

Prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego
02-093 Warszawa, ul. Pasteura 5

**Recenzja dorobku dr. Tomasza Suchodolskiego
z Centrum Badan Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk
w związku z postępowaniem habilitacyjnym**

1. Wstęp

Tomasz Suchodolski ukończył w 2002 roku studia licencjackie na kierunku *fizyka informatyczna* Wydziału Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, a w 2005 roku uzyskał dyplom magistra inżyniera kończąc studia II stopnia na kierunku *elektronika i telekomunikacja* Wydziału Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej. W roku 2014 na Wydziale Elektroniki PW obronił pracę doktorską pt. *Analiza sygnałów EMG za pomocą drzew decyzyjnych do sterowania bioprotezą dłoni*. Do czasu uzyskania stopnia doktora był współautorem trzech artykułów opublikowanych w czasopiśmie *Postępy robotyki, Prace naukowe, Elektronika* (nieujęte w wykazie czasopism naukowych MNiSW) i pięciu wystąpień wydrukowanych w materiałach konferencyjnych. Dwa z tych wystąpień odnotowane zostały w bazie *Web of Science*.

Od 2015 do chwili obecnej pracuje w Centrum Badan Kosmicznych PAN.

2. Osiągnięcie naukowe

Jako osiągnięcie naukowe w przewodzie habilitacyjnym w obszarze *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne* dr Tomasz Suchodolski przedstawił monografię pt. *Fuzja wielospektralnych informacji w sterowaniu ruchem dalmierza laserowego do wykrywania małych obiektów kosmicznych* wydaną w 2022 roku przez Akademicką Oficynę Wydawniczą EXIT oraz pięć artykułów tematycznie powiązanych z monografią.

Okoloziemiska przestrzeń kosmiczna jest silnie zaśmiecona. Szacuje się, że krąży w niej ok. 130 milionów odpadów: pozostałości raket, części statków kosmicznych, różne drobne ich elementy, ale także niedziałające satelity, a nawet wystrzelone w kosmos urny z prochami ludzi. Koszty wysyłania statków w kosmos są coraz niższe i coraz więcej państw (a nawet prywatnych firm) decyduje się na aktywną realizację swoich programów kosmicznych. Kwestia złomu kosmicznego stanowi więc istotne wyzwanie dla bezpieczeństwa lotów i eksploracji przestrzeni. Na przykład Międzynarodowa Stacja Kosmiczna wielokrotnie musiała zmienić kurs, aby uniknąć zderzenia z tego typu odpadami. Dlatego **monitorowanie ruchu tych obiektów w przestrzeni kosmicznej jest bardzo istotnym i aktualnym problemem naukowym, ważnym dla gospodarki, ale i bezpieczeństwa państw**. Jest ono istotne również dla pozyskiwania informacji o ziemskim polu grawitacyjnym, w tym o zmiennych w czasie współrzędnych geocentrum i współczynnikach pola, ruchu biegunów, długości doby czy wreszcie dla wiedzy o fundamentalnych stałych fizycznych.

W Polsce tą tematyką zajmuje się między innymi Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk posiadające Obserwatorium Astrogeodynamiczne w Borówcu, gdzie zatrudniony jest Habilitant. Działa ono w ramach sieci International Laser Ranging Service (ILRS). Znajdująca się w Obserwatorium stacja od lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku

realizuje śledzenie satelitów za pomocą dalmierza laserowego. Jednak układ ten charakteryzuje się stosunkowo niewielką czułością i umożliwia jedynie obserwację obiektów kosmicznych wytwarzających silne echo optyczne, a więc dużych i bliskich, ewentualnie wyposażonych w retroreflektory światła. Liczba takich obiektów jest stosunkowo niewielka. **Cel, jaki postawił sobie zespół Obserwatorium CBK PAN, dotyczył poszerzenia zakresu badawczego poprzez opracowanie metodyki i wprowadzenie rozwiązań umożliwiających w lidarowe pomiary odległości także do obiektów wytwarzające słabe echo optyczne: złomu kosmicznego, przedmiotów o niepewnej efemerydzie lub mało znanej orbicie, zazwyczaj niewyposażonych w retroreflektory światła.** Mając na celu powyższe w roku 2014 przystąpiono do modernizacji Obserwatorium.

