

Wojciech SKIERUCHA, Andrzej WILCZEK

INSTYTUT AGROFIZYKI PAN, LUBLIN

Polowy system monitorowania wilgotności gleby

Dr hab. inż. Wojciech SKIERUCHA

Wojciech Skierucha urodził się w 1956 r. w Lublinie. Tytuł magistra inżyniera elektronika uzyskał w 1980 r. po ukończeniu studiów w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Od 1985 r. pracuje w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie, obecnie na stanowisku docenta. Jego zainteresowania koncentrują się na rozwoju czujników i systemów monitorowania wielkości fizyko-chemicznych w zastosowaniu do wielofazowych materiałów porowatych, takich jak gleba.

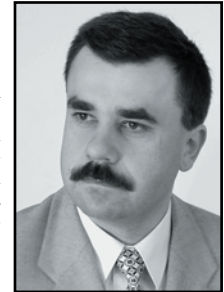
e-mail: w.skierucha@demeter.ipan.lublin.pl



Mgr Andrzej WILCZEK

Andrzej Wilczek urodził się w 1972 r. w Lublinie. Tytuł magistra fizyki uzyskał w 1998 r. po ukończeniu studiów na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. Od 2003 r. pracuje w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie, na stanowisku fizyka. Jego zainteresowania koncentrują się na rozwoju czujników, metod pomiaru oraz aparatury pomiarowej do badania właściwości fizyko-chemicznych materiałów porowatych, szczególnie właściwości dielektrycznych gleby.

e-mail: awilczek@demeter.ipan.lublin.pl



Streszczenie

Znajomość parametrów fizyko-chemicznych gleby takich jak wilgotność, zasolenie oraz temperatura umożliwia dokonanie analiz zasobów wodnych, zawartości składników odżywczych roślin i ich przemieszczania w profilu glebowym oraz ocenę pojemności cieplnej gleby. Monitoring wilgotności gleby w obecnym czasie staje się bardzo poważnym zagadnieniem w świetle zmniejszania się zasobów wodnych. W czasie, gdy coraz częściej mamy do czynienia z anomaliami pogodowymi związanymi z nadmiarem wody albo jej długotrwałym brakiem, monitorowanie jej zawartości w wierzchnich warstwach gleby i profilu glebowym zaczyna odgrywać decydującą rolę umożliwiającą modelowanie oraz weryfikację modeli i dostarczając informacji potrzebnych do interpretacji zdjęć satelitarnych. W pracy przedstawiono polowy system monitoringu wilgotności, elektrycznej przewodności oraz temperatury gleby mierzonych za pomocą zintegrowanej sondy reflektometrycznej. Pomiary przenikalności dielektrycznej realizowane są w częstotliwości z zakresu kilkuset kiloherców, dzięki czemu unika się wpływu zasolenia gleby. Obecnie prace nad rozwojem systemu koncentrują się na ulepszaniu istniejących czujników przez wprowadzenie możliwości identyfikacji, przetwarzania sygnału mierzonego i zwiększenia możliwości obliczeniowych w bezpośredniej bliskości obiektu mierzonego, jak również wyposażeniem tych czujników w moduły komunikacji bezprzewodowej na krótką odległość.

Słowa kluczowe: monitoring gleby, reflektometria czasowa, komunikacja bezprzewodowa, sonda inteligentna

Field soil moisture monitoring system

Abstract

Knowledge of the soil physico-chemical parameters, such as moisture, salinity and temperature enables evaluating water reserves, plant nutrients and their movement in the soil profile as well as soil heat capacity. Monitoring of soil moisture becomes a vital issue at the moment, when weather anomalies connected with the abundance or shortages of water are reported. The monitoring of the amount of water content in the upper soil layer together with other soil parameters, that do not change rapidly in time, allows modelling and validation of existing models of mass and energy transport in the soil and it is necessary for interpretation of satellite data. The study presents a field monitoring system of soil moisture, electrical conductivity (salinity) and temperature measured by an integrated reflectometric probe. This probe measures dielectric permittivity of surrounding medium in the frequency of hundreds of megahertz and therefore the results are not influenced by soil salinity. At present work on the system concentrates on improving

existing sensors by introducing identification, conversion and computation facilities to the measured object as close as possible, as well as providing the sensors with a short range wireless communication.

