

Grzegorz KARNAS¹
Grzegorz MASŁOWSKI²
Piotr BARAŃSKI³

SYGNATURY POLA ELEKTRYCZNEGO UDARÓW PIORUNOWYCH OTRZYMANE Z NOWEJ STACJI DETEKCYJNEJ POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

W pracy zostały przedstawione wyselekcjonowane rejestracje piorunowego pola elektrycznego z nowej stacji detekcyjnej Politechniki Rzeszowskiej podczas incydentów burzowych w 2014 r. Zebrane przebiegi obejmują rejestracje pola elektrycznego wolnozmiennego w paśmie częstotliwości od 0 do 10 Hz oraz pola szybkozmiennego w zakresie od 0.5 Hz do 3 MHz. Pliki cyfrowe z danymi poddano badaniu pod kątem identyfikacji typu oraz faz rozwoju czasowego poszczególnych składowych wyładowań. Przeprowadzono dwa rodzaje analizy: w dziedzinie czasu oraz czasowo-częstotliwościowej (PSD). Do otrzymania widm spektralnej gęstości mocy (PSD) zastosowano algorytm szybkiej transformaty Fouriera (STFT). Otrzymane wyniki, z analizy przykładowych widm PSD rozpatrywanych wyładowań doziemnych, wykazały użyteczność tej metody zarówno w identyfikacji poszczególnych typów udarów piorunowych, tj. zmian typu RS lub CC, jak i w ograniczonej liczbie przypadków do dyskryminacji fazy wyładowań wstępnych (PB) w chmurze burzowej. Rezultaty tych badań mogą być również zaimplementowane w nowych i szybkich algorytmach oraz procedurach komputerowych do automatycznej detekcji różnych składowych wyładowania doziemnego. W pracy została przedstawiona także cała struktura sprzętowa nowego stanowiska pomiarowego stacji detekcyjnej Politechniki Rzeszowskiej. Obejmuje ona zarówno sensory wolno i szybkozmiennego pola elektrycznego, jak i sprzęt optyczny, tj. aparat cyfrowy z wyzwalaczem optycznym oraz szybką cyfrową kamerę wideo do śledzenia rozwoju czasowego kanałów wyładowczych tych wyładowań.

Słowa kluczowe: wyładowanie doziemne i wewnątrzchmurowe, analiza STFT i spektrogramy PSD, piorunowe pole elektryczne, systemy lokalizacji i detekcji wyładowań atmosferycznych

¹ Autor do korespondencji: Grzegorz Karnas, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów, (17) 865 12 43, gkarnas@prz.edu.pl

² Grzegorz Masłowski, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów, (17) 865 12 96, maslowski@prz.edu.pl

³ Piotr Barański, Instytut Geofizyki PAN, Zakład Fizyki Atmosfery, ul. Księcia Janusza 64, 01-452 Warszawa, (22) 691 58 72, baranski@igf.edu.pl

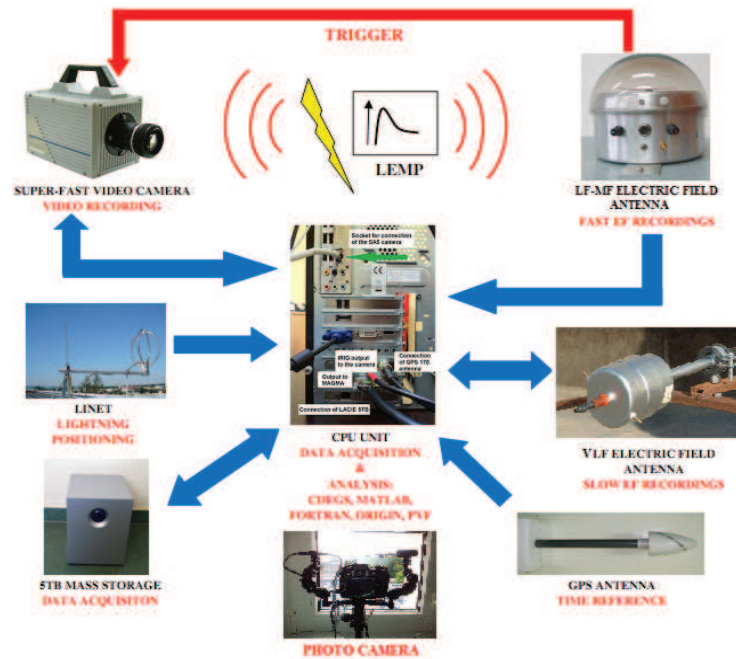
1. Wprowadzenie

Współczesne możliwości sprzętowe i programowe zastosowane do przeprowadzenia wieloaspektowej analizy pola elektromagnetycznego (EM) wyładowań atmosferycznych stanowią istotny element efektywnego działania operacyjnego globalnych lub regionalnych systemów detekcji i lokalizacji wyładowań na całej kuli ziemskiej. Głównym zadaniem tych systemów jest możliwie najdokładniejsze wyznaczenie czasu, miejsca oraz szczytowej amplitudy prądu każdego wykrytego wyładowania atmosferycznego. Do tego celu najczęściej stosuje się zestawy kilku stacji bazowych współpracujących synchronicznie [1, 2]. Ważnym elementem samej detekcji zjawiska udaru piorunowego jest równoczesna analiza przebiegów zmian pola EM zarejestrowanych przez różne stacje bazowe. Najczęściej wykorzystywaną metodą jest tu tzw. technika TOA (Time-of-Arrival) [3]. Wykorzystuje ona informację o różnicach w czasie propagacji impulsu piorunowego do poszczególnych stacji pomiarowych. Dokładne określenie tych czasów wymaga jednoczesnej identyfikacji sekwencji impulsów tego samego wyładowania w ramach kilku stacji. Niejednokrotnie jest to bardzo utrudnione lub nawet niemożliwe ze względu na szereg zjawisk zakłócających lub modyfikujących parametry fali EM, rozchodzącej się w przestrzeni pomiędzy emitującym kanałem piorunowym a antenami/sensorami odbiorczymi [4]. Superpozycja różnych zakłóceń EM znacząco modyfikuje przebiegi pola EM samego wyładowania atmosferycznego, rejestrowanego w dziedzinie czasu [5]. Istotnym jest więc poszukiwanie nowych sposobów analizy widmowej, znacząco zaszumionych przebiegów pola EM, generowanego przez wyładowania atmosferyczne. Jedną z możliwości jest tu analiza spektralna w dziedzinie amplitudowo-częstotliwościowej oraz czasowej z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera (STFT) [6, 7]. Zastosowany do tego celu podstawowy algorytm pozwala na wyodrębnienie głównych składowych wyładowania doziemnego, takich jak na przykład wyładowanie główne (RS - return stroke), czy prąd długotrwały (CC – continuing current) [8]. Dodatkowo algorytm ten można rozwinąć o funkcję rozpoznawania poszczególnych etapów rozwoju czasowego samego wyładowania doziemnego, jak na przykład wstępne wyładowania w chmurze burzowej (PB – preliminary breakdown) [9, 10], inicjujące proces rozwoju lidera krokowego. W celu implementacji metody wykorzystującej analizę widmową w algorytmach detekcji wyładowań atmosferycznych, konieczna jest jej optymalizacja pod kątem rozróżniania typu tego wyładowania. Powinna więc ona obejmować dobór odpowiednich parametrów samej transformaty STFT, takich jak, szerokość okna, typ funkcji okna, czy procedurę nakładania poszczególnych okien [11, 12]. Drugim aspektem jest tu ustalenie kryteriów poprawnej identyfikacji typu wyładowania oraz selekcji poszczególnych składowych wyładowania doziemnego w otrzymywanych spektrogramach. W niniejszej pracy przedstawiono przykładowe spektrogramy różnych wyładowań doziemnych, dające