Idea śledzenia złomu kosmicznego za pomocą lidarów po raz pierwszy została zrealizowana w roku 2002 w Australii. Od 2008 roku obserwacje tego rodzaju są prowadzone przez Chińską Akademię Nauk, a w 2011 roku rozpoczęto je w obserwatorium w Grazu (Austria). Inne europejskie laboratoria z aparaturą o parametrach porównywalnych z układami w Borówcu działają w Wettzell (Niemcy) i Zimmerwald (Szwajcaria).

Monografia wymieniona przez habilitanta jako podstawowe osiągnięcie naukowe dotyczy konstrukcji oraz implementacji dalmierza laserowego do wykrywania obiektów orbitalnych.

Po wstępie, przedstawiającym cel i układ dzieła, w rozdziale 2 zaprezentowano pokrótce główne techniki detekcji obiektów wokół Ziemi. W rozdziale 3 omówiono zjawiska fizyczne wpływające na ruch satelitów oraz sposób opisu ich orbit. Wyliczono 15 efektów zaburzających ruch keplerowski i podano wzory pozwalające na obliczenie tych dewiacji.

Rozdział 4 zawiera analizę niedokładności pomiaru pozycji obiektu spowodowaną różnymi czynnikami i autorskie podejście do tego problemu poprzez wykorzystanie kombinacji różnych sygnałów i informacji, co prowadzi do ilościowej poprawy pozyskiwanych danych oraz do precyzyjnego sterowania systemem dalmierza laserowego.

W rozdziale 5 przedstawiono konstrukcję nowego lidarów CBK PAN do pomiaru pozycji obiektów kosmicznych. Habilitant brał udział w tworzeniu tego układu. Nadajnik zawiera dwa lasery. Jeden, wytwarzający impulsy o dużej energii i nanosekundowym czasie trwania, pozwala wykrywać obiekty o słabym echu z metrową dokładnością. Drugi umożliwia ich detekcję z precyzją centymetrową, gdyż wytwarza impulsy pikosekundowe. Zastosowany został zautomatyzowany układ optyczny pozwalający alternatywnie i współosiowo wysłać wiązki światła z tych laserów, a także zmiennooogniskowy teleskop nadawczy umożliwiający regulację rozbieżności wiązki. Układ detekcyjny wykorzystuje teleskop o średnicy lustra 65 cm i precyzyjne multiscalery do zliczania impulsów echa fotonowego. Dzięki temu osiągnięto czułość ok. 60 tys. razy lepszą w porównaniu z systemem działającym w Borówcu od ubiegłego stulecia. Nowy system wyposażono w mechanizmy naprowadzania działające z dokładnością do sekund kątowych, co przekłada się na precyzję określania pozycji namierzanych obiektów. Układ został dowiązany do czasu UTC z dokładnością do 10^{-7} s.

W rozdziale tym pokazano też przykładowe pomiary przeprowadzone na stacji CBK PAN Borowiec: w dwóch przypadkach do satelitów (TOPEX/Poseidon i GLONASS-K) oraz stopnia rakiety CZ-2C (wyposażonej w odbłyśniki), a także do obiektów sklasyfikowanych, jako złom kosmiczny (stopnie rakiety. TITAN IVB i SL-16).