Keywords: soil monitoring, time-domain reflectometry, wireless communication, intelligent sensor

1. Wstęp

Większość dotychczasowych danych o glebie została zebrana w celach rolniczych, a powstanie największych glebowych banków danych w Europie (Wielka Brytania, Francja, Holandia, Dania, itd.) usprawiedliwione było (oraz finansowane) z pilnej potrzeby zwiększenia produkcji rolniczej po II Wojnie Światowej [5]. Inny ważny powód zbierania informacji o glebie był ściśle ekonomiczny polegający na jej komercyjnej wycenie. Ochrona gleby jako elementu środowiska przyrodniczego była przyczyną zainicjowania w roku 1980 krajowego programu mapowania gleb w Norwegii po zaobserwowaniu zatrucia części Morza Północnego splotem powierzchniowym z gleb nawożonych związkami azotu i fosforu i związanej z tym erozji gleb. Programy monitorowania gleb w Europie, chociaż powszechne, są jednak ograniczone do obszaru danego kraju. Istnieje, zatem potrzeba połączenia tych programów w ramach wspólnej Europy.

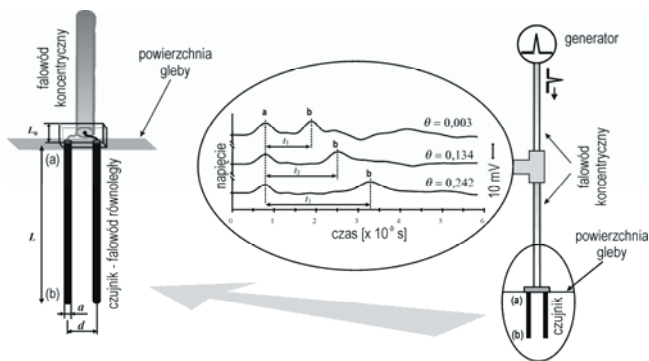
Większość parametrów fizyko-chemicznych gleby, będących wskaźnikami jej jakości z punktu widzenia wartości produkcyjnej i czystości środowiska przyrodniczego zależna jest od jej wilgotności. Woda jest nie tylko elementem niezbędnym do przemian biologicznych warunkujących rozwój fauny i flory, stanowi również medium transportu składników odżywczych i energii cieplnej w glebie. Wody zawarta w glebie wpływa w sposób podstawowy na wielkość produkcji rolniczej, ale również na pogodę i klimat.

Znajomość parametrów fizyko-chemicznych gleby takich jak wilgotność, zasolenie oraz temperatura umożliwia dokonanie analiz zasobów wodnych, zawartości składników odżywczych roślin i ich przemieszczania w profilu glebowym oraz ocenę pojemności cieplnej gleby. Dostosowanie parametrów gleby dla potrzeb roślin na dużych obszarach rolniczych nazywane rolnictwem precyzyjnym wymaga optymalnego doboru powyższych parametrów. Dzięki odpowiedniemu dawkowaniu nawozów uzyskiwane są efekty zarówno ekonomiczne, ale również chroni się środowisko przyrodnicze, gdyż zapobiega się występowaniu w glebie nadmiaru nawozów, które mogłyby przedostać się do wód gruntowych, w efekcie zanieczyszczając zbiorniki wodne i rzeki. Monitoring wilgotności gleby w obecnym czasie staje się bardzo poważnym zagadnieniem w świetle zmniejszania się zasobów wodnych. W obecności narastających anomalii pogodowych związanych z nadmiarem wody albo jej długotrwałym brakiem, monitorowanie jej zawartości w wierzchnich warstwach gleby oraz w profilu glebowym zaczyna odgrywać decydującą rolę

umożliwiająca modelowanie i weryfikację modeli oraz dostarczając informacji potrzebnych do interpretacji zdjęć satelitarnych. Prognozowaniu pogody oparte na analizie parametrów ciśnienia, temperatury oraz wilgotności powietrza okazuje się bardziej dokładne, jeśli będzie uwzględniało także parametry związane z powierzchnią Ziemi, takie jak wilgotność w profilach glebowych oraz rozkład temperatur, dzięki którym można ocenić poziom buforowania wody jak i zgromadzonej w glebie energii cieplnej. Monitoring wilgotności gleby w powiązaniu z pomiarami meteorologicznymi (stacje agro-klimatyczne) umożliwia prognozowanie rozwoju niektórych chorób roślin.

