

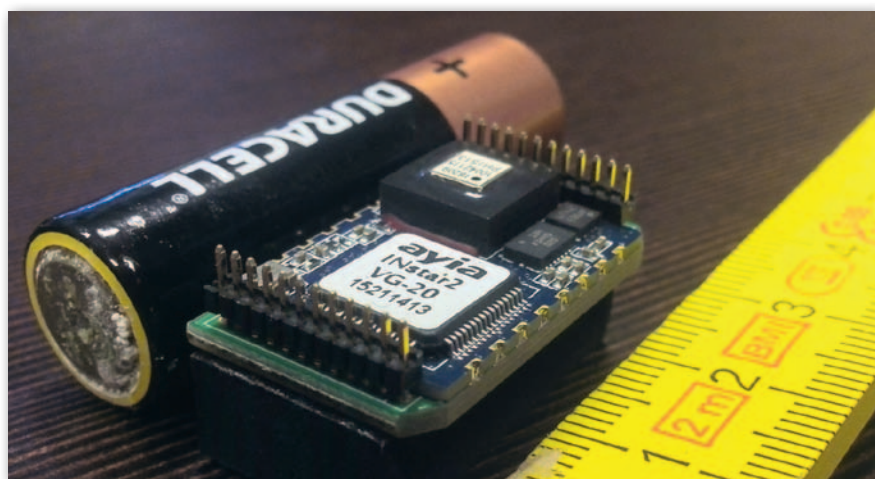
Tilt Surveying: bać się czy mierzyć?

Tilt Surveying to pomiar przy wychylonej tyczce, na której zamontowany jest odbiornik GNSS. Choć większość geodetów już o tej technologii słyszała, nie wszyscy dobrze ją rozumieją. Jak to działa oraz na co należy zwracać szczególną uwagę – wyjaśnia Tomasz Piegat z firmy Geopryzmat.

Od około roku w naszej ofercie dostępny jest odbiornik Kolida K5+. Posiada on czujniki pozwalające na redukcję błędów w czasie rzeczywistym współrzędnych pomierzonych przy tyczce odchylonej od pionu. Choć to rewolucja w pomiarach GNSS, wielu polskich geodetów nie jest jeszcze do niej przekonanych. Mamy nadzieję, że niniejszy artykuł przybliży tę technologię obecnym i przyszłym użytkownikom. Staraliśmy się zaprezentować rzetelny opis wraz z testami stanowiący dobre źródło wiedzy dla geodetów wykorzystujących odbiorniki z wbudowanym pochyłomierzem. Trzeba jednak zaznaczyć, że opracowanie to powstało z wykorzystaniem wiedzy inżynierów z firmy Kolida, a testy przeprowadzono przy użyciu odbiornika Kolida K5+. Podobne technologie stosowane w odbiornikach innych producentów mogą się różnić zasadą działania i wymagać innej obsługi.

• Trochę teorii na początek

Zacznijmy od wyjaśnienia, w jaki sposób instrument w ogóle jest w stanie wyznaczyć swoje pochylenie. Wszystko za sprawą jednostki Ayia INstar2 VG-20 zamontowanej na płycie głównej odbiornika (rys. 1). Na tej niedużej płytce znajdują się aż trzy sensory: 3-osiowy żyroskop, 3-osiowy akcelerometr oraz 3-osiowy magnetometr. Są to mikroskopijne struktury wykonane w technologii MEMS (*Microelectromechanical System*), co oznacza, że ich wymiary mieszczą się w zakresie od 1 do 100 μm .



Rys. 1. Płytki Ayia INstar2 VG-20

Żyroskop składa się z drgającej masy, która pod wpływem obrotu ulega efektowi Coriolisa. Powoduje on odchylenie kierunku drgań spowodowanego działaniem siły Coriolisa, przez co masa przemieszcza się. Na podstawie zmian pojemności wzajemnej między drgającą masą a sensorami obliczane są wartości kąta obrotu w danej płaszczyźnie.