W rozdziale 6 opisano opracowane przez Habilitanta algorytmy sterowania dalmierzem laserowym. Powstały one, gdyż programy wykorzystywane na potrzeby pierwszego układu lidarowego stały się bezużyteczne. Dokonano w nich połączenia wielu danych o stanie obiektu, jego położeniu (wykorzystując wstępną informację o trajektorii ruchu z katalogu obiektów), włączając dane pochodzące z innych systemów obserwacji nieba, jak kamera pełnego nieba, informacje pogodowe, dane o położeniu słońca i księżyca i inne, a co najważniejsze – także aktualne dane pomiarowe, na bieżąco korygując nastawy lidarów do wyników obserwacji za pomocą pętli aktywnej korekty sterowania. Algorytm jest w stanie

przetworzyć te dane i skorygować nastawy systemu w czasie krótszym niż 0,1 s. Obserwacja obiektu pozwala uaktualnić informację o jego trajektorii i umożliwia aparaturze podążanie za obiektem. Jest to istotne, gdyż trajektoria podlega ciągłym zaburzeniom. Software decyduje Także o podjęciu emisji laserowej uwzględniając zarówno bezpieczeństwo przestrzeni powietrznej (z uwzględnieniem danych z radaru obserwacyjnego) jak i warunki pogodowe. Oprogramowanie to stanowi meritum osiągnięcia habilitacyjnego.

Klasycznie technika lidarowa pozwala określić tylko odległość do obiektu orbitalnego. Rozwiązanie zaproponowane przez Habilitanta zwiększa dokładność pozycyjną pomiaru, gdyż dostarcza informację o dodatkowych wymiarach przestrzennych. Algorytm aktywnej korekty sterowania uwzględnia też wyniki analizy zarejestrowanego śladu fotonowego powstałego poprzez rozproszenie wiązki laserowej od obiektu orbitalnego w kierunku stacji naziemnej. Jego znikome natężenie lub brak takiego śladu może stanowić przyczynek do uruchomienia procedury poszukiwania obiektu lub wykonanie stosownej korekty rozbieżności emitowanej wiązki laserowej w celu maksymalizacji liczby rejestrowanych fotonów. Taki sposób umożliwia śledzenie obiektów słabo - widocznych, o małym przekroju poprzecznym lub w przypadku braku ich oświetlenia odsłonecznego.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie przedstawionego materiału, w tym podsumowanie osiągnięć autora.

Do dorobku Habilitant dołączył również pięć artykułów naukowych. Publikacja pierwsza (jednoautorska) dotyczy wykorzystania obrazu dostarczanego przez kamerę *all sky* jako źródła dodatkowych informacji dla systemu wykrywania obiektów kosmicznych. Jest to istotne zarówno dla oceny pokrycia nieba obłokami, jak i dla oceny pozycji Słońca i Księżyca mających znaczenie dla uwidocznienia trajektorii orbitujących obiektów. Wszystko to w połączeniu z innymi (wymienionymi już) udoskonaleniami wprowadzonymi przez Habilitanta pozwala zwiększyć wydajność i precyzję pomiaru. Publikacja 2 (również jednoautorska) zawiera opis oprogramowania sterującego lidarem na stacji Borowiec. Publikacja 3 (2022) przedstawia dorobek obserwacyjny zespołu z obserwatorium CBK PAN w Borowcu w latach 1993–2019 za pomocą pierwszego lidaru. Wymieniony w niej wkład dr. Tomasza Suchodolskiego polegał na przeprowadzaniu pomiarów, konserwacji danych i ich analizie. Publikacja 4 (2018) donosi o pierwszej w Polsce laserowej obserwacji złomu kosmicznego. Dr T. Suchodolski jest tu drugim autorem. Publikacja 5 (2021) dotyczy koncepcji międzynarodowej sieci obserwatoriów śledzących złom kosmiczny na niskich orbitach. Artykuł ten (19 autorów) jest rezultatem współpracy w zespole *Space Debris Study Group* przy ILRS.

3. Ocena osiągnięcia naukowego

Myślę, że monografia, będąca podstawową pozycją opisującą działalność Habilitanta, udowadnia, że dorobek dr. Tomasza Suchodolskiego zawiera osiągnięcie naukowe stanowiące istotny wkład w rozwój dyscypliny, jaką jest laserowe śledzenie kosmicznych obiektów orbitujących. Działalność ta popchnęła pomiary kosmiczne w stacji Borowiec na inny, wyższy poziom. W laboratorium tym nastąpił jakościowy i ilościowy skok w dokonywaniu pomiarów pozycyjnych obiektów orbitalnych.

