
$$v_X = \Delta X = X_S - X_W \tag{12}$$

$$v_Y = \Delta Y = Y_S - Y_W \tag{13}$$

$$v_Z = \Delta Z_T = Z_T - Z_{WT} \tag{14}$$

$$v_{Z_S} = \Delta Z = Z_S - Z_{WS} \tag{15}$$

W celu pozyskania materiału badawczego pomiary terenowe realizowano na odpowiednio przygotowanej bazie testowej. Baza testowa zlokalizowana została na niezagospodarowanym obszarze należącym do AGH, znajdującym się w Mydlnikach. Przygotowana baza testowa miała służyć zarówno badaniom podstawowym w zakresie pomiarów georadarowych, jak również testom dokładności lokalizacji pomiarów radarowych systemem GPS lub tachymetrami samonaprowadzającymi. Na obszarze testowym założono lokalną osnowę złożoną z czterech punktów (rys. 4) stabilizowanych rurkami stalowymi długości 0,75 m i średnicy 10 mm.



Rys. 4. Szkic lokalizacji pola testowego względem punktów osnowy lokalnej na obszarze testowym w Mydlnikach
Fig. 4. Identification of fixed points in respect of test area freehand in the Mydlniki test area

Geodezyjne pomiary sytuacyjne punktów osnowy zrealizowano instrumentem TCA 1102. Pomiar wysokościowy wykonano niwelatorem kodowym NA 3003. W wyniku wyrównania przeprowadzonych pomiarów otrzymano błędy położenia punktu osnowy nieprzekraczające wartości ± 4 mm sytuacyjnie i ± 2 mm wysokościowo. W jednakowym gruncie wewnątrz obszaru otoczonego osnową zakopano 9 rur. Były to rury stalowe i PCV o średnicy od 100 mm do 500 mm ułożone na różnej głębokości (0,25 m ÷ 1,20 m), oddalone

od siebie o około 1 m. Sytuacyjną lokalizację przewodów pomierzono metodą biegunową w nawiązaniu do osnowy pomiarowej założoną wokół pola testowego. Pole testowe przygotowano w okresie letnim, a pomiary niwelacyjne położenia przewodów oraz pomiary georadarowe wykonano dopiero po upływie 6 miesięcy, aby mogło nastąpić ustabilizowanie gruntu. Rzędne wysokościowe zalegania przewodów wyznaczono pomiarem niwelacji technicznej w otworach kontrolnych na końcach przewodu w odniesieniu do najbliższego punktu osnowy.

Pomiary zintegrowanym systemem realizowano na przygotowanym odcinku testowym o długości około 60 metrów. Kierunek profilu był prostopadły do przewodów zlokalizowanych w polu testowym. Teren profilowań charakteryzował się równomiernym spadkiem ok. 5% na całej długości profilu. Na przygotowanym odcinku testowym zrealizowano pomiary przygotowanym systemem GPR-GPS i GPR-TCA. Pomiary celowo wykonano w warunkach typowej powierzchni gruntu i dość znacznego nachylenia terenu, aby uzyskać ocenę dokładności w warunkach rzeczywistych. W publikacji [1] wykazano, iż w przypadku, kiedy obiekt podpowierzchniowy, jakim jest np. rurociąg, odwzorowuje się jako hiperbola, to dokładność jej pozycjonowania nie zależy od częstotliwości używanych anten. Z tego powodu pomiary testowe zrealizowano tylko jedną z anten georadarowych o częstotliwości 500 MHz, a uzyskane wyniki uogólniono na pozostałe anteny. Obserwacji poddano tylko trzy przewody, które jednoznacznie odwzorowywały się w pomiarach wszystkimi dostępnymi antenami. Przed przystąpieniem do realizacji prac doświadczalnych wykonano pomiary GPS metodą *stop and go* na punktach osnowy lokalnej w układzie WGS 84. Na podstawie wyników pomiaru wyznaczono transformację, która pozwoliła na pozycjonowanie anteny GPR systemem GPS w lokalnym układzie współrzędnych.