Akcelerometr również działa na zasadzie pomiaru zmian pojemności. Jego sercem jest masa zawieszona na dwóch sprężynach, której ruch jest ograniczony do jednego kierunku. W wyniku przyspieszenia masa zmienia położenie, a co za tym idzie – zmienia się pojemność między masą a sensorami. Konkretna zmiana pojemności jest przeliczana na zmianę przyspieszenia w danym kierunku.

Magnetometr wykorzystuje natomiast efekt Halla. Zawiera on przewodnik podłączony do obwodu elektrycznego, w którym pojawiają się różnice potencjałów. Na podstawie pomiaru napięcia między granicami przewodnika można określić natężenie i kierunek pola magnetycznego, w którym się on znajduje.

Jako że cechą charakterystyczną żyroskopu jest dryft, czyli systematyczne pogarszanie dokładności w czasie, dopiero jego integracja z akcelerometrem mierzącym kierunek siły grawitacji pozwala na uzyskanie stałej dokładności pomiaru kąta wychylenia. Natomiast pomiary dostarczane przez magnetometr pozwalają na kompensację zmian pola magnetycznego, które wpływają na dokładność czujników pochylenia. Wyniki pomiarów wszystkich trzech jednostek

są razem przetwarzane z zastosowaniem rozszerzonego filtra Kalmana oraz rozpoznawania wzorców, aby finalnie dać pewne wartości kątów wychylenia.

Dał jest już prosto. Mając wartości kąta wychylenia, kierunku wychylenia i wysokości tyczki, redukujemy współrzędne, co sprowadza się do rozwiązania trójkąta prostokątnego o znanym kącie i przeciwprostokątnej, a następnie przesunięcia zmierzonych współrzędnych o obliczony na tej podstawie wektor. System dostarcza informacji o przestrzennej orientacji odbiornika z częstotliwością 10 Hz.

• Jak kalibrować czujniki

Korzystając z technologii Tilt Surveying, podobnie zresztą jak z każdej innej, trzeba być jej świadomym użytkownikiem. Mikroskopijne czujniki MEMS są wrażliwe na zmiany pola elektromagnetycznego. Obecność magnetometru zapewnia odporność na te zmiany w czasie pomiaru, jednak zalecane jest, aby wykonać kalibrację systemu po zmianie miejsca pomiaru, istotnej zmianie temperatury (rzędu 20°C), przejścia obok maszyn elektrycznych lub przewodów przenoszących wysokie napięcie oraz zaistnieniu innych okoliczności mogących mieć

wpływ na dużą zmianę pola elektromagnetycznego. Tylko w ten sposób można być pewnym, że mierzone wartości będą w pełni wiarygodne.

Kalibracja składa się z dwóch etapów, z których każdy zajmuje ok. 30 sekund. W pierwszym z nich kalibracji podlega libela elektroniczna, czyli akcelerometr i żyroskop. Polega ona na zniwelowaniu błędów wskazań tych czujników na podstawie pomiaru referencyjnego, podczas którego instrument jest spoziomowany i nieruchomy. Aby uzyskać jak najdokładniejsze wartości, najlepiej ustawić instrument na spodarce lub na tyczce podtrzymanej przez bipod, gdyż eliminuje to małe wychylenia spowodowane drżeniem ręki. Specjalnie dla Czytelników GEODETY sprawdziliśmy jednak, jaka jest różnica między kalibracją na spodarce i na tyczce trzymanej w ręce. Wyniki prezentujemy w dalszej części artykułu.

Drugi etap polega natomiast na kalibracji czujników magnetycznych. Magnetometr musi dokonać pomiarów lokalnego pola magnetycznego, dlatego podczas kalibracji przez ok. pół minuty należy powoli obracać odbiornik wokół jego trzech osi. Tak skalibrowany instrument jest gotowy do pomiarów w technologii Tilt Surveying.



