

mgr inż. Paweł Trusz

ekspert w zakresie badań fonoskopijnych Biura Badań Kryminalistycznych Agencji Bezpieczeństwa Wewnętrznego

dr inż. Waldemar Maciejko

ekspert w zakresie badań fonoskopijnych Biura Badań Kryminalistycznych Agencji Bezpieczeństwa Wewnętrznego

Kryterium ENF jako narzędzie weryfikacji czasu rejestracji nagrania

Streszczenie

Niniejszy artykuł w sposób syntetyczny przedstawia możliwości zastosowania kryterium ENF podczas badań autentyczności nagrań audio zmierzających do wyznaczenia daty ich rejestracji. Autorzy przeprowadzili szereg eksperymentów mających na celu próbę określenia parametrów brzegowych, którymi powinno charakteryzować się analizowane nagranie, tak aby zapewnić wiarygodność i powtarzalność wyników badań. Analizom podlegały zanonimizowane materiały z rzeczywistych spraw dostarczonych do badań. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że dokładność wyznaczenia daty rozpoczęcia rejestracji uzależniona jest przede wszystkim od czasu trwania nagrania. Wysoka wartość uzyskiwanej korelacji nie świadczy o prawidłowości wyznaczonej daty i godziny. Im krótszy czas trwania sygnału przydźwięku wyekstrahowanego z nagrania dowodowego, tym większe prawdopodobieństwo dopasowania losowego odcinka przebiegu częstotliwości prądu sieci elektroenergetycznej. Wartość współczynnika SNR jest nieistotna, dopóki zastosowany algorytm detekcji przydźwięku w danej chwili czasu skutecznie wyznacza wartość częstotliwości tego przydźwięku.

Słowa kluczowe autentyczność nagrania, przydźwięk sieciowy, kryterium ENF, data nagrania, sygnał sieci elektroenergetycznej

Wstęp

Do metod badania autentyczności nagrań cyfrowych należą m.in. analiza spektrograficzna wraz z tzw. odsłuchem krytycznym, binarna analiza zawartości nagłówka oraz metadanych pliku, badanie ciągłości fazy sygnałów zarejestrowanych w tle, jak również analiza długoterminowego widma nagrania pod kątem określenia szybkości opadania pasma górnego zakresu częstotliwości zapisanych w nagraniu. Jednakże jedną z najważniejszych metod badania autentyczności materiałów audio jest analiza nagrania w oparciu o kryterium ENF. Badania te polegają na ekstrakcji tzw. przydźwięku, który utrwalony został w nagraniu dowodowym i porównaniu częstotliwości jego zmian z częstotliwością prądu sieci elektroenergetycznej (ang. *Electric Network Frequency* – ENF). Metoda oparta na kryterium ENF opiera się na dwóch zasadniczych założeniach: a) zmiany częstotliwości prądu w sieci elektroenergetycznej są przypadkowe dla odpowiednio długich przedziałów czasu oraz b) w połączonej i zsynchronizowanej sieci elektroenergetycznej zmiany częstotliwości

prądu są takie same. Częstotliwość prądu sieci elektroenergetycznej jest nieustannie monitorowana, a jej wartości w poszczególnych chwilach czasu są przechowywane przez operatora. Porównanie tzw. przydźwięku pochodzącego z nagrania dowodowego z referencyjnym przebiegiem pochodzącym od operatora infrastruktury elektroenergetycznej może zatem zostać wykorzystane do weryfikacji autentyczności nagrania, jak również do określenia czasu jego rejestracji.

Czas rejestracji nagrania może zostać również określony za pomocą analizy zarejestrowanego tła akustycznego pod warunkiem, że występują tam zdarzenia akustyczne, które można skojarzyć z określonym czasem (np. audycja radiowa lub telewizyjna). Inną metodą jest odczyt znaczników czasu (ang. *timestamps*) zapisanych w systemie plików lub analiz metadanych. Każda z tych metod ma swoje wady i zalety oraz może zostać wykorzystana w określonych warunkach. Metoda oparta na kryterium ENF, której przedmiotem badań jest sygnał foniczny, wymagająca specjalnych algorytmów analitycznych, wydaje się być najbardziej obiektywna ze względu na potrzebę

dysponowania poza materiałem dowodowym także przebiegiem referencyjnym zarejestrowanym przez jednostkę stale monitorującą sieć elektroenergetyczną lub przebiegiem zarejestrowanym i przechowywanym przez laboratorium.

Teoretyczne założenia metody opartej na kryterium ENF szeroko opisano w literaturze przedmiotu. W praktyce nierzadko różnica pomiędzy wartościami sygnału przydźwięku i sygnału tła nie przekracza kilku decybeli, co utrudnia precyzyjne wyznaczenie przydźwięku w poszczególnych odcinkach czasu. Innym problemem jest ograniczony czas trwania nagrania, co powoduje, że obserwowana sekwencja zmian może zostać przypadkowo skorelowana z przebiegiem częstotliwości sieci elektroenergetycznej w losowej chwili czasu.

W poniższej pracy zaprezentowano wyniki badań nad precyzją metody ENF w wyznaczaniu czasu rejestracji nagrania. Czynniki poddane analizie był czas trwania nagrania oraz jakość wyekstrahowanego sygnału przydźwięku.