W tekście monografii zauważone zostały pewne drobne błędy i niedostatki, które nie obniżają jej wartości naukowej:

- Str. 32 - stała grawitacji Ziemi ? Stała grawitacji jest uniwersalna – nie jest to wielkość tylko dla Ziemi.
- Str. 66 – tabela 4.2 - podawanie pewnych wielkości, jak przekroje czynne obiektu, liczby fotonów (w tym na sekundę), z czterocyfrową a nawet siedmiocyfrową

dokładnością jest błędne, gdyż ich niepewności wynoszą zwykle od kilku do kilkadziesiąt procent.

- Str 84 – czas przebiegu sygnału przez kabel o długości 30 cm wynosi nie 1 ns a około 1,5 ns, bo prędkość fali elektromagnetycznej w kablu - to blisko 200 tys. km/s.
- Str. 85 - nie jest jasne, dlaczego błąd czasu propagacji sygnałów przez instrumenty stacji Borowiec nie może być kompensowany w najprostszy sposób: przez skierowanie odpowiedniej (zazwyczaj bardzo małej) porcji błyski laserowego – np. rozproszonego w aparaturze nadawczej na jakimkolwiek elemencie, wprost do układu odbiorczego, np. za pomocą światłowodu. Dzięki temu uzyskuje się rejestrację czasu t_{start} i t_{stop} z użyciem tej samej aparatury i błąd odczytu odległości jest zredukowany. Autor ten prosty sposób pominął. Oczywiście, kalibracja (o której wspomina autor) za pomocą odpowiedniej tarczy geodezyjnej jest również wskazana, bo im więcej pomiarów – tym mniejsza niepewność wyniku.

W grupie artykułów, które habilitant dołączył do osiągnięcia naukowego, nie wszystkie są powiązane tematycznie w sposób wystarczająco bliski. Niewątpliwie, ich tematem jest obserwacja obiektów w bliskiej przestrzeni kosmicznej, ale jednak z tytułem dzieła *Fuzja wielospektralnych informacji w sterowaniu ruchem dalmierza laserowego do wykrywania małych obiektów kosmicznych* - poza monografią – powiązane są dwie pierwsze oraz czwarta praca. Trzecia opisuje obserwacje w większości obserwacje zrealizowane przed zatrudnieniem dr. T. Suchodolskiego w CBK PAN i za pomocą lidar, który nie był przeznaczony do śledzenia złomu kosmicznego. System ten nie wykorzystywał oprogramowania Habilitanta, a on sam nie uczestniczył w jego budowie. Niewiele wspólnego z tematem osiągnięcia ma też artykuł nr 5 o koncepcyjnym studium międzynarodowej sieci lidarowej; trudno także przyjąć, że przy powstawaniu tej pracy rola dr. T. Suchodolskiego w 19-osobowym zespole autorów była wiodąca.

Mimo tej krytyki uważam, że przedstawione przez dr. Tomasza Suchodolskiego osiągnięcie naukowe w postaci omówionej powyżej grupy publikacji spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym związane z nadaniem stopnia doktora habilitowanego.

3. Ocena pozostałego dorobku naukowego (po uzyskaniu stopnia doktora)

Oprócz prac wyżej wymienionych dr Tomasz Suchodolski jest współautorem 6 innych artykułów naukowych napisanych w zespołach wieloautorskich. Łącznie habilitant ma w swym dorobku 11 artykułów naukowych i monografię. Artykuły te zostały wydrukowane w indeksowanych czasopismach naukowych, w większości o wysokich współczynnikach *impact factor*. Ogółem, do czasu złożenia dokumentów przewodu habilitacyjnego, (XII 2022 r.) publikacje te były cytowane 78 razy, w tym 70 razy bez autocytowań. Jego indeks Hirscha wynosi 5. Oceniając te parametry naukowometryczne należy wziąć pod uwagę, że w dziedzinie pomiarów kosmicznych dr Tomasz Suchodolski rozpoczął działalność dopiero w roku 2015, a także to, że grono naukowców zajmujących się śledzeniem obiektów kosmicznych jest stosunkowo mało liczne.