2. Reflektometryczna metoda pomiaru wilgotności materiałów porowatych

Idea pomiaru wilgotności metodą TDR przedstawiona jest na Rys. 1. Sonda składa się z dwóch połączonych elektrycznie falowodów: koncentrycznego oraz równoległego, zwanego dalej czujnikiem, utworzonego przez dwa równoległe metalowe pręty długości L umieszczone w glebie. Inicjalny szpilkowy impuls napięcia o czasie narastania i opadania ok. 200 ps biegnie z generatora w kierunku czujnika. Rejestrator zapisuje jego przebieg, gdy mija on rozdzielacz.



Rys. 1. Metoda TDR do wyznaczania wilgotności gleby – zasada działania
Fig. 1. TDR method for the determination of soil water content – principle of operation

W połączeniu falowodu koncentrycznego z czujnikiem (a) występuje nieciągłość (skok) impedancji. Impedancja falowodu koncentrycznego, Z_0 , jest niezmienna i zależy od typu zastosowanego przewodu. Impedancja czujnika, Z , zbudowanego z dwóch umieszczonych w glebie równoległych prętów, zależy od warunkowanej wilgotnością, θ , przenikalności dielektrycznej, $\varepsilon(\theta)$, gleby. Rys. 1 przedstawia również trzy reflektogramy (napięcie w funkcji czasu w wybranym punkcie falowodu koncentrycznego) dla czujnika umieszczonego w piasku suchym, wilgotnym oraz nasyconym wodą. Widać, że czas propagacji impulsu t potrzebny na pokonanie przez impuls odcinka drogi w glebie równego podwójnej długości prętów czujnika $2L$ rośnie ze wzrostem wilgotności gleby. Czas ten jest wyznaczany z zapisanego przez rejestrator reflektogramu.

Zakładając pomijalne właściwości magnetyczne gleby oraz brak wpływu jej przewodnictwa elektrycznego na prędkość propagacji, v , fal elektromagnetycznych (EM), prawdziwa będzie zależność [7]:

$$v = \frac{2L}{t} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} = \frac{c}{n} \quad (1)$$

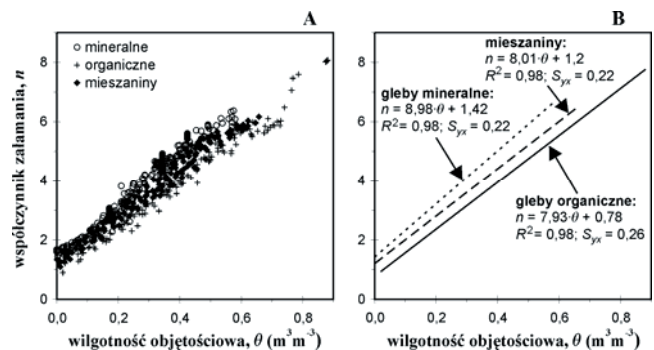
gdzie: $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ to prędkość propagacji fal EM w próżni, ε - częścią rzeczywistą względnej zespolonej przenikalności dielektrycznej gleby, n - współczynnikiem załamania fal EM dla gleby. Znając współczynnik załamania, n , dla gleby można wyznaczyć jej wilgotność z empirycznej relacji $n(\theta)$ albo $\varepsilon(\theta)$.

Elektryczną konduktywność materiału oblicza się z pomiarów amplitudowych reflektogramu. Impuls napięcia elektrycznego,

U_{in} , który wchodzi w glebę, jest w momencie jej opuszczania, po odbiciu się od końca prętów i pokonaniu drogi $2L$, stłumiony do poziomu U_{out} . Stosunek tych dwu amplitud wyznacza elektryczną konduktywność gleby [1]:

$$\sigma = \frac{1}{120 \pi L} \ln \left(\frac{U_{in}}{U_{out}} \right) \sqrt{\varepsilon} \quad (2)$$

Ze względu na krótkie czasy propagacji impulsu elektrycznego wzdłuż sondy TDR, ich pomiar wykonywany jest przy pomocy techniki stosowanej w oscyloskopach stroboskopowych szerokopasmowych. Opisany przyrząd pomiarowy, opracowany, wykonany oraz oprogramowany został w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie i szczegółowo przedstawiony jest w [3].



Rys. 2. Zależność współczynnika załamania n dla gleby od jej wilgotności θ (wyznaczonej referencyjną metodą termogravimetryczną) na przykładzie próbek gleb mineralnych, organicznych oraz ich mieszanin. A - dane eksperymentalne, B - regresja $n(\theta)$.