Znaczniki czasu (ang. *timestamps*)

Jak wspomniano wyżej źródłem informacji pozwalających określić czas powstania pliku (nagrania) mogą być jego atrybuty, tzw. znaczniki czasu MAC (ang. *Latest Modification, Access, Change*) zapisywane w systemie plików. Zarządzanie i organizacja danych oraz interpretacja zjawisk jest ściśle uzależniona od rodzaju systemu plików. Na przykład system plików NTFS (ang. *New Technology File System*) posiada tzw. główną tablicę plików (ang. *Master File Table*), która zawiera m.in. dwa atrybuty, w których znajdują się znaczniki MAC: \$STANDARD_INFORMATION oraz \$FILE_NAME. Znaczniki czasu w drugim z tych atrybutów nie mogą być modyfikowane ani przez normalną aktywność systemu, ani w wyniku działania złośliwego oprogramowania.

W tabeli numer 1 przedstawiono znaczniki czasu zapisywane przez kilka rodzajów systemów plików wykorzystywanych w systemach operacyjnych Windows oraz Linux. Na reprezentatywność znaczników czasu powiązanych z metadanymi

systemu plików może wpływać wiele czynników, wśród których najważniejsze to: aktywność użytkownika, operacje systemu operacyjnego lub jego właściwości (np.: tunelowanie plików, opóźniony zapis związany z wydajnością systemu plików), metoda przenoszenia (lub kopiowania) plików pomiędzy nośnikami oraz pomiędzy dyskami logicznymi, na których funkcjonują różne systemy plików.

Użytkownik, któremu przydzielono prawa zapisu pliku, może również zmodyfikować jego znaczniki czasu, nadając im arbitralnie wybrane wartości. Niektóre ingerencje tego typu mogą zostać wykryte np. poprzez badanie rozdzielczości tysięcznych części sekundy. Mimo tego, ustalenie rzeczywistych dat powstania/modyfikacji pliku przestaje być możliwe. W tym kontekście szczególnie wartościowa wydaje się być metoda wykorzystująca kryterium ENF.

Metoda oparta na kryterium ENF

Pod wpływem zmiennego pola elektromagnetycznego, którego źródłem jest prąd zmienny płynący w przewodach sieci elektroenergetycznej, w przewodnikach, na które oddziałuje to pole, indukuje się zmienny prąd o częstotliwości 50 Hz, co odpowiada częstotliwości prądu płynącego w sieci elektroenergetycznej. Ponieważ częstotliwość ta mieści się w zakresie pasma akustycznego, w niektórych rejestratorach dźwięku sygnał ten lub jego harmoniczne ulegają zapisowi równolegle z zapisywanym zdarzeniem akustycznym. Taką składową nazywamy w skrócie przydźwiękiem sieciowym. Zgodnie z rekomendacją Unii ds. Koordynacji Przesyłu Energii Elektrycznej częstotliwość prądu zmiennego płynącego przez sieć elektroenergetyczną jest monitorowana. Jeżeli różnica pomiędzy wartością nominalną częstotliwości a rzeczywistą nie przekracza 50 mHz, warunki pracy systemu uznaje się za normalne. W przypadku, gdy różnica zawiera się w przedziale od 50 mHz do 150 mHz, warunki pracy uznaje się za zaburzone.

Zjawisko odchylenia od częstotliwości nominalnej związane jest z różnicą pomiędzy obciążeniem systemu przesyłowego a ilością wytworzonej energii w elektrowniach. Częstotliwość prądu sieci

Tabela 1. Znaczniki czasu zapisywane w poszczególnych systemach plików systemu operacyjnego Windows i Linux [1][2][4].

	FAT	NTFS	ReFS (Protogon)	ext2	ext3	ext4
Ostatnia modyfikacja (ang. <i>latest modification</i>)/ rozdzielczość	tak/ 2 s	tak/ 100 ns	tak/ 100 ns	tak/ 1 s	tak/ 1 s	tak/ 100 ns
Ostatni dostęp (ang. <i>last accessed</i>)/ rozdzielczość	tak/ 1 dzień	tak/ 100 ns, możliwa opóźniona aktualizacja daty	tak/ 100 ns, możliwa opóźniona aktualizacja daty	tak/ 1 s	tak/ 1 s	tak/ 100 ns
Data utworzenia (ang. <i>created</i>)/ rozdzielczość	tak/ 10 ms	tak/ 100 ns	tak/ 100 ns	tak/ 1 s	tak/ 1 s	tak/ 100 ns

elektroenergetycznej rośnie, jeżeli następuje nadmiar produkcji, maleje natomiast, gdy zapotrzebowanie przewyższa ilość wyprodukowanej i wyemitowanej do sieci energii.

W badaniach prezentowanych w niniejszej pracy ekstrakcję przydźwięku z testowych nagrań prowadzono wg następującej procedury:

1. **Kwantyzacja** wszystkich nagrań testowych do 16 bit oraz podpróbkowanie nagrania, wartość częstotliwości próbkowania jest uzależniona od częstotliwości, na której przydźwięk występuje i jest ustalana w oparciu o twierdzenie Kotelnikowa-Shaonnona.
2. **Filtracja pasmowo-przepustowa** filtrem Butterwortha w wąskim paśmie wynoszącym $\pm 0,5$ wokół częstotliwości, na której występuje przydźwięk.
3. **Krótkoczasowa transformacja Fouriera STFT 2048**; jej definicja w postaci dyskretny w dziedzinie czasu ma następującą postać:

$$X(m, k) = \sum_n x[n]w[n - m]e^{-j2\pi kn/N}, \quad (1)$$

gdzie $w[n - m]$ to funkcja okna czasowego w pozycji $n - m$. Parametr N związany jest z dyskretyzacją częstotliwości.