możliwość przyszłej programowalnej selekcji poszczególnych etapów rozwoju wyładowania atmosferycznego oraz wyróżniania jego głównych składowych.

2. Charakterystyka sprzętowa stanowiska pomiarowego do detekcji wyładowań atmosferycznych.

Stanowisko pomiarowe do detekcji wyładowań atmosferycznych zostało zorganizowane w Katedrze Elektrotechniki i Podstaw Informatyki Politechniki Rzeszowskiej w 2011 r. Od tamtego czasu było ono sukcesywnie rozbudowywane oraz optymalizowane [13]. Obecnie w skład systemu pomiarowego stanowiska wchodzi zestaw sensora wolnozmiennego pola elektrycznego (tzw. dipol wirujący) oraz antena szybkozmiennego pola elektrycznego (ang. electric field change meter). Ponadto do rejestracji fotograficznych czasowej ewolucji kanałów wyładowczych bliskich uderów piorunowych wykorzystuje się szybką cyfrową kamerę wideo oraz profesjonalny cyfrowy aparat fotograficzny z niezależnym wyzwalaczem optycznym (rys. 1). Całość systemu integruje wyspecjalizowana jednostka PC. Od niedawna, w oparciu o profesjonalny odbiornik czasu GPS, możliwa jest pełna synchronizacja rejestracji obrazu kanału wyładowczego oraz zmian pola elektrycznego bliskich wyładowań doziemnych. Tak więc, to stanowisko pomiarowe, wyspecjalizowane do badań doziemnych wyładowań atmosferycznych, stało się unikalne w skali kraju oraz stanowi jedno z niewielu miejsc na świecie, gdzie prowadzone są pomiary umożliwiające równoczesną rejestrację zjawisk optycznych oraz elektrycznych towarzyszących wyładowaniom atmosferycznym [14, 15]. W najbliższym czasie planowane jest również uruchomienie mobilnej stacji rejestracji wyładowań. Pierwsze próby systemu zostały przeprowadzone w Bezmiechowej Górnej (Bieszczady) w 2014 roku [16]. W ramach współpracy międzynarodowej Politechnika Rzeszowska współpracuje od kilkunastu lat z International Center for Lightning Research and Testing na Florydzie. Podobna struktura systemów pomiarowych z Rzeszowa oraz Florydy pozwala na wzajemną weryfikację uzyskanych wyników i pogłębioną ich interpretację. Zastosowanie własnych rozwiązań sprzętowych oraz implementacja interfejsu w programie Matlab pozwoliły na pełną automatyzację systemu pomiarowego. Umożliwia ona bezobsługową rejestrację w porze nocnej, a także generowanie raportów burzowych dla wybranych użytkowników systemu. Matlab został wykorzystany nie tylko do zwiększenia możliwości funkcjonalnych systemu, ale również do analizy zebranych danych. W przyszłości planowana jest dalsza modernizacja systemu i wprowadzanie nowych rozwiązań sprzętowych oraz algorytmów nie stosowanych do tej pory w innych systemach detekcyjnych.



Rys. 1. Struktura sprzętowa stanowiska pomiarowego w Rzeszowie do detekcji wyładowań atmosferycznych.

Fig. 1. Measuring setup of the lightning detection station prepared in Rzeszow.

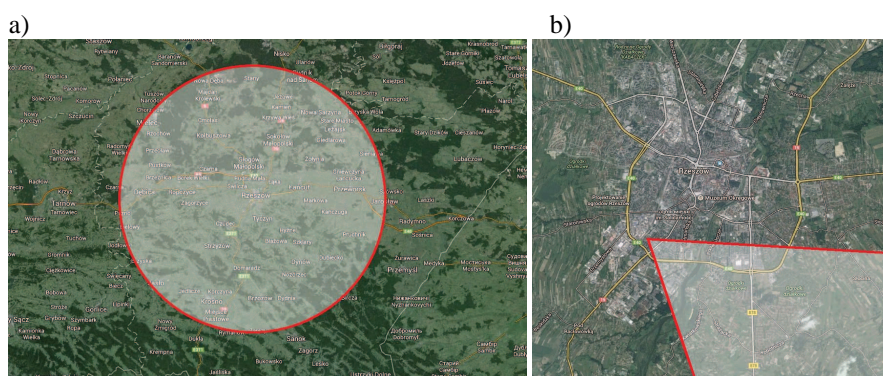
Stanowisko pomiarowe do detekcji wyładowań atmosferycznych znajduje się w budynku B Wydziału Elektrycznego Politechniki Rzeszowskiej. Na poddaszu zainstalowano aparaturę pomiarowo-kontrolną oraz zestaw czujników wizyjnych. Anteny zostały rozmieszczone powyżej, na dachu, w miejscach o małych szumach energetycznych, umożliwiającą poprawną rejestrację zewnętrznego pola elektrycznego generowanego przez chmury burzowe i wyładowania atmosferyczne. Stacja posiada również korzystną lokalizację miejską, ze względu na niewielkie zurbanizowanie okolicznej strefy.