Ponad to, po uzyskaniu stopnia naukowego doktora Habilitant zaprezentował na spotkaniach międzynarodowych jeden referat, a poza tym był współautorem sześciu komunikatów konferencyjnych.

W autoreferacie Habilitant podał, że wykonał projekty oraz uruchomił szereg konstrukcji z obszaru automatyki oraz elektroniki, jak:

- opracowanie i uruchomienie nowatorskiego systemu dalmierza laserowego nr 2 do śledzenia satelitów, członów raket, śmieci kosmicznych, znajdujących się w odległościach od 80 km do 42000 km, z wykorzystaniem teleskopu o średnicy lustra 65 cm, a w tym:

- opracowanie i wykonanie systemu sterowania 2 osiowym montażem teleskopu
- opracowanie i wykonanie systemu przeniesienia napędu 2 osi,
- opracowanie i wykonanie układu optycznego wraz z osprzętem

i inne, dotyczące algorytmu. Musze się odnieść krytycznie do takiego sposobu przedstawiania dorobku ^{1/}. Tak sformułowane zdania sugerują, że wymienione tu osiągnięcia są osobistym dziełem Habilitanta, a przynajmniej powstały przy jego głównym wkładzie. Nie przedstawiono na to żadnego dowodu – ani w publikacjach ani w monografii – żadnych dokumentów czy rysunków potwierdzających wymienione prace projektowe i konstrukcyjne. Zbudowanie i uruchomienie dalmierza nr. 2 w Obserwatorium w Borówcu jest osiągnięciem całego zespołu. Nie ma wątpliwości, że wkładem autora w prezentowany zakres zagadnień jest opracowany przez niego autorski algorytm sterowania dalmierzem laserowym do wykrywania i określania pozycji obiektów orbitalnych o słabym echu. Potwierdzone to zostało w załączonych oświadczeniach współpracowników z Obserwatorium Astrogeodynamicznego, gdzie mówi się przede wszystkim o opracowaniach programistycznych habilitanta. Nie ma też wątpliwości, że wraz z całym zespołem brał udział w budowaniu dalmierza nr. 2. Ale o tych innych dokonaniach wspomina się w oświadczeniach w sposób bardzo ogólnikowy. Chyba najlepiej ujął to swej w opinii dr. Stefan Scharring: *Tomasz Suchodolski's participation consisted in a systematic review of station requirements and technological solutions for laser tracking and ranging to space debris.*

Habilitant prowadzi też międzynarodową działalność naukową. Brał udział w projektach Europejskiej Agencji Kosmicznej, w permanentnej realizacji zadań Międzynarodowej Służby Pomiarów Laserowych (ILRS/NASA). W latach 2019 – 202, jako ekspert i delegat Polskiej Agencji Kosmicznej, uczestniczył w programie *EU Space Surveillance and Tracking* powołanym przez Komisję Europejską. Od roku 2017 jest członkiem grupy *Space Debris Study Group* przy ILRS nakreślającej kierunki rozwoju międzynarodowej sieci lidarowej na potrzeby detekcji złomu kosmicznego. Brał też udział w projekcie *Web-based sensor planning tools SST* zleconym przez Europejską Agencję Kosmiczną, którym dane laserowe CBK PAN posłużyły do walidacji sensorów optycznych należących do ESA i krajów stowarzyszonych.

W *Wykazie osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny* Habilitant wymienił, – jako udział w stażach - kilka wyjazdów zagranicznych odbytych w latach 2016 – 2019. Recenzent uważa, że te najczęściej 3-dniowe wizyty (najkrótsza 1 dzień, najdłuższa 6 dni) trudno nazwać stażami. Jest to jeszcze jedna niedokładna informacja zawarta w przedstawionej dokumentacji.