Fig. 2. Relation between the soil refractive index n and its moisture (determined by thermogravimetric method) for mineral, organic soils and their mixtures. A - experimental data, B - regression $n(\theta)$

Rys. 2A ilustruje zależność $n(\theta)$ dla próbek mineralnych, organicznych oraz dla mieszanin torf-pył i torf-piasek. Widać, że dane stanowią odrębne podzbiory nie tylko w obrębie rodzaju, ale również w płaszczyźnie rysunku. Dla dyskutowanego tu całego zbioru danych, jak również dla jego wspomnianych podzbiorów znaleziono równania regresji. Rys. 2B zawiera ich parametry: przesunięcie, nachylenie, współczynnik determinacji R^2 oraz błąd standardowy oszacowania S_{yx} . Widać, że przesunięcia jak również nachylenia wpasowanych prostych znacznie się różnią dla poszczególnych podzbiorów. Obydwa te parametry są najmniejsze dla próbek gleb organicznych, a największe dla mineralnych. Wynika stąd, że zależność $n(\theta)$ jest warunkowana parametrami stałej fazy gleby, a zwłaszcza jej porowatością lub gęstością.

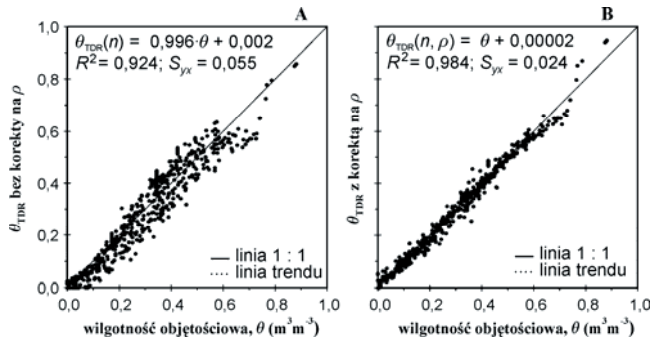
Zależności (3) oraz (4) stanowią kalibrację metody wyznaczania wilgotności objętościowej gleby z pomiarów współczynnika załamania n dokonanych miernikiem reflektometrycznym.

$$\theta_{TDR}^n = 0,134 \cdot n - 0,182 \quad (3)$$

$$\theta_{TDR}^{n,\rho} = \frac{n - 0,573 - 0,582 \cdot \rho}{7,755 + 0,792 \cdot \rho} \quad (4)$$

Druga z tych zależności uwzględnia empiryczną korektę na gęstość gleby ρ (g cm^{-3}). Efekt działania korekty na gęstość gleby przedstawiają Rys. 3A i B. Równe jednostki nachylenia i bliskie zera przesunięcie aproksymowanej linii trendu, mała wartość standardowego błęd oszacowania S_{yx} oraz znacznie mniejsze rozproszenie wyników wokół prostej $y = x$ weryfikują model (4) jako równanie kalibracji reflektometrycznego pomiaru objętościowej wilgotności gleby.

Metodyka wyznaczania wilgotności innych materiałów porowatych, takich jak ziarno zbóż [2] z wykorzystaniem metody reflektometrycznej jest podobna do tej, jaką zastosowano do gleby.



Rys. 3. Porównanie wartości wilgotności gleby, θ_{TDR} , policzonych z pomiarów współczynnika n na podstawie modeli (3) – część A oraz (4) – część B, z wartościami θ wyznaczonymi metodą termogravimetryczną

Fig. 3. Comparison of soil moisture values, θ_{TDR} , calculated from the measured refractive index n on the base of models (3) – part A and (4) – part B, with real data θ determined by thermogravimetric method

3. Opis sprzętu i oprogramowania

Prace nad rozwojem metod pomiarowych i aparatury służących do monitorowania statusu wody w glebie prowadzone są w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie od wielu lat. Ich efektem jest opracowanie i wdrożenie do produkcji metody reflektometrycznej [3,6] i odpowiednich przyrządów do pomiaru wilgotności objętościowej, elektrycznej konduktywności oraz temperatury gleby wyznaczanych w tym samym czasie i z tej samej objętości gleby.