W skład systemu pomiarowego wchodzi zestaw anteny szybkozmiennego pola elektrycznego oraz sensor elektrycznego pola wolnozmiennego (tzw. dipol wirujący). Antena pola elektrycznego szybkozmiennego posiada zakres od 0.5 Hz do 3 MHz. Górny zakres pomiarowy jest wykorzystywany do analizy szybkozmiennych zjawisk w chmurze burzowej, tzw. wyładowań wstępnych (PB) inicjujących powstanie lidera krokowego. Dane pomiarowe z anteny są zapisywane w masowej pamięci zewnętrznej o pojemności 5 TB, z wykorzystaniem czterokanałowej karty Spectrum M2i3131 i z maksymalną prędkością 25 MS/s oraz rozdzielczością 12 bitów. W celu zapewnienia synchronizacji czasowej wolno i szybkozmiennych przebiegów zmian pola elektrycznego uderów pioru-

nowych, w jednym z kanałów karty pomiarowej rejestrowany jest również cyfrowy marker czasu GPS (1 PPS) w kodzie IRIG-B. Odbiornikiem sygnału GPS jest profesjonalna antena firmy Meinberg typ GPS-170.

Podstawowym elementem całości systemu detekcji wyładowań atmosferycznych jest sposób wyzwalania rejestracji. Zapis zmian pola elektrycznego udaru piorunowego jest inicjowany z wykorzystaniem układu „triggera” zintegrowanego z układem elektronicznym anteny pola szybkozmiennego (rys.1). Na wejściu „triggera” znajduje się mianowicie filtr pasmowo-przepustowy o częstotliwości granicznej 10 kHz. Umożliwia to wstępną selekcję rejestracji pod względem wykrywania jedynie wyładowań doziemnych. Czułość anteny, w obecnej konfiguracji stanowiska pomiarowego, zapewnia skuteczną detekcję udarów piorunowych w odległości około 50 km od miejsca jej lokalizacji (rys.2).

Politechnika Rzeszowska posiada również dostęp do danych z europejskiego systemu detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych LINET. Pozwala to uzyskać informacje o dodatkowych parametrach rejestrowanych udarów piorunowych, takich jak np.: amplituda prądu szczytowego w kanale wyładowania, polaryzacja i typ udaru (doziemne: CG, lub CG₊, czy też wewnątrzchmurowe IC_±), wysokość źródła ładunku elektrycznego wyładowania.



Rys. 2. a) – Zasięg detekcji anten pola elektrycznego wchodzących w skład systemu, b) – wybrany sektor horyzontu monitorowany przez szybką kamerę wideo oraz aparat fotograficzny z niezależnym wyzwalaczem optycznym.

Fig. 2. a) – Available measuring distance range used by E-field sensors is denoted by shaded circle area, b) – chosen horizon sector monitored by fast video camera and photo camera triggered by dedicated optical sensor.

Zastosowanie anteny pola szybkozmiennego daje możliwość detekcji wyładowań obu typów, tj. wyładowań doziemnych (ang. CG) lub wewnątrzchmurowych (ang. IC). Natomiast wykorzystanie drugiego sensora pola E, tj. dipola wirującego pracującego w paśmie od 0 do 10 Hz, dostarcza informacji o

zmianach składowej elektrostatycznej pola E, zarówno samej chmury burzowej, jak i generowanych przez nią wyładowań atmosferycznych.

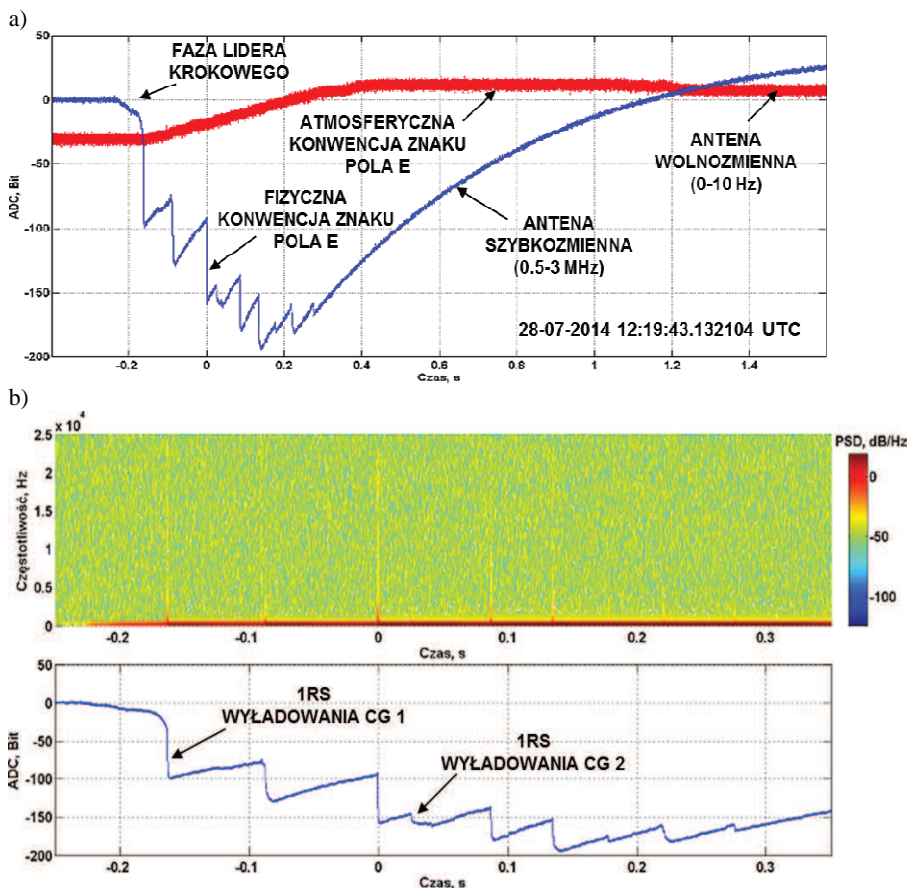
Na dachu budynku PRZ są również zainstalowane dwie anteny magnetyczne (NS i EW) systemu LINET (rys.1). Dane pomiarowe z tych anten są internetowo przesyłane do CPU w Monachium.