4. Ocena dorobku organizacyjnego i dydaktycznego i popularyzatorskiego

Jako działalność dydaktyczną dr Tomasz Suchodolski przedstawił opiekę nad młodzieżą szkolną: dwukrotnie w ramach miesięcznych zawodowych praktyk uczniów szkół średnich w latach 2018 - 19 oraz 3 – tygodniową opiekę nad stażem zawodowym 3 osób w ramach akcji *Czas zawodowców – zawodowa Wielkopolska*. Należy tutaj wziąć pod uwagę, że w przypadku zatrudnienia w ośrodku badawczym znajdującym się poza dużym miastem i w jednostce, która nie jest uczelnią, możliwość działalności dydaktycznej jest w znacznym stopniu ograniczona. Habilitant ma też w swym dorobku epizody związane z popularyzacją nauki: prelekcje w radio, wystąpienia telewizyjne, prelekcje w *Polish Network Operation Group* (2017 i 19) i artykuły prasowe.

Jest 5- krotnym laureatem nagrody Dyrektora CBK PAN za uruchomienie 1-go i 2-go dalmierza laserowego i za efektywność pomiarów.

¹ Uwaga ta dotyczy autoreferatu, a więc nie wpływa na ocenę osiągnięci naukowego.

5. Podsumowanie

Zgodnie z *Prawem o szkolnictwie wyższym i nauce (...)*^{2/} stopień doktora habilitowanego nadaje się osobie, która posiada w dorobku osiągnięcia naukowe stanowiące znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny, w tym co najmniej 1 monografię naukową (...).

- 1 cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych (...) opublikowanych w czasopismach naukowych (...)

- 1 zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne (...) ^{3/}

- wykazuje się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej (...), w szczególności zagranicznej.

Przedstawione powyżej fakty i liczby świadczą, że dorobek dr. Tomasza Suchodolskiego spełnia powyższe wymagania. Jest on aktywnym pracownikiem naukowym i specjalistą, w szczególności w dziedzinie oprogramowania układów sterujących laserowymi dalmierzami do śledzenia obiektów kosmicznych jak i analizy dostarczanych przez te układy danych. Sam dorobek – monografię oraz cykl publikacji, stanowiące wymagane przez ustawę osiągnięcie naukowe, uważam za nowoczesny i nowatorski, zawierający wiele ważnego materiału naukowego w zakresie lidarowej detekcji obiektów kosmicznych i potwierdzający, że działalność Habilitanta w znacznym stopniu przyczyniła się do rozwoju możliwości doświadczalnych i naukowego rozwoju Obserwatorium Astrogeodynamicznego CBK PAN, umożliwiając temu laboratorium podjęcie najbardziej aktualnego w skali międzynarodowej problemu śledzenia obiektów orbitalnych: detekcji złomu kosmicznego.

W mojej opinii dr Tomasz Suchodolski spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi związane z nadaniem stopnia naukowego doktora habilitowanego. Widoczny jest systematyczny rozwój naukowy Habilitanta, który od czasu podjęcia pracy w CBK PAN (2015 r.) regularnie publikuje wyniki na łamach czasopism z listy filadelfijskiej, właściwych dla specjalności, którą uprawia. Ostatnie jedno-autorskie prace są wynikiem jego własnego dorobku. Habilitant bierze także czynny udział w działalności dydaktycznej i popularyzatorskiej oraz organizacyjnej – w tym ostatnim zakresie na forum międzynarodowych organizacji zajmujących się badaniem kosmosu.

Wniosuję o dopuszczenie kandydata do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

Tadeusz Stacewicz



² Dz. U. z 2023 r. poz. 742, 1088

³ Szkoda, że ustawodawca nie wymienił tutaj jasno osiągnięcia w postaci oprogramowania. Algorytmy sterowania i kontroli są obecnie niemniej ważną częścią konstrukcji czy technologii, szczególnie w zakresie automatyki, elektroniki i wielu innych dziedzin.