Testy przeprowadzono w przypadkach, gdy system GPS wyznaczał i wysyłał pozycje z czestotliwością 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, a tachymetr z częstotliwością 0.66 Hz (częstotliwości te uzyskano poprzez odpowiednie dostosowanie tachymetru TCRA 1102 Leica, co opisano w kolejnym podrozdziale) Przeciętna prędkość przemieszczania się systemu wyznaczona z plików nagłówkowych wahała się 0,3 ÷ 0,6 m/s.

Wykonano łącznie 40 przejazdów, czyli po 10 profili w ramach określonej częstotliwości wyznaczenia współrzędnych przez dany system pomiarowy. W zakresie każdej częstotliwości profilowania realizowano tam i z powrotem, aby pomiar odbywał się przy dwóch różnych wartościach pochylenia terenu.

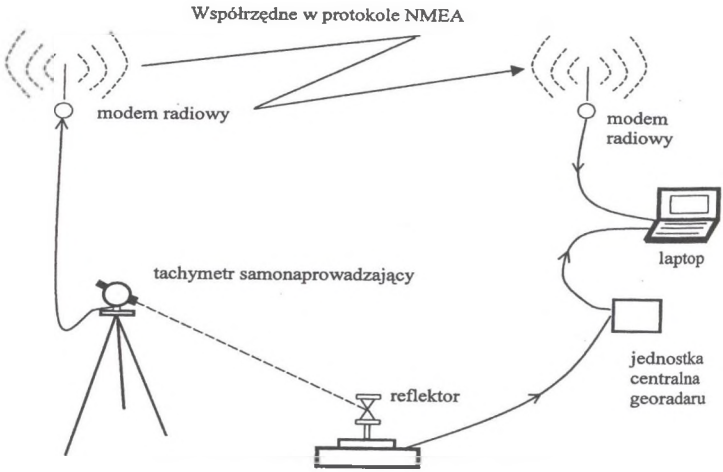
Procedury interpretacji pomiarów georadarowych i wyznaczenie współrzędnych śladu zrealizowano z użyciem oprogramowania ReflexW firmy Sandmeier Software. W procesie

filtracji pomiarów realizowano procedury analogiczne do opisanych w [8]. Oś lokalizowanych przewodów wyznaczano w sposób manualny. Głębokość przewodów d określono przy założeniu średniej prędkości fali w gruncie 0,066 m/ns wyznaczonej w pomiarach doświadczalnych [8].