Rys. 2. Miejsce przeprowadzania testów

• Czas na testy

Aby opis technologii Tilt Surveying był rzetelny, wykonaliśmy serię testów sprawdzających jej działanie. Zostały one przeprowadzone 10 i 16 listopada 2016 r. w okolicach Raszyna z wykorzystaniem poprawek RTK z naszej stacji referencyjnej

Tab. 1. Wyniki kalibracji na tyczce dla poszczególnych kierunków wychyleń

Kierunek wychylenia	Kąt wychylenia	Współrzędne uśrednione			Odchylenie standardowe próbki			Różnica z pomiarem referencyjnym		
		X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]
Północ	5°	5779406,410	7493390,497	104,683	0,016	0,010	0,003	0,020	0,000	0,001
	15°	5779406,410	7493390,490	104,686	0,023	0,010	0,005	0,020	0,007	0,004
	30°	5779406,398	7493390,505	104,681	0,021	0,009	0,012	0,008	0,008	0,001
Południe	5°	5779406,410	7493390,508	104,681	0,013	0,007	0,004	0,020	0,011	0,001
	15°	5779406,386	7493390,490	104,666	0,022	0,010	0,008	0,004	0,007	0,016
	30°	5779406,392	7493390,451	104,680	0,019	0,022	0,013	0,002	0,046	0,002
Wschód	5°	5779406,416	7493390,497	104,686	0,008	0,009	0,003	0,026	0,000	0,004
	15°	5779406,411	7493390,503	104,676	0,016	0,025	0,008	0,021	0,006	0,006
	30°	5779406,428	7493390,494	104,679	0,016	0,017	0,010	0,038	0,003	0,003
Zachód	5°	5779406,403	7493390,497	104,685	0,007	0,012	0,003	0,013	0,000	0,003
	15°	5779406,410	7493390,503	104,676	0,016	0,025	0,008	0,020	0,006	0,006
	30°	5779406,367	7493390,501	104,675	0,013	0,016	0,009	0,023	0,003	0,007

Tab. 2. Wyniki kalibracji na spodarce dla poszczególnych kierunków wychyleń

Kierunek wychylenia	Kąt wychylenia	Współrzędne uśrednione			Odchylenie standardowe próbki			Różnica z pomiarem referencyjnym		
		X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]
Północ	5°	5779406,389	7493390,495	104,680	0,007	0,009	0,004	0,001	0,002	0,002
	15°	5779406,389	7493390,482	104,677	0,013	0,011	0,004	0,001	0,015	0,005
	30°	5779406,386	7493390,480	104,677	0,008	0,009	0,004	0,004	0,017	0,005
Południe	5°	5779406,392	7493390,510	104,676	0,007	0,008	0,005	0,002	0,013	0,006
	15°	5779406,393	7493390,477	104,669	0,011	0,006	0,004	0,003	0,020	0,013
	30°	5779406,406	7493390,395	104,684	0,012	0,014	0,008	0,016	0,103	0,002
Wschód	5°	5779406,403	7493390,502	104,676	0,007	0,009	0,004	0,013	0,005	0,006
	15°	5779406,354	7493390,523	104,671	0,010	0,020	0,006	0,036	0,026	0,011
	30°	5779406,338	7493390,496	104,677	0,018	0,015	0,009	0,052	0,001	0,005
Zachód	5°	5779406,402	7493390,510	104,673	0,008	0,014	0,005	0,012	0,013	0,009
	15°	5779406,421	7493390,510	104,678	0,010	0,009	0,004	0,031	0,013	0,004
	30°	5779406,467	7493390,505	104,678	0,020	0,011	0,008	0,077	0,008	0,004

Tab. 3. Wyniki kalibracji na tyczce dla wszystkich kierunków wychyleń

Kąt wychylenia	Współrzędne uśrednione			Odchylenie standardowe próbki			Różnica z pomiarem referencyjnym		
	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]
5°	5779406,410	7493390,500	104,684	0,012	0,011	0,004	0,020	0,003	0,002
15°	5779406,404	7493390,496	104,676	0,022	0,020	0,010	0,014	0,001	0,006
30°	5779406,396	7493390,488	104,679	0,028	0,027	0,011	0,006	0,009	0,003
Wszystkie	5779406,403	7493390,495	104,680	0,022	0,021	0,009	0,013	0,002	0,002