Rys. 4 przedstawia zasilany bateryjnie ręczny miernik wilgotności (w technologii TDR), temperatury i elektrycznej konduktywności (zasolenia) gleby typu FOM/mts. Przyrząd ten mierzy wspomniane wielkości przy pomocy sond polowych i laboratoryjnych, odpowiednio typu FP/mts i LP/mts [4]. Przyrząd wyposażony jest w wyświetlacz ciekłokrystaliczny o rozdzielczości 160 x 128 pikseli, który w połączeniu z klawiaturą membranową i oprogramowaniem, stanowi wygodny interfejs użytkownika.



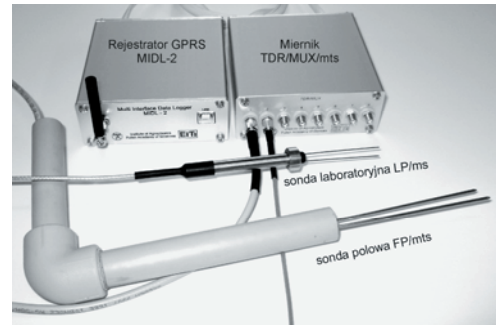
Rys. 4. Ręczny miernik wilgotności gleby
Fig. 4. Handheld soil moisture meter

Po każdym pomiarze wyświetlany jest reflektogram, którego analiza umożliwia ocenę wstępną danego punktu pomiarowego.

Podstawowe parametry miernika ręcznego są następujące:

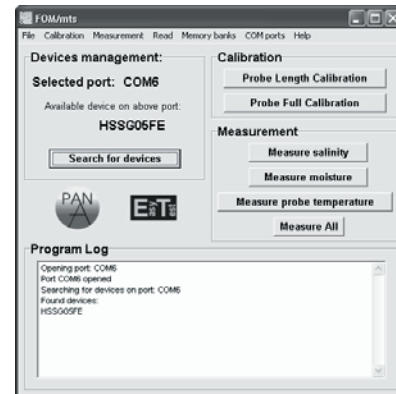
- lekka przenośna obudowa (180 x 85 x 58 mm, 300 g),
- możliwość rejestracji i pamiętania do 1000 odczytów,
- pracuje z sondami o różnej długości kabla (1,5 ÷ 9,5 m),
- klawiatura, wyświetlacz LCD i przyjazne oprogramowanie,
- opcjonalnie wyposażony w moduł GPS,
- połączenie sprzęgiem USB z komputerem osobistym,
- zasilanie akumulatorem litowo-polimerowym,
- impuls TDR: kształt $-\sin^2$, czas narastania/opadania 200 ps (od 10% do 90% amplitudy impulsu),
- zakres pomiarowy:
 - o wilgotności gleby: 0 ÷ 100%
 - o temperatury gleby: -20 ÷ 50°C
 - o elektrycznej konduktywności gleby: 0.0 ÷ 1 Sm⁻¹
- dokładność (wartości maksymalne):
 - o błąd pomiaru wilgotności: ±2% wartości odczytanej (tzn. dla odczytu 20% wilgotności objętościowej wart. rzeczywista wynosi od 18% do 22%),
 - o bezwzględny błąd pomiaru temperatury: ±0.5°C,

- o względny błąd pomiaru elektrycznej konduktywności: ±10% dla zakresu 0 ÷ 1 Sm⁻¹,
- czas pomiaru: mniej niż 5 s.



Rys. 5. Elementy systemu monitorowania wilgotności gleby
Fig. 5. Elements of soil moisture monitoring system

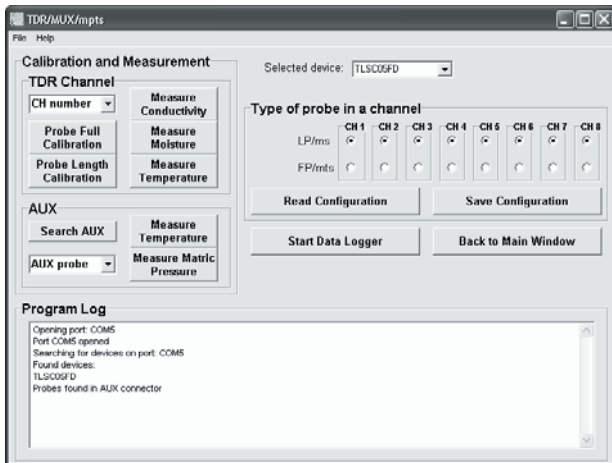
W skład stacjonarnego systemu monitorowania wilgotności gleby wchodzi dwa urządzenia: TDR/MUX/mpts – reflektometryczny 8-kanalowy miernik wilgotności oraz MIDL-2 – moduł rejestratora danych wyposażony w modem GPRS. Oba te przyrządy razem z sondami reflektometrycznymi: laboratoryjną (LP/mts) i polową (FP/mts) przedstawione są na Rys. 5.