4. **Detekcja składowej widma o największej amplitudzie w paśmie sygnału, w którym występuje składowa podstawowa, czyli 49,5 Hz – 50,5 Hz lub jej harmonicznej** pozwala określić wartość przydźwięku w danym odcinku czasu. Na skuteczność tego etapu procesu ekstrakcji przydźwięku sieciowego silnie wpływa poziom zakłóceń w stosunku do poziomu sygnału przydźwięku. W sytuacji, gdy różnica tych poziomów jest niewielka,

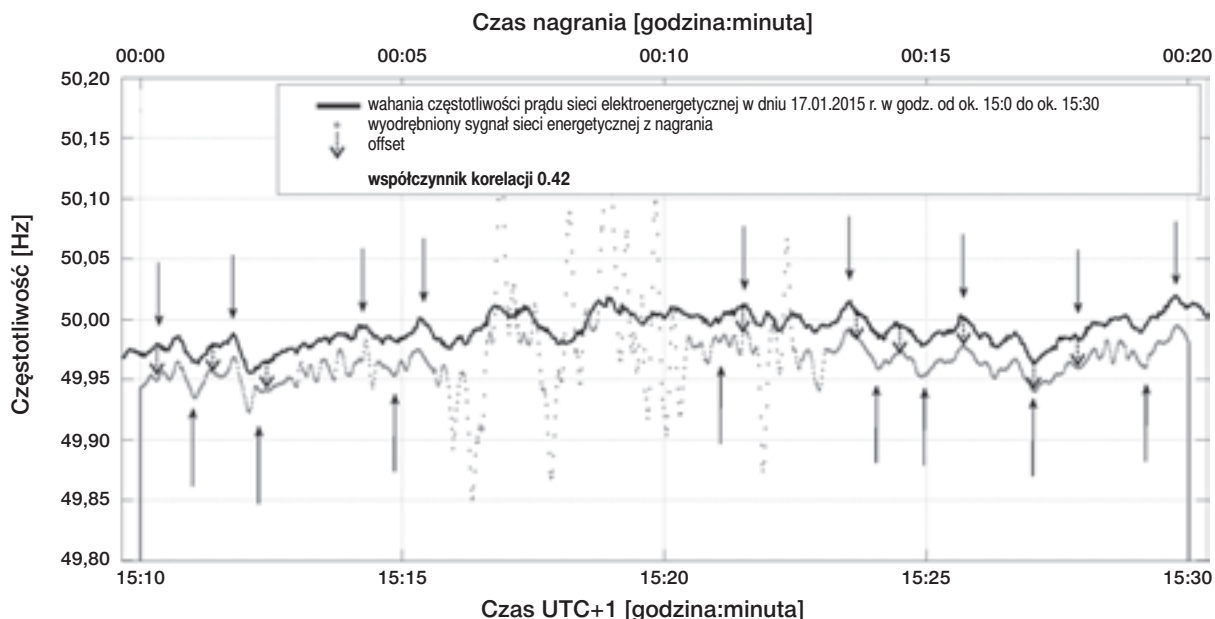
prawdopodobieństwo wyznaczenia błędnej wartości przydźwięku jest większe; przykład błędnej detekcji widoczny jest na rycinie numer 2 np. w przedziale czasu od ok. 15:16 do ok. 15:21.

5. Wyznaczenie najlepszego dopasowania charakterystyki referencyjnej ENF z przebiegiem przydźwięku pochodzącym z nagrania dowodowego. Kryterium dopasowania w niniejszych badaniach jest korelacja sygnałów zdefiniowana poniżej:

$$\hat{R} = \sum_{n=1}^{N-|m|} x(n)y(n - m), \quad (2)$$

gdzie $y(n)$ to częstotliwość przydźwięku sieciowego, $x(n)$ to częstotliwość prądu sieci elektroenergetycznej, natomiast m to opóźnienie czasowe.

Na rycinie nr 1 zaprezentowano przykład wykorzystania metody opartej na kryterium ENF. Na płaszczyźnie rozpiętej pomiędzy osią odciętą, na której odłożony został czas (oś górna odpowiada czasowi trwania nagrania, oś dolna reprezentuje czas środkowoeuropejski), oraz osią rzędną, na której odłożono częstotliwość – wyznaczono dwie charakterystyki. Charakterystyka oznaczona linią ciągłą reprezentuje wahania częstotliwości prądu sieci elektroenergetycznej. Natomiast charakterystyka oznaczona linią punktową oznacza przydźwięk wyekstrahowany z nagrania dowodowego. Na podstawie wykonanej analizy można stwierdzić, że istnieje zgodność porównywanych przebiegów. Na niektóre, charakterystyczne lokalne ekstrema wskazują groty wskaźników. Pomiędzy porównywanymi charakterystykami istnieje stałe w funkcji czasu przesunięcie (tzw. offset) wynoszące około 16 mHz.



Ryc. 1. Porównanie częstotliwości prądu sieci z przydźwiękiem wyekstrahowanym z nagrania dowodowego. Na rysunku widoczna jest nieciągłość sygnału przydźwięku.