3.1. Dostosowanie tachymetrów typu TCA do pozycjonowania anteny GPR i komunikacji z systemem georadarowym

Tachymetry samonaprowadzające stanowią szczególną rodzinę instrumentów geodezyjnych. Wyposażone w serwomotory umożliwiają podążanie lunety instrumentu za automatycznie rozpoznawanym celem (pryzmatem). Ten tryb pracy umożliwia realizację pomiarów tachymetrycznych w procesach o charakterze dynamicznym. Dane uzyskane w wyniku pomiarów instrumentami firmy Leica mogą być zapisywane do pamięci wewnętrznej instrumentu lub zewnętrznych urządzeń rejestrujących. Przekaz danych realizowany jest jedynie formatem GSI i odbywa się drogą kablową bądź radiową z wykorzystaniem złączy RS 232. Podobnie jak w przypadku pomiarów GPS rejestracja wyników obserwacji może być realizowana w interwałach czasu lub odległości. W standardowym trybie śledzenia obiektu instrument potrzebuje na wykonanie pomiaru i zapis około 3 s. Dopiero po tym czasie wykonuje kolejny pomiar, co przy typowej prędkości poruszania anten, która wynosi 0,25 m/s ÷ 0,50 m/s, daje pozycje co 0,75 m ÷ 1,50 m. Oprogramowanie służące akwizycji danych radarowych systemu RAMAC/GPR zapewnia możliwość odbioru współrzędnych geodezyjnych poprzez łącze RS232 z wykorzystaniem przesyłu danych protokołem NMEA (National Marine Electronics Association) bądź TSIP (Trimble Standard Interface Protocol), które są standardem dla każdego systemu GPS. Wykorzystanie podstawowych funkcji i procedur pomiarowych, w które zaopatrzony jest instrument, nie dawało możliwości ich wykorzystania w procesie dostarczenia współrzędnych bezpośrednio do systemu GPR. Podstawowym problemem był brak odpowiedniego formatu przesyłanych danych, czyli komunikatu NMEA formatu GGA lub LLQ. Drugi problem to wolne podawanie współrzędnych. W rozwiązaniu tych zagadnień wykorzystano język programowania GeoBASIC, który umożliwia programowanie instrumentu. W Programie GeoBASIC przygotowano odpowiednią funkcje pomiarową, którą zaimplementowano do instrumentu (twórcą oprogramowania jest mgr inż. T. Owerko). Aplikacja o nazwie „GPR Tracker" pozwala na śledzenie obiektu z wykorzystaniem modułów ATR oraz LOCK. Procedura korzysta przy tym automatycznie z ostatnio wykonanego nawiązania instrumentu do punktów stanowiących przestrzenny układ odniesienia. Wyznaczone w pomiarze

współrzędne zamieniane są w locie na słowo w formacie LLQ protokołu NMEA i podawane na port transmisji, do którego podłączony jest modem radiowy. Taki sam odbiornik radiowy podłączony jest do laptopa i na bieżąco odbiera dane przychodzące z instrumentu (rys. 5).



Rys. 5. Wyznaczanie pozycji anteny GPR z zastosowaniem tachymetrów samonaprowadzających
Fig. 5. Fixing coordinates of GPR antenna using ATR Total Station

W ten sposób program Ground Vision zostaje „oszukany" i procedura przebiega tak, jakby odbierane były współrzędne płynące z systemu GPS, pomimo że pochodzą z pomiaru tachymetrycznego. Przygotowana funkcja umożliwia pomiar i wysyłanie komunikatu w interwałach 1,5 s, co znacznie przewyższa rozwiązania proponowane przez producenta, przedstawiono to w publikacji [4]. Wykazano w niej, że dokładność pozycjonowania poruszającego się reflektora (prędkość 0,5 m/s) w warunkach skrajnie niekorzystnych z zastosowaniem aplikacji „GPR Tracker" kształtuje się na poziomie ±3 cm, podczas gdy rozwiązanie standardowe daje dokładność 10-krotnie gorszą.

3.2. Ocena dokładności pracy zintegrowanego systemu

Na podstawie pomiarów testowych zintegrowanym systemem pomiarowym wyznaczono wartości współrzędnych poszczególnych przewodów bez i z zastosowaniem procedur korekcyjnych X_S, Y_S, Z_T, Z_S. Z otrzymanych różnic współrzędnych wyznaczonych z pomiaru i współrzędnych nominalnych wyznaczono błędy średnie współrzędnych m_X, m_Y, m_Z, m_{Zs} z zależności (Chojnicki, 1968):

$$m = \pm\sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \tag{16}$$

gdzie: n - ilość obserwacji w próbie,

oraz ogólny błąd średni położenia sytuacyjnego przewodu:

$$m_P = \pm\sqrt{m_X^2 + m_Y^2} \tag{17}$$

Błędy średnie współrzędnych lokalizowanych przewodów bez wprowadzania korekt zestawiono w tabeli 2. Natomiast różnice wartości skorygowanych i nominalnych oraz wyznaczone na ich podstawie błędy średnie współrzędnych lokalizowanych przewodów zestawiono w tabelach 3 ÷ 6.