W systemie pomiarowym do rejestracji fotograficznych wykorzystano szybką kamerę cyfrową SA5 firmy Photron oraz aparat Nikon D7100. Urządzenia te zaopatrzone w profesjonalne obiektywy Nikkor o ogniskowej 20 mm oraz 50 mm. Ze względu na konieczność izolacji drogiego sprzętu fotograficznego od szkodliwego wpływu zewnętrznych warunków atmosferycznych, sprzęt ten zainstalowano na poddaszu. Szybka kamera cyfrowa umożliwia nagrywanie obrazu HD z prędkością do 7000 fps. Umożliwia to obserwację rozwoju kanału udaru piorunowego oraz kolejnych świetlnych faz tego wyładowania następujących w trakcie i po pierwszym udarze. Kamera łączy się z jednostką sterującą PC z wykorzystaniem łącza gigabit Ethernet. Natomiast aparat Nikon D7100 umożliwia precyzyjne wyznaczenie parametrów geometrycznych kanału piorunowego. Jest on wyposażony w dedykowany odbiornik GPS. Każde zdjęcie posiada więc informację o aktualnym położeniu aparatu i czasie fotografowanego zjawiska. Zastosowanie dedykowanego układu triggera optycznego „NERO TRIGGER” pozwoliło na automatyzację całego procesu rejestracji fotograficznych.

Od 2014 r. dodatkowym elementem omawianego systemu pomiarowego jest miernik pola EM firmy Maschek ESM-100. Pasma ESM-100 zawiera się w zakresie od 5 Hz do 400 kHz. Mierzone są w nim trzy składowe pola elektrycznego i magnetycznego. Możliwe jest również przesłanie analogowego sygnału z tego miernika do cyfrowego oscyloskopu za pośrednictwem specjalnego adaptera.

3. Analiza czasowa oraz czasowo-częstotliwościowa wybranych przykładów rejestracji piorunowego pola elektrycznego ze stanowiska pomiarowego w Rzeszowie.

Cyfrowe dane pomiarowe zebrane podczas każdego incydentu burzowego są każdorazowo podawane automatycznej analizie w trybie tzw. post-processingu. Pierwszym etapem tej analizy jest przeprowadzenie synchronizacji czasowej wszystkich rejestrowanych przebiegów zmian pola EM. Następnie są one konwertowane do docelowych formatów plików dat. Zarejestrowane przebiegi zmian pola E w czasie wyładowań atmosferycznych wykazują dużą różnorodność oraz odzwierciedlają swoją strukturą złożonością zjawiska, jakim jest inicjacja i rozwój tego procesu w chmurze burzowej. Poniżej na rys. 3 przedstawiono kilka wybranych przykładów takich rejestracji, w których można było zidentyfikować główne składowe wielokrotnego i pojedynczego wyładowania doziemnego.



Rys. 3. Przykładowa rejestracja uzyskana ze stacji detekcyjnej w Rzeszowie (data 28 lipca 2014 r. godz. 12:19:43.132104 UTC odnosi się do momentu $t=0$ s na osi poziomej wykresu): a) porównanie przebiegów zmian elektrycznego pola wolno i szybkozmiennego odtworzone z $f_p=50$ kS/s, dla rozpatrywanego przypadku nałożenia czasowego 2 doziemnych wyładowań wielokrotnych (CG 1 i CG 2); b) analiza PSD wybranego fragmentu przebiegu elektrycznego pola szybkozmiennego z górnego panelu a). Parametry analizy STFT: okno=128 próbek, overlap=120 próbek, długość FFT=128 próbek

Fig. 3. The exemplary E-field record of two multiple CG flashes obtained from the lightning detection station in Rzeszow on 28 July 2014 at 12:19:43.132104 UTC (trigger time corresponding to $t=0$): a) the time juxtaposition of slow- and fast-electric field variations obtained from superposition of two cloud-to-ground multiple-stroke lightning. In this panel the primary E-field record was resample from 25 MHz to 50 kS/s; b) the PSD analysis of the fast-electric field change from panel a). The STFT parameters used here are as follows: the window=128 samples, the overlap=120 samples, the FFT length=128 samples.

Pierwszy przykład, zobrazowany na rys. 3a, to rejestracja zmian pola E odnosząca się do 2 nakładających się czasowo wielokrotnych wyładowań doziemnych. Łącznie w tych wyładowaniach wystąpiło 9 uderów krótkotrwałych typu

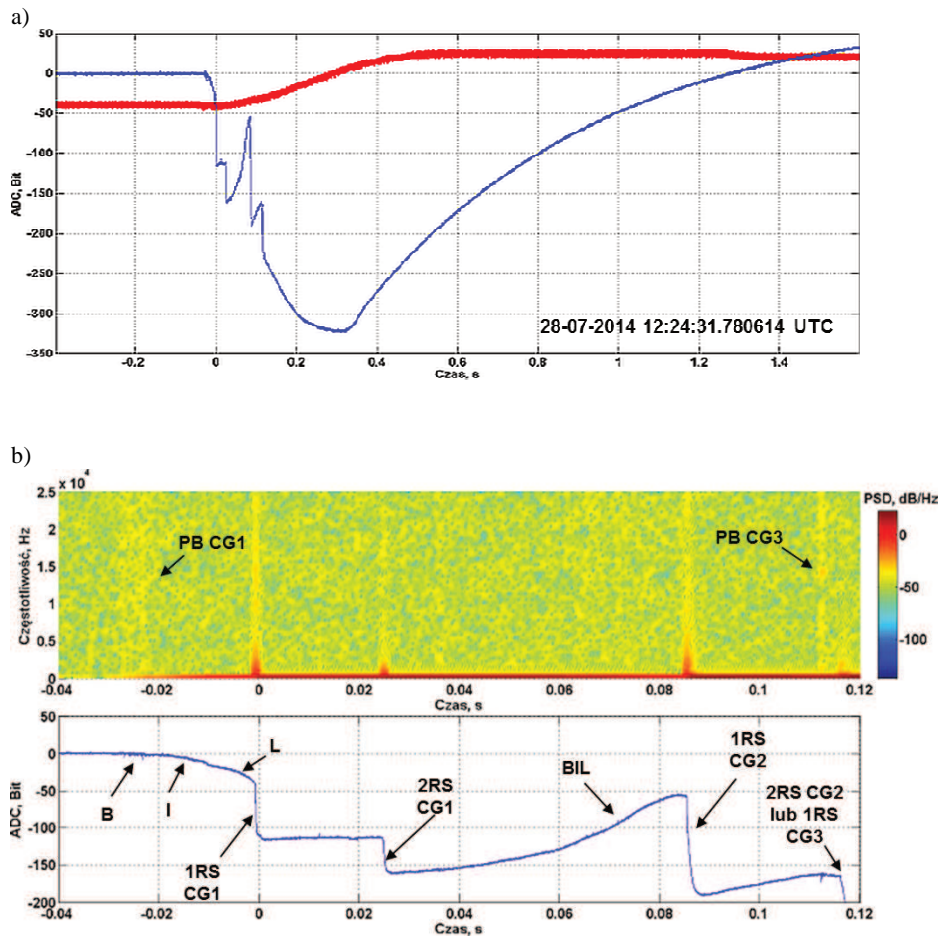
RS. Tą identyfikację potwierdza wykonana analiza częstotliwościowa rekordu pomiarowego i jego spektrogram PSD przedstawiony na rys. 3b. Warto zauważyć, że pierwszy udar RS bliższego wyładowania doziemnego (CG 1) był poprzedzony bardzo wyraźną fazą lidera krokowego, która trwała około 100 ms. Natomiast odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi udarami RS wyładowania CG 1 był zawarty w przedziale od 40 do 50 ms.