Analizując charakterystykę zamieszczoną na rycinie numer 1, zauważyć można również przedziały czasu (np. od około 15:16 do około 15:21 czasu UTC+1), w których wartości przydźwięku nie zostały precyzyjnie wyznaczone, co związane jest z zakłóceniami występującymi w dowodowym nagraniu. Na dokładność wyznaczenia przydźwięku – oprócz zastosowanego algorytmu – wpływ ma odstęp poziomu sygnału użytecznego (w tym przypadku przydźwięku) od zarejestrowanego tła. Jak widać w przedmiotowym przypadku pomimo istnienia przedziału czasu, w którym wartość przydźwięku została błędnie wyznaczona, możliwe było zsynchronizowanie porównywanych przebiegów, a dzięki temu wyznaczenie daty zarejestrowania zdarzenia.

Wyniki badań

Na rycinie numer 2 przedstawiono wyniki badań skuteczności wyznaczania czasu rozpoczęcia rejestracji z wykorzystaniem metody opartej na kryterium ENF w funkcji czasu trwania nagrania oraz jakości utrwalonego w nim przydźwięku. Materiałem badawczym były trzy nagrania, każde

o maksymalnym czasie trwania od około 4 minut do około 10 minut, w których utrwalony został sygnał sieci elektroenergetycznej. W każdym z tych nagrań przydźwięk sieciowy charakteryzował się różnym współczynnikiem SNR (ang. *signal to noise ratio*) wynoszącym: 24 dB, 22 dB, 21 dB (w dwóch nagraniach: 1. o czasie max. 10 min, 2. o czasie max. 4 min), 17 dB, 15 dB (w dwóch nagraniach: 1. o czasie max. 4 min, 2. o czasie max. 3 min) oraz 14 dB. Ponadto każde z tych nagrań charakteryzowało się różnym offsetem. Zjawisko to polega na przesunięciu przydźwięku wzdłuż osi częstotliwości od częstotliwości nominalnej, na której przydźwięk powinien występować. Jest ono spowodowane właściwościami pracy danego urządzenia rejestrującego, które wprowadza własne zakłócenia w postaci składowej stałej. Offset scharakteryzowano w literaturze przedmiotu, na rycinie numer 1 przedstawiono jedynie jego efekt. Dalsze szczegóły techniczne dotyczące nagrań, które wykorzystano w badaniach, zamieszczono w tabeli 2.

W celu wyznaczenia wpływu czasu trwania sygnału sieci elektroenergetycznej na skuteczność badanej metody, długość analizowanych nagrań pomniejszono o 15 sekund, a następnie podejmowano próbę określenia daty i godziny rozpoczęcia rejestracji

Tabela 2. Charakterystyka badanych nagrań.

Nagranie SNRdB	Charakterystyka	
Rec_24dB_100Hz_10min	SNR: f [Hz], dla której wyznaczono przydźwięk: Max. czas trwania nagrania w serii analiz: Rodzaj zakłóceń: Czy wyznaczony przydźwięk jest ciągły: Potwierdzona data rejestracji:	24 dB 100 Hz 10 minut Szum szerokopasmowy o poziomie stałym w czasie Nie zaobserwowano zaników sygnału ENF 17 lipca, godzina 18:59
Rec_22dB_100Hz_3min	SNR: f [Hz], dla której wyznaczono przydźwięk: Max. czas trwania nagrania w serii analiz: Rodzaj zakłóceń: Czy wyznaczony przydźwięk jest ciągły: Potwierdzona data rejestracji:	22 dB 100 Hz 3 minuty Szum szerokopasmowy o poziomie stałym w czasie Nie zaobserwowano zaników sygnału ENF 6 lutego, godzina 12:11
Rec_21dB_rys2_100Hz_10min	SNR: f [Hz], na której wyznaczono przydźwięk: Max. czas trwania nagrania w serii analiz: Rodzaj zakłóceń: Czy wyznaczony przydźwięk jest ciągły: Potwierdzona data rejestracji:	21 dB 100 Hz 10 minut Szum szerokopasmowy o poziomie stałym w czasie Nie zaobserwowano zaników sygnału ENF 17 lipca, godzina 19:04
Rec_21dB_rys3_50Hz_4min	SNR: f [Hz], na której wyznaczono przydźwięk: Max. czas trwania nagrania w serii analiz: Rodzaj zakłóceń: Czy wyznaczony przydźwięk jest ciągły: Potwierdzona data rejestracji:	21 dB 50 Hz 4 minuty Szum szerokopasmowy o poziomie stałym w czasie Nie zaobserwowano zaników sygnału ENF 15 stycznia, godzina 17:57