Rys. 6. Okienko robocze dla ręcznego miernika FOM/mts
Fig. 6. Operation window for FOM/mts handheld meter

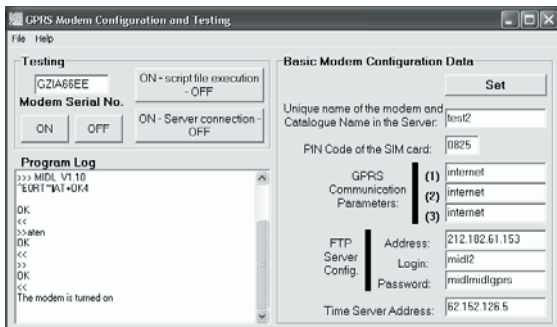
Miernik TDR/MUX/mpts oprócz pomiaru wilgotności, temperatury oraz elektrycznej konduktywności gleby (zintegrowaną sondą FP/mts lub LP/mts) umożliwia pomiar potencjału matrycowego wody glebowej i temperatury przez zastosowanie dodatkowego wejścia pomiarowego typu 1-Wire [4]. Parametry każdego z kanałów miernika TDR/MUX/mpts są takie same jak miernika ręcznego FOM/mts. Oba mierniki można sterować bezpośrednio z komputera PC poprzez sprzęg USB przy pomocy programu *ET USB Communicator*. Program ten rozpoznaje po numerze seryjnym typ przyrządu dołączonego do komputera i wyświetla odpowiednie okienko robocze, którego wygląd dla przyrządu FOM/mts przedstawia Rys. 6, dla przyrządu TDR/MUX/mpts – Rys. 7, dla rejestratora MIDL-2 – Rys. 8. Przy pomocy tych okienek użytkownik może dokonać przydzielenia typu mierzonej sondy do określonego kanału lub skalibrować sondy w kanałach [4]. Okienko programu przedstawione na Rys. 8 służy do konfiguracji modemu GPRS, który posiada funkcje składowania danych i cyklicznego łączenia z serwerem internetowym umieszczonym w IA PAN w Lublinie.

Przykładem zastosowania przedstawionego systemu jest wykorzystanie urządzenia MIDL-2 do przesyłania danych zebranych przez moduł reflektometryczny miernika TDR/MUX/mts (Rys. 9). Układ mierzy wilgotność, θ , temperaturę, T , i zasolenie gleby, σ , wykorzystując sondy pomiarowe umieszczone na różnych wysokościach w glebie. Zbierane wyniki gromadzone są w pamięci urządzenia MIDL-2 i w zadanym czasie wysyłane modemem GPRS do serwera internetowego.



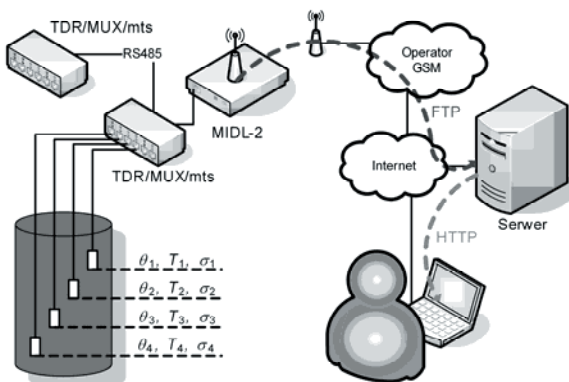
Rys. 7. Okienko robocze dla miernika TDR/MUX/mpts
Fig. 7. Operation window for TDR/MUX/mpts meter

Dane na serwerze dostępne są dla użytkownika za pośrednictwem Internetu. Po zalogowaniu się w serwisie możliwe jest śledzenie wyników pomiaru lub zmiana konfiguracji eksperymentu pomiarowego.



Rys. 8. Okienko programu do konfiguracji i testowania modułu funkcji komunikacji bezprzewodowej GPRS z serwerem internetowym w rejestratorze MIDL-2
Fig. 8. Configuration and test window for MIDL-2 data logger GPRS communication with the Internet server

Przedstawiony system monitorowania wilgotności gleby oraz jej temperatury i elektrycznej przewodności zainstalowany został w kilku miejscach w Polsce oraz za granicą (Niemcy, Szkocja), a utworzona sieć pomiarowa systematycznie powiększana o nowe miejsca.