Do obliczenia widma PSD rozpatrywanego przypadku użyto następujących parametrów: szerokość okna analizy STFT objęła 128 próbek z nałożeniem (ang. overlapping) 120 próbek w kolejnych krokach wykonywanej procedury, a szerokość okna samej analizy FFT wynosiła również 128 próbek. Natomiast próbkowanie sygnału zmniejszono w tej procedurze z 25 MS/s do 50 kS/s. Dzięki temu można było przeprowadzić porównanie takich widm z przykładami wyładowań doziemnych analizowanych w rejonie Warszawy [17].

Na rys. 4 przedstawiono kolejny przykład sekwencji czasowej zmian pola elektrycznego pochodzącego od 2 lub 3 następujących po sobie doziemnych wyładowaniach wielokrotnych. Warto zwrócić tu uwagę na specyficzną korelację czasową między zmianami elektrycznego pola szybkozmiennego (rys. 4a – przebieg niebieski), a elektrycznym polem wolnozmiennym (rys. 4a – przebieg czerwony). Elektryczne pole wolnozmiennym szybko wciągu 0.5 s stabilizuje się po sekwencji kolejnych udarów piorunowych, natomiast elektryczne pole szybkozmiennym wraca powoli przez 1.6 s do poziomu sprzed pierwszego wyładowania doziemnego. Hipotezą tłumaczącą te relacje może być specyficzny pionowy rozkład ujemnego ładunku elektrycznego chmury burzowej, gdy poszczególne udary RS kolejnych wyładowań doziemnych mogą dowiązywać się do coraz wyższych obszarów tego ładunku.

Przeprowadzona analiza PSD tego przypadku (rys. 4b) potwierdza, że przedstawione na rys. 4a zmiany elektrycznego pola szybkozmiennego pochodzą od dwóch lub trzech niezależnych doziemnych wyładowań CG. Można również w tym spektrogramie zauważyć charakterystyczne linie widmowe odnoszące się do fazy wyładowań wstępnych przed pierwszymi udarami RS wyładowań CG 1 i CG 3. Jednakże struktura tych dwóch linii widmowych jest wyraźnie różna i wynika z różnego przebiegu czasowego szybkich zmian pola E zarejestrowanych wciągu tych faz (patrz dolny panel rys. 4). Faza PB CG 1 jest zbudowana z poszczególnych charakterystycznych etapów B (ang. brekdown), I (ang. intermediate) oraz L (ang. leader). Z kolei w fazie PB wyładowania CG 2 uwidocznił się tylko krótszy etap B.

Powszechnie przyjmuje się, że w typowym wielokrotnym wyładowaniu doziemnym występuje od 3 do 5 udarów typu RS [8]. Z dotychczasowych zgromadzonych detekcji wyładowań doziemnych w Rzeszowie wynika, że w tym rejonie geograficznym Europy Wschodniej udział procentowy doziemnych wyładowań pojedynczych w populacji wszystkich wyładowań doziemnych jest dominujący.