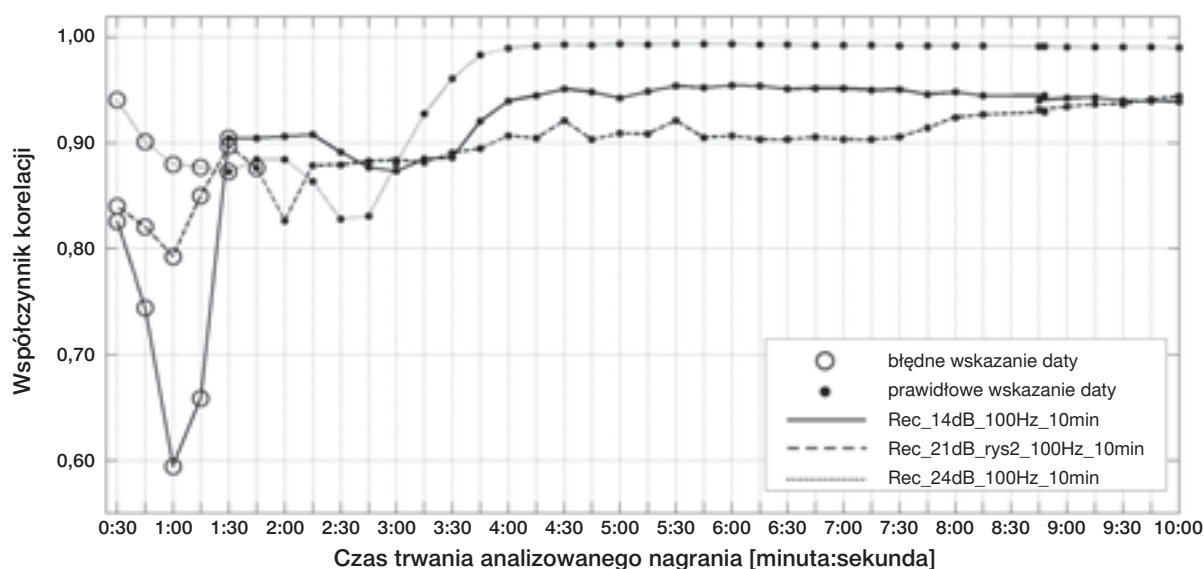
Nagranie SNRdB	Charakterystyka	
Rec_18dB_100Hz_3min	SNR: f [Hz], na której wyznaczono przydźwięk: Max. czas trwania nagrania w serii analiz: Rodzaj zakłóceń: Czy wyznaczony przydźwięk jest ciągły: Potwierdzona data rejestracji:	18 dB 100 Hz 3 minuty Szum szerokopasmowy o poziomie stałym w czasie Nie zaobserwowano zaników sygnału ENF 6 lutego, godzina 12:27
Rec_17dB_50Hz_4min	SNR: f [Hz], na której wyznaczono przydźwięk: Max. czas trwania nagrania w serii analiz: Rodzaj zakłóceń: Czy wyznaczony przydźwięk jest ciągły: Potwierdzona data rejestracji:	17 dB 50 Hz 4 minuty Szum szerokopasmowy o poziomie stałym w czasie Nie zaobserwowano zaników sygnału ENF 15 stycznia, godzina 18:27
Rec_15dB_rys3_50Hz_4min	SNR: f [Hz], na której wyznaczono przydźwięk: Max. czas trwania nagrania w serii analiz: Rodzaj zakłóceń: Czy wyznaczony przydźwięk jest ciągły: Potwierdzona data rejestracji:	15 dB 50 Hz 4 minuty Szum szerokopasmowy o poziomie stałym w czasie Nie zaobserwowano zaników sygnału ENF 15 stycznia, godzina 18:57
Rec_15dB_rys4_100Hz_3min	SNR: f [Hz], na której wyznaczono przydźwięk: Max. czas trwania nagrania w serii analiz: Rodzaj zakłóceń: Czy wyznaczony przydźwięk jest ciągły: Potwierdzona data rejestracji:	15 dB 100 Hz 3 minuty Sporadyczne zakłócenia o charakterze impulsowym oraz szum szerokopasmowy o poziomie stałym w czasie Zanik sygnału ENF w trakcie trwania zakłóceń impulsowych. Przykład zaniku sygnału ENF zaprezentowano na rysunku nr 1 6 lutego, godzina 12:48
Rec_14dB_100Hz_10min	SNR: f [Hz], na której wyznaczono przydźwięk: Max. czas trwania nagrania w serii analiz: Rodzaj zakłóceń: Czy wyznaczony przydźwięk jest ciągły: Potwierdzona data rejestracji:	14 dB 100 Hz 10 minut Szum szerokopasmowy o poziomie stałym w czasie Nie zaobserwowano zaników sygnału ENF 17 lipca, godzina 19:48

w oparciu o kryterium ENF, obserwując przy tym wartość współczynnika korelacji. Uzyskane w ten sposób wyniki zaprezentowano na rycinach 2, 3 oraz 4, przy czym wyniki pogrupowano na rysunkach wg maksymalnej długości nagrań wynoszącej 10 min, 4 min, 3 min. W analizowanych przypadkach przydźwięk występował przez cały czas trwania nagrania, zgodnie z opisem zaprezentowanym w tabeli 2.