Tab. 4. Wyniki kalibracji na spodarce dla wszystkich kierunków wychyleń

Kąt wychylenia	Współrzędne uśrednione			Odchylenie standardowe próbki			Różnica z pomiarem referencyjnym		
	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]
5°	5779406,397	7493390,504	104,676	0,010	0,012	0,005	0,007	0,007	0,006
15°	5779406,390	7493390,498	104,674	0,026	0,023	0,006	0,000	0,001	0,008
30°	5779406,399	7493390,469	104,679	0,049	0,046	0,008	0,009	0,028	0,003
Wszystkie	5779406,395	7493390,490	104,676	0,033	0,034	0,007	0,005	0,007	0,006

znajdującej się na dachu siedziby firmy. Testy wykonano na punkcie państwowej osnowy szczegółowej nr 312.1579 (współrzędne katalogowe: X=5779406,40 m, Y=7493390,56 m, H=104,70 m). Punkt jest zlokalizowany w idealnych warunkach do testowania czujników pochylenia – w oddaleniu od kabli wysokiego napięcia i transformatorów, przy mało ruchliwej drodze, na otwartej przestrzeni (rys. 2). Nie ma zatem czynników mogących zakłócać lokalne pole elektromagnetyczne czy sam pomiar satelitarny.

Na początku wykonano pomiar referencyjny na punkcie osnowy metodą RTK bez użycia czujników pochylenia przez 120 epok. Otrzymano wynik X=5779406,390 m, Y=7493390,497 m, H=104,682 m z odchyleniem standardowym poziomym mniejszym niż 0,001 m i pionowym równym 0,001 m. Różnice współrzędnych wyniosły zatem: dX=0,010 m, dY=0,063 m, dH=0,018 m. Są to wartości spełniające wymogi rozporządzenia ministra spraw wewnętrznych i administracji z 9 listopada 2011 r. w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do PZGiK. Są one jednak znaczne, zwłaszcza we współrzędnej Y, zatem wyniki poniższych testów odniesione będą do pomiaru referencyjnego.

Pierwszy test polegał na wykonaniu serii pomiarów na tyczce wychylanej w każdą z czterech stron świata o kąt ok. 5°, 15° i 30°. Każdy pomiar składał

się z 30 epok obserwacyjnych (w sumie 360 odczytów). Wykonano dwa takie cykle pomiarów – pierwszy po kalibracji libeli elektronicznej na tyczce, a drugi – po kalibracji na spodarce. Chcieliśmy w ten sposób empirycznie wyznaczyć różnice między tymi sposobami kalibracji. Wyniki prezentujemy w tabelach 1 i 2.

Odchylenia standardowe poszczególnych serii wynoszą maksymalnie 2,5 cm w przypadku kalibracji na tyczce i 2,0 cm w przypadku kalibracji na spodarce, co oznacza, że rozrzut wartości wokół średniej nie jest duży. W większości przypadków widać, że im większy kąt wychylenia, tym większe odchylenie standardowe próbki. Takich wyników należało się spodziewać, gdyż przy większym kącie wychylenia narasta błąd wynikający z długości i kierunku redukcji współrzędnych. Porównując współrzędne uśrednione ze współrzędnymi z pomiaru referencyjnego, można zaobserwować podobny trend. Ciekawe jest to, że badanie nie wykazało istotnych różnic między kalibracją na spodarce a tą na tyczce. Pomiary te były jednak wykonywane o innych porach dnia, przez co warunki pomiarowe mogły się nieco różnić. Dlatego przy najbardziej precyzyjnych pracach rekomendujemy jednak, aby kalibrację wykonywać na spodarce – dzięki temu można mieć pewność, że elektroniczna libela działa poprawnie. Ponadto widać, że odchylenia standardowe współrzędnych H są niższe niż współrzędnych płaskich. Wynika to prawdopodobnie z tego, że współrzędna ta jest jednowymiarowa. W związku z tym

na jej redukcję wpływ ma jedynie długość wektora przesunięcia, a nie jego kierunek.