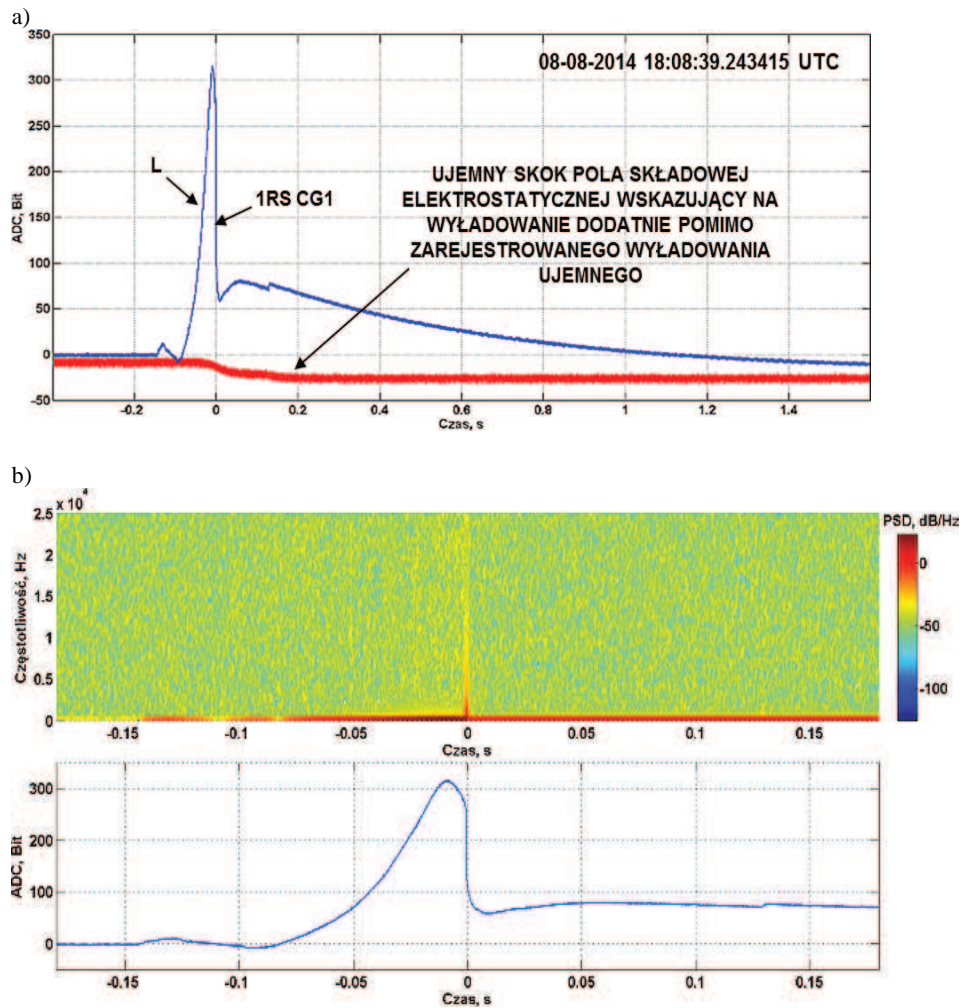
Rys. 4. Rejestracja z dnia 28 lipca 2014 r.: a) przebiegi czasowe elektrycznego pola wolno i szybkozmienne pochodzące od superpozycji kilku wyładowań doziemnych (CG 1, CG 2, CG 3); b) spektrogram PSD wybranego fragmentu przebiegu elektrycznego pola szybkozmiennego z części a). Parametry przeprowadzonej analizy STFT analogicznie, jak dla rys. 3b.

Fig. 4. The case of three CG flashes E-field signatures recorded during the thunderstorm in Rzeszow on 28 July 2014: a) the time courses of slow- and fast-electric field variations resulted from a superposition of three CG multiple-stroke lightning (CG 1, CG 2, CG 3) changes. In this panel the primary E-field record was resample from 25 MHz to 50 kS/s; b) the PSD analysis of fast-electric field changes from panel a). The STFT parameters used here are the same as for Fig. 3b.

Rys. 5 przedstawia typowy przykład pojedynczego wyładowania doziemnego, które wystąpiło w bardzo bliskiej odległości od stacji pomiarowej w Rzeszowie. Wskazuje na to bardzo wyraźna, trwająca około 100 ms, faza lidera krokowego poprzedzająca udar RS tego wyładowania. Faza ta uwidacznia się również dobrze w spektrogramie PSD wykonanym dla tego przypadku, jako

zwiększenie intensywności widma PSD przed udarem RS w zakresie niskich częstotliwości (patrz środkowy panel z rys. 5). W rozpatrywanym tu przypadku bardzo bliskiego wyładowania doziemnego z jednym udarem RS należy odnotować przeciwny kierunek zmian elektrycznego pola wolnozmiennego względem równoczesnych zmian elektrycznego pola szybkozmiennego. Tego rodzaju relacje nie wystąpiły w przykładach także ujemnych wyładowań doziemnych przedstawionych na rys. 3a i 4a. Kontrowersję tą można wytłumaczyć tym, że w sytuacji, gdy w bardzo bliskiej odległości od stacji pomiarowej pojawi się wierzchołek ujemnie naładowanego lidera krokowego natężenie szybkozmiennego pola elektrycznego w otoczeniu anteny bardzo szybko wzrośnie w kierunku wartości dodatnich, po czym, już w fazie samego udaru RS, nastąpi gwałtowna zmiana tego pola w przeciwnym kierunku, wywołana przepływem dodatniego ładunku z powierzchni Ziemi do chmury burzowej w kanale plazmowym ujemnego wyładowania CG. Natomiast sensor elektrycznego pola wolnozmiennego poprzez elektrostatyczną superpozycję dużego skoku dodatniego i nieco mniejszego skoku ujemnego, towarzyszącą rozpatrywanym zmianom SL (ang. step leader) i RS, odnotuje jedynie ich różnicę, a więc wykaże dodatni skok pola, jak dla typowego odległego wyładowania dodatniego CG. Aby unikać tych interpretacyjnych niejednoznaczności, należałoby w tego rodzaju badaniach zwiększyć liczbę naziemnych stacji pomiarowych oraz zachować między nimi przynajmniej kilkukilometrowe odstępstwa.