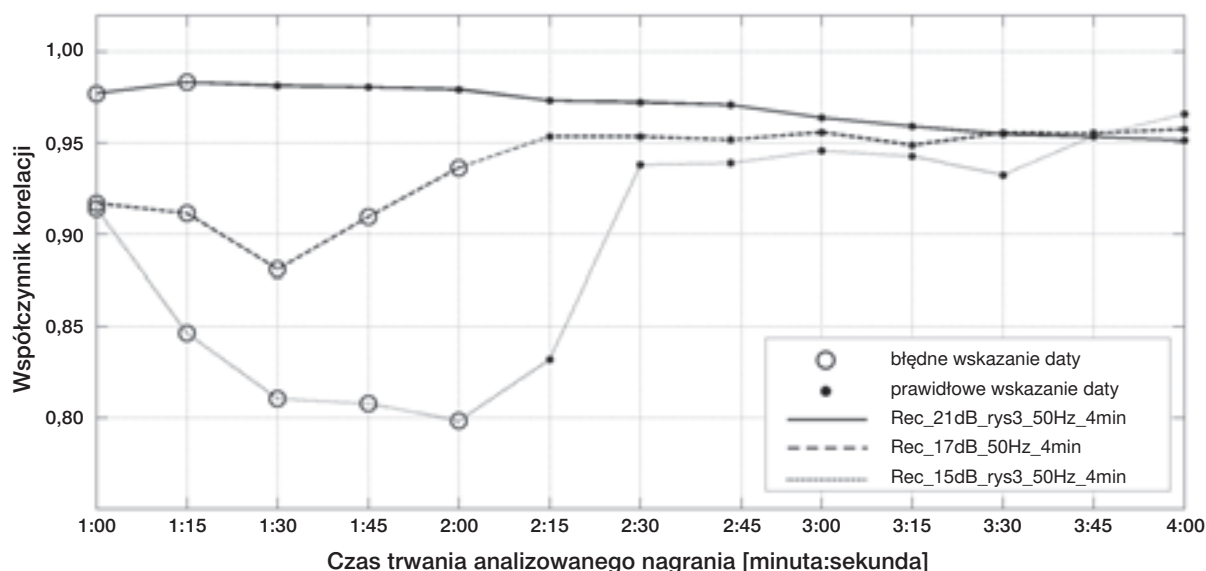
W wyniku analizy wstępnej stwierdzono, że na wykorzystaną metodę wyznaczania najlepszego dopasowania charakterystyki referencyjnej ENF z przebiegiem sygnału przydźwięku, opartą na korelacji sygnałów, którą zaprezentowano w wyrażeniu (2), nie wpływa zjawisko offsetu. Wobec tego w dalszej analizie zjawisko to pominięto. Spostrzeżenie to zostało już odnotowane w literaturze przedmiotu.

Na rycinie numer 2 widoczne są wyniki obliczonego współczynnika korelacji dla trzech przypadków, dla

których maksymalna długość nagrania wynosiła nie mniej niż 10 minut. W trzech analizowanych przypadkach współczynnik korelacji zaczynał maleć, gdy czas trwania nagrania wynosił około 4 minut. Nie wpływa to jednak na prawidłowość wyznaczenia daty i godziny powstania nagrania. W przedziale między 4-minutowym a 3-minutowym czasem trwania nagrania nastąpił spadek wartości korelacji w sposób liniowy, przy czym nadal daty i godziny wykonania rejestracji wyznaczono w sposób prawidłowy. W przedziale pomiędzy 3-minutowym czasem trwania nagrania, a wynoszącym około 1 minutę i 45 sekund, nastąpiło duże zróżnicowanie wartości korelacji, a dotychczas obserwowana monotoniczność została utracona. Nadal jednak nie stwierdzono wpływu czasu trwania nagrania na dokładność wyznaczenia daty i godziny. Gdy wartość współczynnika SNR wynosiła 21 dB i czas trwania nagrania wynosił



Ryc. 2. Skuteczność metody wyznaczania czasu rozpoczęcia rejestracji w funkcji czasu trwania nagrania oraz jego jakości.

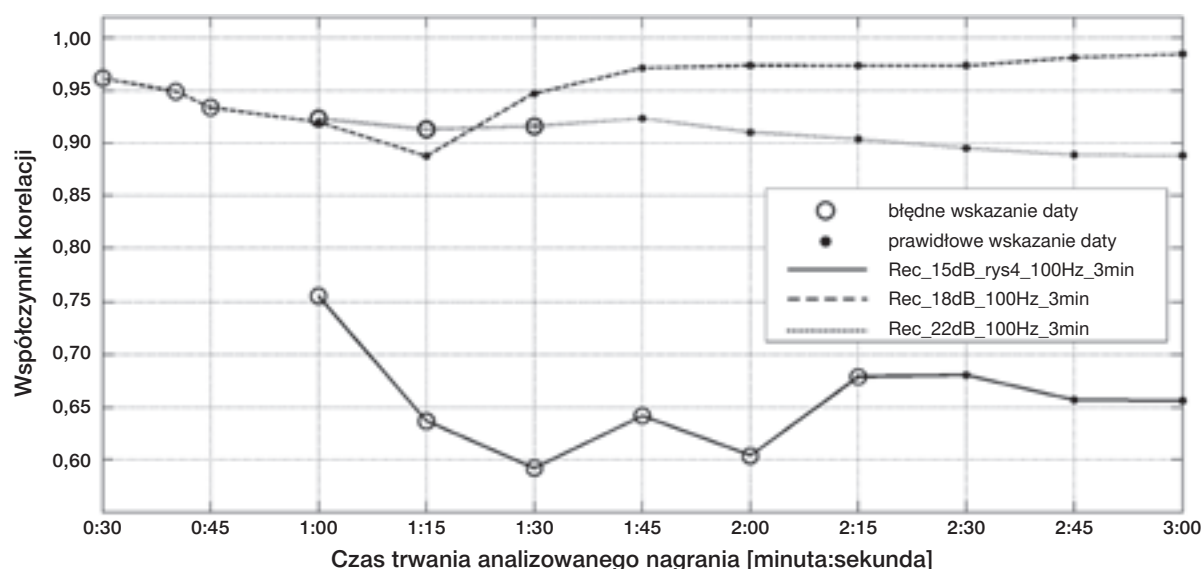


Ryc. 3. Skuteczność metody wyznaczania czasu rozpoczęcia rejestracji.