Tabela 2

Zestawienie błędów średnich współrzędnych lokalizowanych przewodów bez wprowadzania korekt

Częstotliwość f_z	m_X [m]	m_Y [m]	m_P [m]	m_Z [m]	m_{Zs} [m]
10 Hz	± 0,08	± 0,04	± 0,09	± 0,02	± 0,03
5 Hz	± 0,015	± 0,06	± 0,16	± 0,025	± 0,035
1 Hz	± 0,037	± 0,10	± 0,38	± 0,035	± 0,045
0,66 Hz	± 0,36	± 0,10	± 0,37	± 0,035	± 0,045

Tabela 3

Zestawienie różnic i błędów średnich współrzędnych obiektów podpowierzchniowych wyznaczonych z pomiaru systemem GPR-GPS (poddane korekcji) i nominalnych przy częstotliwości wyznaczania współrzędnych geodezyjnych 10 Hz

Nr obserwacji	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ_T [m]	ΔZ [m]
1	0.00	-0.02	0.01	0.02
2	0.00	0.02	0.00	-0.01
3	-0.03	-0.04	-0.02	-0.05
4	-0.05	-0.04	0.02	0.03
5	0.10	0.05	0.00	0.00
6	-0.06	-0.04	-0.01	-0.04
7	-0.06	-0.04	0.04	0.05
8	0.10	0.06	0.00	0.00
9	-0.06	-0.04	-0.01	-0.04
10	0.05	-0.01	0.04	0.05
11	-0.14	-0.03	0.01	0.01
12	-0.02	-0.01	-0.01	-0.04
13	0.00	-0.02	0.03	0.05
14	0.05	0.02	0.00	0.00
15	0.09	0.04	-0.02	-0.04
16	0.08	0.07	-0.01	-0.04
17	0.10	0.04	0.03	0.02
18	-0.07	-0.03	0.02	0.03
19	0.04	0.02	-0.01	-0.04
20	0.07	0.03	0.03	0.02
21	-0.07	-0.03	0.03	0.05
22	0.00	0.03	0.03	0.00
23	0.07	0.02	0.04	0.03
24	-0.01	-0.03	0.03	0.05
25	0.00	0.03	0.03	0.00
26	0.07	0.02	0.04	0.03
27	-0.01	-0.03	0.03	0.05
29	0.05	0.02	-0.01	-0.04
30	0.12	0.04	0.00	-0.01

cd. tabeli 3

m_X [m] ± 0,07	m_Y [m] ± 0,03	m_Z [m] ± 0,02	m_{Zs} [m] ± 0,03
m_P [m] ± 0,07			

Tabela 4

Zestawienie różnic i błędów średnich współrzędnych obiektów podpowierzchniowych wyznaczonych z pomiaru systemem GPR-GPS (poddane korekcji) i nominalnych przy częstotliwości wyznaczania współrzędnych geodezyjnych 5 Hz

Nr obserwacji	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ_T [m]	ΔZ [m]
1	-0.11	-0.04	0.00	0.03
2	-0.06	-0.01	0.01	0.01
3	-0.19	-0.02	0.00	-0.02
4	-0.12	-0.05	0.02	0.05
5	0.00	0.02	0.00	0.00
6	-0.24	-0.12	0.00	-0.02
7	0.00	-0.04	0.00	0.02
8	0.05	0.02	0.00	-0.01
9	0.00	-0.05	-0.01	-0.03
10	-0.03	-0.04	0.00	0.02
11	0.04	0.02	0.00	-0.01
12	0.03	-0.05	-0.01	-0.03
13	0.05	0.01	-0.03	0.00
14	0.08	0.05	-0.02	-0.02
15	-0.02	-0.01	-0.02	-0.04
16	0.02	0.05	-0.01	-0.03
17	-0.02	0.01	0.00	0.01
18	-0.05	-0.03	0.00	0.01
19	0.18	0.07	-0.01	-0.03
20	-0.08	-0.01	0.01	0.01
21	-0.09	-0.04	-0.01	0.01
22	-0.04	0.00	-0.01	-0.03
23	-0.04	0.01	-0.01	0.00
24	-0.09	-0.02	0.00	0.02
25	-0.05	0.00	-0.01	-0.03
26	-0.06	0.01	-0.01	0.00
27	-0.07	-0.02	0.00	0.02
29	0.06	0.06	0.00	-0.02
30	0.11	0.04	0.01	0.02
	m_X [m] ± 0,09	m_Y [m] ± 0,04	m_Z [m] ± 0,01	m_{Zs} [m] ± 0,02
	m_P [m] ± 0,10			