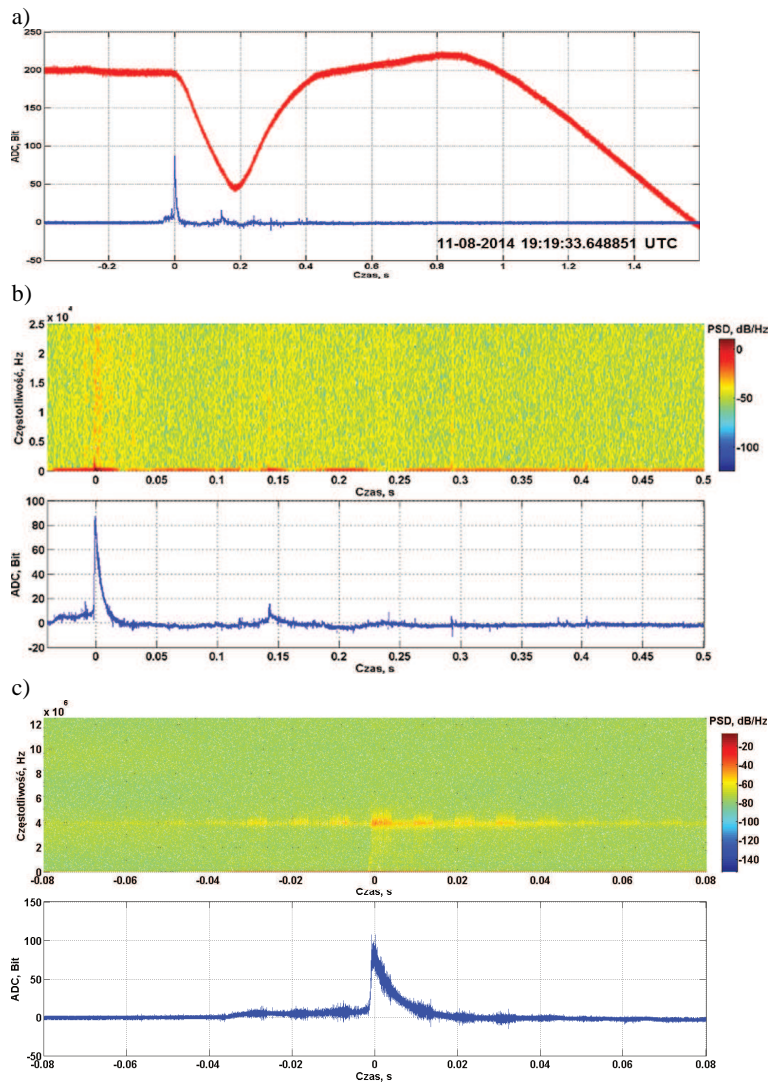
Ostatnim prezentowanym przypadkiem jest przebieg elektrycznego pola wolno i szybkozmiennego, obrazujący rozwój wyładowania w chmurze burzowej (patrz rys. 6). Występujące tu duże natężenie pola wolnozmiennego oraz duże jego zmiany, w porównaniu z poprzednio rozpatrywanymi przykładami wyładowań CG, wskazują na duży sumaryczny ładunek elektryczny neutralizowany w tym wyładowaniu i bliską jego odległość od stacji pomiarowej. Natomiast wyładowanie, które wyzwoliło ten pomiar mogło być odległym dodatnim wyładowaniem CG, lub bliskim wyładowaniem typu IC. Druga hipoteza jest bardziej prawdopodobna, co potwierdza struktura i intensywność pierwszego prążka w spektrogramie PSD (patrz lewa strona rys. 5b). Zajmuje on pasmo znacznie szersze niż 25 kHz (patrz rys. 6c). Należy tu podkreślić, że spektrogram PSD przedstawiony na rys. 6c został wyznaczony w zakresie do 12.5 MHz. Parametry tej analizy STFT dobrano tak, aby uzyskać możliwie najlepszą jakość spektrogramu w zakresie wyższych częstotliwości. Jednakże podczas procedury symulacji spektrogramu okazało się, że parametr overlap w tej procedurze powinien być zmniejszony do 0, ze względu na wystąpienie ograniczeń sprzętowych.



Rys. 5. Przykład rejestracji ze stacji pomiarowej w Rzeszowie zmian wolno i szybkozmiennego pola elektrycznego z dnia 8 sierpnia 2014 r. o godz. 18:08:39.243415 UTC, obrazujący incydent bardzo bliskiego ujemnego pojedynczego uderzenia piorunowego poprzedzony fazą krokowego lidera poprzedzająca bliskie wyładowanie pojedyncze. Opis części a) i b) analogicznie jak na rys. 4.

Fig. 5. The example of slow- and fast E-field lightning changes for the case of very close and single-stroke negative CG flash detected during thunderstorm in Rzeszow on 8 August 2014 at 18:08:39.243415 UTC. The additional descriptions needed for a) and b) panels are the same as for Fig. 4.

Analiza widma PSD w zakresie do 12.5 MHz wykazała, że składowe widma w tym przypadku są widoczne nawet w zakresie do ponad 4 MHz. Wskazuje to jednoznacznie na bardzo szybkozmienny przebieg incydentu wyładowania atmosferycznego, a zatem na charakter i mechanizm wyładowania IC.



Rys. 6. Przykład rejestracji ze stacji pomiarowej w Rzeszowie zmian wolno i szybkozmiennego pola elektrycznego z dnia 11 sierpnia 2014 r. o godz. 19:19:33.648851 UTC, obrazujący incydent wyładowania w chmurze burzowej typu IC. Opis oraz parametry STFT dla części a) i b) analogicznie jak na rys. 4; c) analiza PSD wybranego fragmentu szybkozmiennego pola E wyładowania IC, przedstawionego w szerszym przedziale czasu w części a), oraz przeprowadzona w zakresie częstotliwości do 12.5 MHz. Parametry analizy STFT dla przypadku c): okno=1024 próbek, overlap=0 próbek, długość FFT=1024 próbek, $f_p=25$ MS/s.

Fig. 6. The example of slow- and fast E-field lightning changes for the case of close intracloud lightning discharge detected during thunderstorm in Rzeszow on 11 August 2014 at 19:19:33.648851 UTC. The additional descriptions needed for a) and b) panels are the same as for Fig. 4. The STFT parameters used for the presentation shown in c) panel are as follows: the window=1024 samples, the overlap=0, the FFT length=1024 and $f_p=25$ MS/s.

4. Podsumowanie

Dotychczas przeprowadzone przez nas badania wskazały na istotne zalety analizy widmowej STFT w rozpoznaniu struktury czasowej zarówno wyładowania CG, jak i IC. Wykonanie spektrogramu PSD tych wyładowań uwidacznia pewne ich cechy niemożliwe, lub trudne do wyznaczenia jedynie w dziedzinie czasu, lub z wykorzystaniem klasycznej transformaty FFT. Spektrogramy PSD pozwalają na lepszą identyfikację typu wyładowania oraz dają możliwość właściwej interpretacji złożonych przebiegów czasowych. W szczególności umożliwiają one dobre wyróżnienie fazy wstępnej wyładowania doziemnego oraz poszczególnych jego udarów. Procedura ta może być również wykorzystana do opracowania nowych i bardziej efektywnych algorytmów dyskryminacji udarów piorunowych, zarówno typu RS jak i CC, w aplikacjach dopasowanych do potrzeb regionalnych oraz globalnych systemów detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych. W przyszłości planowane jest także uruchomienie mobilnej wersji stacji pomiarowej elektrycznego pola udarów piorunowych, połączonej z opcją jednoczesnej rejestracji fotograficznej ewolucji kanału wyładowania. Dzięki temu będzie można uzyskać więcej informacji o charakterystyce wyładowań doziemnych występujących w miejscach specjalnego przeznaczenia i narażonych na zwiększone zagrożenie piorunowe, jak np.: porty lotnicze i morskie, bazy paliwowe, stacje transformatorowe linii wysokiego napięcia, duże otwarte obiekty/stadiony sportowe, czy też w rejonach o zwiększonej ilości i intensywności incydentów burzowych, jak np. duże zbiorniki wodne w terenie górzystym.