mniej niż 1 minutę i 45 sekund, nastąpiło przypisanie analizowanego przydzwisku do sygnału referencyjnego z losowej chwili czasu. Gdy SNR wynosił 24 dB oraz 14 dB, błędne wyznaczenie daty i godziny nastąpiło, gdy czas trwania nagrania równy był 1 minucie i 30 sekundom.

Na rycinie numer 3 przedstawiono wynik analizy, w której wyjściowa długość nagrania wynosiła maksymalnie 4 minuty. Dla przypadków, dla których SNR wnosł 15 dB oraz 17 dB, błędne wyznaczenie daty i godziny wykonania nagrania nastąpiło, gdy czas jego trwania nie przekraczał 2 minut. Dla wariantu, w którym SNR wynosił 21 dB, błędne wyznaczenie godziny rozpoczęcia rejestracji nastąpiło, gdy czas jego trwania wynosił nie więcej niż 1 minutę i 15 sekund.

Na rycinie numer 4 przedstawiono wyniki badań dla przypadków, w których maksymalny czas trwania nagrań nie przekraczał 3 minut. Dla SNR wynoszącego 18 dB błędne wskazanie daty i godziny rozpoczęcia rejestracji nastąpiło, gdy czas trwania nagrania nie przekraczał 45 sekund. Jest to jednocześnie przypadek, w którym wyznaczono właściwą datę i godzinę rozpoczęcia rejestracji przy pomocy najkrótszego ze wszystkich analizowanych nagrań. Gdy SNR wynosił 22 dB, prawidłowe wyznaczenie daty i godziny rozpoczęcia rejestracji nastąpiło dla czasu trwania nagrania nie krótszego niż 1 minuta i 45 sekund. W przypadku, gdy SNR był równy 15 dB, minimalny czas trwania nagrania pozwalający wyznaczyć w sposób prawidłowy datę i godzinę rozpoczęcia rejestracji wynosił 2 minuty i 30 sekund.



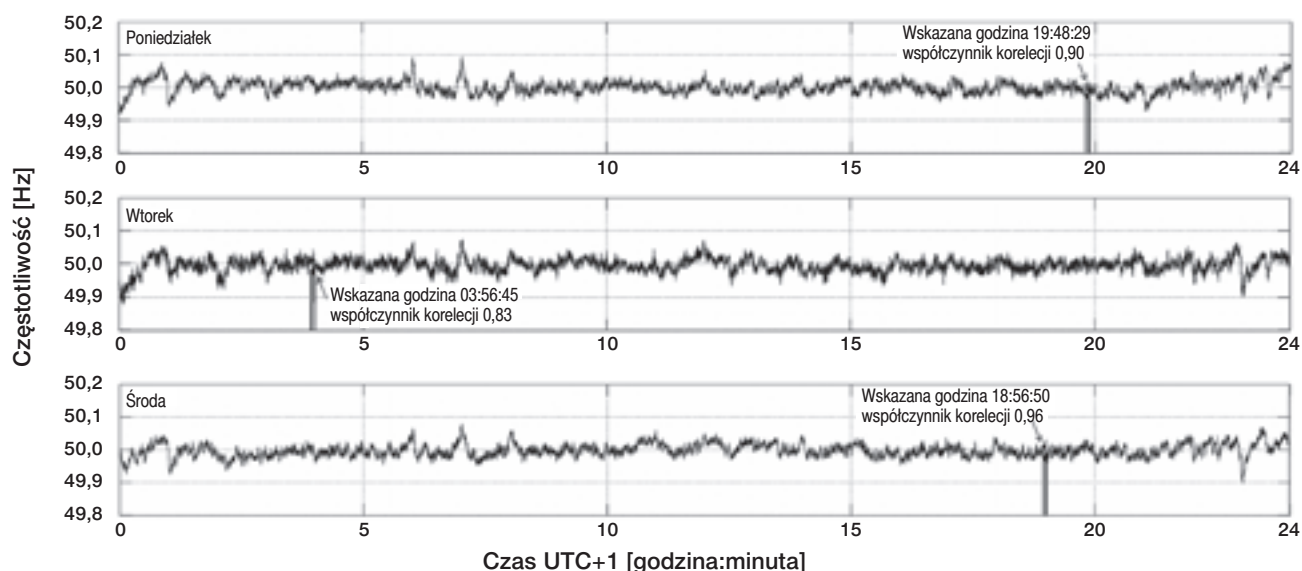
Ryc. 4. Skuteczność metody wyznaczania czasu rozpoczęcia rejestracji.

Jest to jednocześnie jedyny przypadek, w którym występowały nieciągłości przydzwięku, będące skutkiem występowania zakłóceń. Pomimo relatywnie niskiej wartości korelacji uzyskiwanej we wszystkich punktach pomiarowych, w sytuacji, gdy czas trwania nagrania był nie krótszy niż 2 minuty i 30 sekund, uzyskiwano prawidłowo wyznaczoną datę i godzinę.