Tabela 5

Zestawienie różnic i błędów średnich współrzędnych obiektów podpowierzchniowych wyznaczonych z pomiaru systemem GPR-TCRA (poddane korekcji) i nominalnych przy częstotliwości wyznaczania współrzędnych geodezyjnych 1 Hz

Nr obserwacji	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ_T [m]	ΔZ [m]
1	-0.06	-0.03	0.03	0.06
2	0.00	0.01	0.00	-0.01
3	-0.22	-0.07	-0.01	-0.03
4	-0.03	-0.01	0.02	0.04
5	0.11	0.04	0.01	0.01
6	-0.02	-0.01	-0.01	-0.03
7	-0.08	-0.03	0.03	0.07
8	-0.22	-0.03	0.02	0.02
9	-0.05	0.01	0.00	-0.02
10	-0.07	-0.03	0.03	0.07
11	-0.20	-0.03	0.02	0.02
12	-0.18	0.01	0.00	-0.02
13	-0.05	-0.01	0.03	0.07
14	-0.05	0.00	0.01	0.01
15	-0.23	-0.15	0.00	-0.02
16	-0.13	0.03	-0.01	-0.03
17	-0.16	-0.04	0.00	0.00
18	-0.25	-0.09	0.00	0.02
19	0.33	0.13	-0.02	-0.04
20	0.34	0.08	-0.01	-0.03
21	0.25	0.07	-0.01	0.01
22	-0.08	0.01	0.00	-0.02
23	-0.03	-0.01	-0.01	-0.01
24	-0.12	-0.03	-0.01	0.02
25	-0.10	0.01	0.00	-0.02
26	0.00	-0.01	-0.01	-0.01
27	-0.10	-0.03	-0.01	0.02
29	-0.04	0.02	-0.02	-0.04
30	-0.15	-0.03	0.00	-0.04
	m_X [m] ± 0,16	m_Y [m] ± 0,05	m_Z [m] ± 0,02	m_{Zs} [m] ± 0,03
	m_P [m] ± 0,16			

Tabela 6

Zestawienie różnic i błędów średnich współrzędnych obiektów podpowierzchniowych wyznaczonych z pomiaru systemem GPR- TCRA (poddane korekcji) i nominalnych przy częstotliwości wyznaczania współrzędnych geodezyjnych 0,66 Hz

Nr obserwacji	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ_T [m]	ΔZ [m]
1	0.07	0.04	0.01	0.02
2	-0.03	0.03	0.00	-0.01
3	0.04	0.07	-0.02	-0.05
4	-0.11	-0.01	0.02	0.03
5	-0.07	0.01	0.00	0.00
6	-0.10	-0.06	-0.01	-0.04
7	-0.24	-0.04	0.04	0.05
8	0.04	0.04	0.00	0.00
9	-0.02	0.01	-0.01	-0.04
10	-0.24	-0.04	0.04	0.05
11	-0.10	0.00	0.01	0.01
12	-0.20	-0.04	-0.01	-0.04
13	-0.01	0.01	0.03	0.05