W tabelach 3 i 4 zestawiliśmy uśrednione współrzędne z kierunków N, S, E, W dla poszczególnych kątów. Podobnie jak poprzednio, możemy zaobserwować wyraźną tendencję do powiększania się odchylenia standardowego wraz ze zwiększającym się kątem wychylenia. W trosce o zachowanie najwyższej dokładności polecamy używać funkcji pomiaru współrzędnych na podstawie dwóch lub trzech wychyleń tyczki dostępnej w programie FieldGenius, z wykorzystaniem którego były przeprowadzone nasze testy. Polega ona na wyznaczeniu punktu na przecięciu okręgów o środkach w zmierzonych przez odbiornik punktach i promieniach o długości odpowiedniej dla kąta wychylenia i długości tyczki.

W kolejnym teście chcieliśmy sprawdzić, o ile pewniejsze pomiary można uzyskać, stosując metodę obliczenia współrzędnych z trzech wychyleń w różnych kierunkach. W tym celu pomierzono punkt osnowy 15 razy (każde wyznaczanie z trzech pomiarów – w sumie 45 pomiarów). Wyniki prezentujemy w tabeli 5. Milimetrowe różnice uśrednionych współrzędnych z pomiarem referencyjnym i nieduże odchylenia standardowe pokazują, że jest to bardzo pewna metoda pomiaru. Tym bardziej że na bieżąco można kontrolować poprawność wyników – jeśli któryś z trzech pomiarów będzie obciążony dużym błędem, okręgi po prostu się nie przetną.

Następnie postanowiliśmy zbadać, jak na dokładność wpływa transport samochodem, wyjęcie baterii i przechowanie sprzętu w biurze. Po pierwszej serii pomiarów wykonanej 10 listopada sprzęt został przewieziony do biura. Był tam przechowywany do 16 listopada, kiedy wykonaliśmy kolejne pomiary. Bez kalibracji ustawiliśmy instrument ponownie na tym samym punkcie i wykona-

Tab. 5. Wyniki wyznaczeń współrzędnych z trzech wychyleń tyczki

Współrzędne uśrednione			Odchylenie standardowe próbki			Różnica z pomiarem referencyjnym		
X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]
5779406,389	7493390,496	104,683	0,017	0,015	0,004	0,001	0,001	0,001

Tab. 6. Wyniki dla poszczególnych kierunków wychyleń bez kalibracji

Kierunek wychylenia	Kąt wychylenia	Współrzędne uśrednione			Odchylenie standardowe próbki			Różnica z pomiarem referencyjnym		
		X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]
Północ	5°	5779406,393	7493390,494	104,679	0,012	0,006	0,003	0,003	0,003	0,003
	15°	5779406,387	7493390,490	104,677	0,012	0,006	0,004	0,003	0,007	0,005
	30°	5779406,390	7493390,491	104,689	0,013	0,009	0,008	0,000	0,006	0,007
Południe	5°	5779406,393	7493390,510	104,679	0,004	0,009	0,003	0,003	0,013	0,003
	15°	5779406,391	7493390,538	104,678	0,014	0,010	0,007	0,001	0,041	0,004
	30°	5779406,400	7493390,565	104,694	0,010	0,010	0,007	0,010	0,068	0,012
Wschód	5°	5779406,406	7493390,503	104,682	0,010	0,006	0,002	0,016	0,006	0,000
	15°	5779406,448	7493390,511	104,682	0,007	0,006	0,004	0,058	0,014	0,001
	30°	5779406,528	7493390,506	104,690	0,021	0,009	0,008	0,138	0,009	0,008
Zachód	5°	5779406,385	7493390,501	104,680	0,006	0,008	0,004	0,005	0,004	0,002
	15°	5779406,381	7493390,503	104,678	0,011	0,020	0,003	0,009	0,006	0,004
	30°	5779406,407	7493390,510	104,682	0,022	0,022	0,009	0,017	0,012	0,000