Literatura

- [1] MacGorman D.R., Rust W.D., *The Electrical Nature of Storms*, Oxford University Press, 1998, New York.
- [2] Karunarathne S., T.C. Marshall, M. Stolzenburg, N. Karunarathna, L. E. Vickers, T. A. Warner, and R. E. Orville (2013), Locating initial breakdown pulses using electric field change network, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 7129–7141, doi:10.1002/jgrd.50441.
- [3] Rakov V.A., Electromagnetic methods of lightning detection, *Surv. Geophys.*, 34:731-753, 2013, doi 10.1007/s10712-013-9251-1.
- [4] Gamracki M., Modelowanie matematyczne propagacji piorunowego zaburzenia elektromagnetycznego nad stratną ziemią, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, NR 7/2014.
- [5] Marshall, T., W. Schulz, N. Karunarathna, S. Karunarathne, M. Stolzenburg, C. Vergeiner, and T. Warner (2014), On the percentage of lightning flashes that begin with initial breakdown pulses, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 445–460, doi:10.1002/2013JD020854.

- [6] Oppenheim, Alan V., Ronald W. Schafer, and John R. Buck. *Discrete-Time Signal Processing*. 2nd Ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999.
- [7] Rabiner, Lawrence R., and Ronald W. Schafer. *Digital Processing of Speech Signals*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1978.
- [8] Rakov V.A., Uman M.A., *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge Univ. Press, 2003, New York.
- [9] Barański P., Michnowski S., Masłowski G., Gajda W.: Signatures of electric field changes associated with the continuing current stage of cloud-to-ground flashes, *Proceedings of the 13-th International Conference on Atmospheric Electricity, ICAE 2007*, Beijing, China, vol. I, 489–492.
- [10] Baharudin Z.A., Ahmad N.A., Fernando M., Cooray V., and Mäkelä J.S., Comparative study on preliminary breakdown pulse trains observed in Johor, Malaysia and Florida, USA, *Atmospheric Research*, No.117 p.111-121, 2012.
- [11] Masłowski G., P. Barański, Karnas G.: Electric field frequency spectra of multiple cloud-to-ground lightning flashes recorder in the Warsaw region by Local Lightning Detection Network, *Proceedings of the 14-th International Conference on Atmospheric Electricity, ICAE 2011*, Rio de Janeiro, Brazil (wersja elektroniczna).
- [12] Masłowski G., Barański P., Karnas G.: Spectral characteristics of the electric field related to the preliminary breakdown stage of cloud-to-ground lightning flashes, *Proceedings of the 15-th International Conference on Atmospheric Electricity, ICAE 2014*, Norman, Oklahoma, USA (wersja elektroniczna).
- [13] Karnas G., Masłowski G., Barański P., Berliński J., Pankanin G., Instrumentation and data analysis process at the new lightning observatory in Poland, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* R. 89 NR 6/2013.
- [14] Masłowski G., Barański P., Natural Lightning Channel Evolution Obtained from High-Speed Digital Video Camera Recordings, *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, D-73(412), 2009.
- [15] Stolzenburg M., Marshall T.C., Karunarathne S., Karunarathna N., Orville R.E., Branched dart leaders preceding lightning return strokes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, USA., doi:10.1002/2013JD021254.
- [16] Sobolewski K., Karnas G., Barański P., Masłowski G., Analiza sygnałów pola elektrycznego wyładowań atmosferycznych w rejonie Bieszczad na podstawie kompleksowych pomiarów impulsów fali EM w paśmie częstotliwości od 0 do 3 MHz wykonanych w AOS PRz i PW w Bezmiechowej w maju 2014 r., *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, ISSN 2353-1290, Nr39, Gdańsk, 2014.
- [17] Łoboda M., Betz H.D., Barański P., Wiszniowski J., Dziewit Z., New Lightning Detection Networks in Poland – LINET and LLDN, *The Open Atmospheric Science Journal* 01/2009; 3:29-38. doi:10.2174/1874282300903010029.

LIGHTNING STROKE SIGNATURES IN ELECTRIC FIELD FROM NEW MEASURING SITE IN RZESZOW

Summary

The main goal of our paper is to present some results of E-field recordings obtained from a new measuring site in Rzeszow in the summer of 2014 during lightning and thunderstorm activity in the south-east of Poland. To record the lightning signatures in the E-field we have used a field mill with a rotating dipole - an E-field sensor to measure the electrostatic component of the field intensity variations in the frequency range from 0 to 10 Hz, and, in addition we used an electric flat plate antenna (E-field change meter) operated with the charge amplifier unit in the frequency range from 0.5 to 3 MHz.

We have undertaken the post-processing analysis of the gathered E-field lightning data to distinguish different components of the lightning cloud-to-ground (CG) or intracloud strokes (IC) both in the time and time-frequency domain. For this purpose we have used the standard Matlab procedures and algorithms to evaluate the Short-Time Fourier Transform (STFT) and calculate the power spectrum density (PSD) for each of our lightning flash-related E-field record. In this way we can recognize different stages of a single or multiple CG flash evolution, such as the preliminary breakdown (PB), the return stroke (RS) or continuing current (CC) events. Some valuable results of our PSD analysis related to adequate and reliable discrimination of RS stages in multiple CG flashes are shown. We postulate that such PSD analysis could be implemented in discrimination algorithms used in the regional or global lightning detection and location systems, and enhancing their efficiency in the RS or CC stroke change determination. Another important part of the measuring equipment of lightning registration system in Rzeszow, including a fast digital video camera and additional digital photo camera working with own independent acoustic and optical lightning trigger, and a GPS unit, are also described. These devices can be used together with simultaneous E-field recordings for better determination and understanding of different stages of complex lightning discharge phenomena.

Keywords: cloud-to-ground lightning flashes, intracloud discharges, PSD analysis and spectrograms, measurements of lightning electric field, lightning detection and location systems

DOI: 10.7862/re.2015.14

Tekst złożono w redakcji: luty 2015

Przyjęto do druku: kwiecień 2015