cd. tabeli 6

14	-0.11	0.00	0.00	0.00
15	-0.09	-0.11	-0.02	-0.04
16	-0.08	0.07	-0.02	-0.05
17	-0.10	0.00	0.00	-0.01
18	0.08	0.05	-0.02	-0.01
19	0.22	0.07	-0.02	-0.05
20	-0.06	0.01	0.00	0.00
21	0.07	0.06	-0.03	-0.02
22	-0.17	-0.03	-0.01	-0.04
23	-0.05	-0.01	0.00	0.00
24	-0.21	-0.03	-0.02	-0.01
25	0.02	0.06	-0.01	-0.04
26	0.11	0.05	-0.01	-0.01
27	-0.03	0.03	-0.02	-0.01
29	0.07	0.04	-0.02	-0.05
30	0.12	0.04	-0.01	-0.01
	m_X [m] ± 0,12	m_Y [m] ± 0,05	m_Z [m] ± 0,02	m_{Zs} [m] ± 0,03
	m_P [m] ± 0,13			

4. Wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły na zebranie następujących wniosków i wskazań, pomocnych w procesie przestrzennej lokalizacji obiektów wykrywanych georadarem pozycjonowanym systemem GPS lub tachymetrem typu TCA.

Wprowadzenie proponowanych korekt ze względu na częstotliwość pracy systemu geodezyjnego pochylenia terenu wyraźnie wpłynęło na poprawę dokładności wyznaczenia współrzędnych obiektów podpowierzchniowych wykonanym zestawem pomiarowym GPR – GPS lub GPR – TCA.

Oczywiście wzrost prędkości poruszania się zestawu pomiarowego będzie powodował wzrost wartości opóźnienia, a to będzie skutkować obniżeniem dokładności lokalizacji obiektów podpowierzchniowych, jednak stosowanie wspomnianych korekt pozwoli ograniczyć tę niedokładność.

W przypadku typowej prędkości ruchu operatora na poziomie 0,3 m/s – 0,6 m/s system i 5% pochylenie terenu, proponowany zestaw pomiarowy umożliwia pozycjonowanie obiektów podpowierzchniowych z dokładnością poniżej 20 cm przy częstotliwości wyznaczenia nowych współrzędnych równej 0,66 Hz.

Przeprowadzone pomiary terenowe w pełni potwierdziły poprawne działanie zaproponowanego przystosowania tachymetrów TCA w procesie bezpośredniego pozycjonowania anteny GPR.

LITERATURA

1. Gocał J., Ortyl Ł., Sołtys M.: Badanie wybranych czynników kształtujących sytuacyjną dokładność pomiarów georedarowych (w druku).
2. Gocał J., Ortyl Ł., Sołtys M.: Zestaw konstrukcyjny do określania lokalizacji anteny georadaru metodą GPS oraz zrobotyzowanym tachymetrem (w druku).
3. Lehemann F., Green A.G: Semiautomated georadar data acquisition in three dimensions, Geophysics, vol. 64, 1999, p. 719-731.
4. Lenda G.: Wyznaczenie dokładności pomiaru poruszającego się georadaru przy użyciu zrobotyzowanego tachimetru z opcją Automatycznego rozpoznawania celu (w druku).
5. Ortyl Ł., Bałut A.: Zastosowanie techniki RTK-GPS w procesie przestrzennej lokalizacji śladów profili georadarowych (w druku).
6. Ortyl Ł.: Badanie wpływu elementów zewnętrznych systemu pomiarowego GPR – GPS na wynik pomiarów georadarowych (w druku).
7. Ortyl Ł.: Badanie wpływu elementów zewnętrznych systemu pomiarowego GPR – GPS na dokładność wyznaczanych współrzędnych metodą GPS - RTK (w druku).
8. Xu X., Aiken C. L. V., Bhattacharya J. P., Corbeanu R. M., Nielsen K. C., McMechan G.A., and Abdelsalam M. G. Creating virtual 3-D outcrop The Leading Edge, Volume 19, 2000, p. 197-202.

Recenzent: Dr hab. inż. Piotr Strzałkowski, prof. w Pol. Śl.