We wszystkich przypadkach badania prowadzone były dwutorowo: poprzez obserwację wartości współczynnika korelacji oraz graficznie poprzez analizę wizualną zgodności dopasowanych sygnałów. Przykład takiej analizy graficznej zaprezentowano na rycinie 1.

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że dokładność wyznaczenia daty rozpoczęcia rejestracji uzależniona jest przede wszystkim od czasu trwania nagrania. Wysoka wartość uzyskiwanej korelacji nie świadczy o prawidłowości wyznaczonej daty i godziny. Im krótszy czas trwania sygnału przydzwięku wyekstrahowanego z nagrania dowodowego, tym większe prawdopodobieństwo dopasowania losowego odcinka przebiegu częstotliwości prądu sieci elektroenergetycznej. Przykład takiego zjawiska widoczny jest na rycinie numer 5, gdzie zaprezentowano przebiegi częstotliwości prądu sieci elektroenergetycznej w ciągu trzech kolejnych dni. Po obliczeniu przydzwięku z nagrania dowodowego, którego czas trwania nie przekracza 30 sekund,



Ryc. 5. Dopasowanie przydzwięku z nagrania dowodowego, którego czas trwania nie przekracza 30 sekund, do sygnału referencyjnego reprezentującego zmienność częstotliwości prądu w ciągu trzech kolejnych dni.

podjęto próbę dopasowania tego przydźwięku do referencyjnych przebiegów częstotliwości prądu sieci elektroenergetycznej. W efekcie zdołano dopasować przydźwięk do odcinków przebiegów referencyjnych w ciągu trzech kolejnych dni, przy czym uzyskana wartość korelacji przekraczała 0,8.

Zgodnie z opisem zamieszczonym w tabeli 2, z wyjątkiem nagrania oznaczonego Rec_15dB_rys4_100Hz_3min, wszystkie badane przebiegi przydźwięków charakteryzowały się ciągłością. Analizując współczynnik SNR w kontekście poprawności uzyskiwanej daty i godziny rozpoczęcia rejestracji oraz wartości korelacji, a także długości poszczególnych nagrań, należy stwierdzić, że wartość współczynnika SNR jest nieistotna, dopóki zastosowany algorytm detekcji przydźwięku w danej chwili czasu skutecznie wyznacza wartość częstotliwości tego przydźwięku. Gdy SNR przekroczy pewien próg, który jest ściśle zależny od warunków danego nagrania, jego wzrost powoduje jednoczesny wzrost prawdopodobieństwa błędnej detekcji przydźwięku. W takiej sytuacji również szczególnie istotny dla poprawności wyznaczenia daty i godziny powstania nagrania zaczyna być jego czas trwania.

Na podstawie uzyskanych wyników możliwe jest sformułowanie ogólnych wniosków, jakimi powinien kierować się ekspert prowadzący badania z wykorzystaniem metody opartej na kryterium ENF. W przypadku, gdy czas trwania nagrania jest krótszy niż około 4 minuty, w celu wyznaczenia daty powstania nagrania konieczna jest znajomość przedziału czasu, w którym nagranie mogło potencjalnie powstać. Ponadto niezależnie od otrzymanej wartości korelacji uzyskany wynik powinien być poddany analizie graficznej, która pozwala w sposób wizualny ocenić zgodność dwóch przebiegów. Przykład takiej analizy zaprezentowano na rycinie 1.

Źródła rycin i tabel: autorzy

Bibliografia

1. Altheide C., Carvey H., *Informatyka śledcza. Przewodnik po narzędziach open source*, Helion, Gliwice 2014.
2. Avantika M., MingMing C., Bhattacharya S., Dilger A., Alex T., Vivier L., *The new ext4 filesystem: current status and future plans, Proceedings of the Linux Symposium*, Ottawa, ON, CA: Red Hat. Retrieved 2008-01-15.
3. Biernacka I., Radzio I., *Supervision of the application of rules concerning primary and secondary control of frequency in the interconnected power systems UCTE/CENTREL*, Present-Day Problems of Power Engineering Conference APE'99, Gdańsk 2001.
4. Carrier B., *File system forensic analysis*, Addison Wesley Professional, 2005.
5. Grigoras C., *Digital audio recording analysis – the electric network frequency criterion*, "International Journal of Speech Language and the Law" 2005, t. 12, nr 1, s. 63–76.
6. Grigoras C., *Applications of ENF criterion in forensics: Audio, video, computer and telecommunication analysis*, "Forensic Science International" 2007, nr 167(2–3), s. 136–145.
7. Huijbregtse M., Geradts Z., *Using the ENF criterion for determining the time of recording of short digital audio recordings*, "Computational Forensics", t. 5718, s. 116–124.
8. Kajstura M., Trawinska A., Hebenstreit J., *Application of the electrical network frequency (ENF) criterion. A case of a digital recording*, "Forensic Sci Int." 2005, Dec 20, nr 155(2–3), s. 165–71.
9. Koenig B.E., *Authentication of Forensic Audio Recordings*, "Journal of AES" 1990, nr 38, Issue 1/2, s. 3–33.
10. *UCTE Operation Handbook: P1-E-C1* (Instrukcja pracy połączonych systemów UCTE – Temat 1, rozdz. P1-A, P1-E-C1).