Rys. 9. Przykładowa konfiguracja zastosowanego systemu monitorowania
Fig. 9. Example configuration of the applied monitoring system

Jednym z elementów zastosowania przedstawionego systemu jest projekt SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity) finansowanym przez ESA (European Space Agency). Dane z pomiarów naziemnych będą służyły do kalibracji modeli opisujących wilgotność

wierzchniej warstwy gleby na dużych obszarach na bazie zdjęć satelitarnych z radiometru pracującego z częstotliwością 1,4 GHz.

Obecnie prace rozwojowe koncentrują się na ulepszaniu czujników do pomiaru wielkości nieelektrycznych, takich jak wilgotność gleby, potencjał wody w glebie, temperatura, aktywność wybranych jonów w glebie. Innym elementem prac rozwojowych jest wprowadzenie do istniejących systemów monitorujących bezprzewodowej komunikacji radiowej ZigBee na poziomie indywidualnych czujników oraz rozbudowa sieci Internet między polowymi stacjami monitorującymi zmienność przestrzenno-czasową powyższych wielkości i komputerami użytkowników.

4. Podsumowanie

Opisane przyrządy pomiarowe opracowane w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie reprezentują aktualne tendencje rozwojowe nowoczesnych systemów pomiarowych charakteryzujące się niskim poborem prądu, dużą pojemnością pamięci wewnętrznej oraz możliwością sterowania procesem pomiarowym z dowolnego miejsca na świecie używając łącza internetowego lub stosując łącze radiowe w przypadkach, gdy dostęp do monitorowanych obiektów jest ograniczony. Warunkiem niezbędnym do spełnienia przez systemy monitoringu jest również zapewnienie użytkownikowi przyjaznego interfejsu programowego oraz bezpieczeństwa danych w kontekście minimalizacji możliwości ich bezpowrotnej straty jak również blokady dostępu niepożądanym użytkownikom. Prowadzone modyfikacje sprzętowe i programowe opracowywanych urządzeń pomiarowych idą w ślad za ciągłym rozwojem technologicznym zarówno w dziedzinie czujników jak również komunikacji i dostępu do pozyskanych danych. Zauważalny jest postęp technik monitoringu środowiska w dwóch skrajnych kierunkach. Jeden z nich dotyczy miniaturyzacji czujników naziemnych i tworzenia samoorganizującej się sieci komunikacji między nimi i urządzeniami koordynującymi ich pracę, drugi natomiast odnosi się do globalnych obrazów satelitarnych dających ogromną ilość informacji w szerokim zakresie częstotliwości pola elektromagnetycznego. Oba kierunki rozwoju są komplementarne, bowiem wzbogacają się wzajemnie. Dane generowane przez czujniki naziemne służą do kalibracji zdjęć satelitarnych, natomiast informacja z satelity umożliwia znalezienie obszarów szczególnie ważnych do oprzyrządowania dokładnymi czujnikami naziemnymi.

5. Literatura

- [1] Dalton F.N., Herkelrath W.N., Rawlins D.S., Rhoades J.D.: Time-domain reflectometry simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, 224, 1984, 989-990.
- [2] Malicki M.A., Kotliński J.: Dielectric determination of moisture of cereals grain using time domain reflectometry. *International Agrophysics*, 12(3), 1998, 209-215.
- [3] Malicki M.A., Skierucha W.M.: A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse. *Irrigation Science*, 10, 1989, 153-163.
- [4] Manual FOM/mts and TDR/MUX/mpts. 2006, IA PAS, Lublin.
- [5] Montanarella L. *Monitoring the Change*. European Commission-Joint Research Centre-Institute for Environment and Sustainability Soil and Waste Water Unit-Project MOSES. Ispra, Italy, 2002, 1-20.
- [6] Skierucha W., Wilczek A.M., Walczak R.T.: Application of smart sensors in the measurement of soil physical parameters. *Research in Agricultural Engineering*, 50(3), 2004, 96-102.
- [7] Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.: Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16, 1980, 574-582.

Artykuł recenzowany

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Informatyki w latach 2004-2007, jako projekt badawczy zamawiany PBZ-KBN-098/T09/2003.