Tab. 7. Wyniki dla wszystkich kierunków wychyleń bez kalibracji

Kąt wychylenia	Współrzędne uśrednione			Odchylenie standardowe próbki			Różnica z pomiarem referencyjnym		
	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]
5°	5779406,394	7493390,502	104,680	0,011	0,009	0,003	0,004	0,005	0,002
15°	5779406,402	7493390,510	104,679	0,029	0,021	0,005	0,012	0,013	0,003
30°	5779406,431	7493390,518	104,689	0,059	0,031	0,009	0,041	0,021	0,007
Wszystkie	5779406,409	7493390,510	104,682	0,042	0,023	0,008	0,019	0,013	0,000

liśmy pomiary składające się z 10 epok obserwacyjnych przy tyczce wychylonej w każdą z czterech stron świata o 5°, 15° i 30° (w sumie 120 pomiarów). Wyniki zestawione są w tabelach 6 i 7. Test nie wykazał rażących błędów wynikających z nieprzeprowadzenia kalibracji przed pomiarem. Aby jednak móc w pełni polegać na pomiarach, przed rozpoczęciem pracy należy wykonać kalibrację.

Ostatni z naszych testów miał na celu sprawdzenie wpływu zakłóceń pola elektromagnetycznego na działanie systemu pomiarowego. W tym celu przez 10 minut odbiornik znajdował się w pobliżu komory transformatora i linii wysokiego napięcia (rys. 3). Następnie po odejściu o ok. 500 m wykonano 120-epokowy pomiar referencyjny (odchylenie standardowe mniejsze niż 0,001 m poziomo i równe 0,001 m pionowo), a później w tym samym punkcie wykonano po 10 pomiarów przy kątach wychylecia 5°, 15° i 30°. Współrzędne uzyskane z pomiaru referencyjnego to: X=5778860,705 m, Y=7491196,205 m, H=105,862 m. Wyniki zaprezentowane są w tabeli 8.

Również ten test nie wykazał błędów spowodowanych przebywaniem w pobliżu obiektów mogących zakłócać lokalne pole elektromagnetyczne. Wskazuje to na dużą odporność systemu na takie zakłócenia. Nie należy jednak tego problemu bagatelizować – zalecamy zachowanie szczególnej ostrożności w takim „niebezpiecznym” terenie – np. poprzez wykonanie pomiaru dla kilku wychyleń tyczki.



Rys. 3. Miejsce o dużych zakłóceciach pola elektromagnetycznego

• Technologia przyszłości?

Czy należy zatem bać się Tilt Surveying? Przeprowadzone testy utwierdziły nas w przekonaniu, że jest to technologia, na której można polegać, pozwalająca na uzyskanie spójnych i powtarzalnych wyników. Jest ona zresztą od dawna wykorzystywana w innych branżach. Czujniki MEMS znajdują zastosowanie choćby w przemyśle samochodowym – do wyzwalania poduszek powietrznych w momencie wypadku, czy fotograficznym – do stabilizacji obrazu. Wielu z nas ma czujniki MEMS w swoim smartfonie. Mikroukłady elektromechaniczne same w sobie nie są nowością i są rozwijane już od ponad 20 lat – można więc powie-

dzieć, że jest to sprawdzona i dopracowana technologia. Jej zastosowanie w odbiorniku GNSS otwiera przed geodetami wiele nowych możliwości i może przyspieszyć i ułatwić realizację zadań, z którymi spotykamy się na co dzień. W moim odczuciu jest to największy krok naprzód w pomiarach RTK z punktu widzenia geodety od czasu wprowadzenia strumieni danych korekcyjnych GPS + GLO-NASS. Czy jednak w nieodległej przyszłości widok geodety mierzącego punkty niespoziomowanym odbiornikiem przestanie dziwić – to zależy wyłącznie od Państwa.

Tomaz Piegat
Geoprzymat

Tab. 8. Wyniki dla różnych kątów wychyleń po zakłóceciach pola elektromagnetycznego

Kąt wychylecia	Współrzędne uśrednione			Odchylenie standardowe próbki			Różnica z pomiarem referencyjnym		
	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]
5°	5778860,705	7491196,204	105,866	0,005	0,006	0,003	0,000	0,001	0,004
15°	5778860,712	7491196,201	105,871	0,009	0,012	0,003	0,007	0,004	0,009
30°	5778860,716	7491196,204	105,875	0,031	0,032	0,006	0,011	0,001	0,013
Wszystkie	5778860,711	7491196,203	105,870	0,019	0,020	0,006	0,006	0,002	0,008