

音響信号に含まれる電源雑音を用いた改ざん検出

代表研究者

西村 明

東京情報大学総合情報学部 教授

1 はじめに@

交流電源周波数(ENF: Electric Network Frequency)は、最大で±0.1%程度の、同じ電源網内ではほぼ同期した周波数変動を示す。この変動は、瞬時の電力消費量と供給量とのバランスで決まり、前者が増えると周波数は下がり、後者が増えると上がる傾向にある[1]。この特徴は、任意の録音において電源周波数とその整数倍周波数に生じるハム雑音にも反映されている。よって、ある電源網の周波数変動を24時間365日記録したデータベースを構築しておき、その電源網内で録音された任意の録音から電源雑音(ハム雑音)を抽出して周波数変動(ENF)を測定し、ENFデータベースとのマッチングをとることで、録音時刻の同定が可能となる[2]~[4]。つまり、録音信号における録音時刻の証拠として法科学的に利用できるとされている。

さらに、電力網内での電力消費地点と供給地点の位置関係により生じる、周波数変動の伝搬に伴って、各地点で測定された交流周波数の変動には僅かなずれや相違が存在することが知られている[1]。この僅かな相違が、比較的高い変動周波数(0.数Hz以上)に現れることを利用して、Gargら[5]は、米国東海岸で最大610km離れた地点間で、ENF高周波変動の地点間時系列相関を用いて、4箇所の既知観測地点から1箇所の未知観測地点を位置推定している。一方、日本ではENFを用いて録音信号から時刻や電源網、録音地点を同定する研究や調査は、著者の知る限り全く行われていない。よってENFは、録音信号における録音時刻の証拠として法科学的に利用されていない。

また、録音信号の法科学的検証を妨害する目的で、電源雑音が除去される、あるいはさらに偽装されることの想定も必要である。ハム雑音はノッチフィルタによる除去が一般的である。この場合はENFを検出することができないが、ノッチフィルタが除去する電源周波数付近のスペクトルの凹みにより、電源雑音が録音後に除去された事実として検出することは可能である。これも録音信号に対する法科学分析のひとつである。

これに対して、除去したスペクトル上の谷間へ、周辺周波数のパワーとほぼ同程度の電源周波数を中心とするバンドパスノイズを付加することで、その谷間を目立たなくするという、除去した事実を隠蔽する反法科学処理が可能である。さらに、そこに別の周波数変動を持つ、例えば別時刻に記録されたENFから周波数変動音を合成し、もとの電源雑音の振幅と同じになるように調整して電源雑音として付加する、録音時刻の偽装という反法科学処理も可能である。これらの偽装や反法科学処理を検出する方法として、基準参照反法科学処理検出手法が存在する。これは、録音地点が明らかな場合、同じ地点で後日同様な録音装置を用いて録音することで得られる基準信号について、分析対象信号と同じ統計量を算出して比較することで、反法科学処理の有無を検出する手法である。しかし、この手法で検出できない偽装手法もありえる。

本研究は、マイクロホンやラインケーブル経由での録音に含まれる微細な電源雑音の周波数変動(ENF)を検出し、録音時刻の同定、録音地点の推定、改ざんの検出等を行う技術の検証と、その改ざんを隠ぺいする手法への対抗策を明らかにするものである。そのため、まず電源信号のENFを24時間365日計測してデータベースを構築した。次に音響信号に含まれるENFを分析抽出してENFデータベースと照合することにより録音属性(録音日時や場所)を推定する手法を開発した。また、従来法で検出できない、音響信号に含まれるENFを除去し改ざんして録音属性等を偽装する改ざん攻撃に対して、その攻撃を検出する手法を開発した。

2 ENF データベースの構築と属性推定

これまで日本国内において、電源周波数の変動を記録し、同一電力網内での複数地点でのその変動の相違を調べた報告はない。録音信号から電源周波数の変動であるENFを検出して分析するためには、まず国内での電源周波数の変動の様子を調べることで、録音信号の属性を推定するための参照データとなる、電源周波数の変動を24時間365日記録したENFデータベースを構築する必要がある。

2-1 ENF データベースの構築

100V の商業交流電源コンセントに、AC-AC コンバータを接続し 6 ~ 9 V(rms) に減圧後、100 ~ 500 mV(rms) (600 Ω 負荷時) 程度までセラミック抵抗によって分圧して、ノート PC(Fujitsu FMV-R8250 あるいは FMV-R8270) のオーディオ入力端子に与えた。ノート PC の OS は、Linux ver. 3.4.110(Vine Linux 6.3) であり、サウンドドライバは ALSA ver. 1.0.25 を用いた。arecord コマンドを cron を用いて毎日 0:00 AM より動作させ、24 時間と 1 分間(0:00 付近の欠落を避けるため)、サンプリング周波数 6000 Hz、量子化 16-bit、モノラルで録音した。録音完了後、データは MPEG4ALS を用いて約半分程度(500 Mbyte 前後)に可逆圧縮し、インターネット経由でサーバコンピュータに集約した。このような測定点を首都圏に 7 箇所設け、7 つの測定ノート PC のシステムクロックは、NTP4 (Network Time Protocol ver.4) を用いて stratum 1 の ntp.nict.go.jp に同期させた。

録音した電源信号を、従来研究に比べて高い ENF 変動周波数領域まで調べるため、時間分解能と周波数分解能を両立させた、解析信号を用いた瞬時周波数測定[6] を利用し、ENF の時系列データを 10Hz の周期で求めた。その結果を図 1 に示す。この図より、ゆっくりとした周波数変動は 7 か所ほぼ同じだが、細かい変動は地点ごとにやや異なることが分かる。

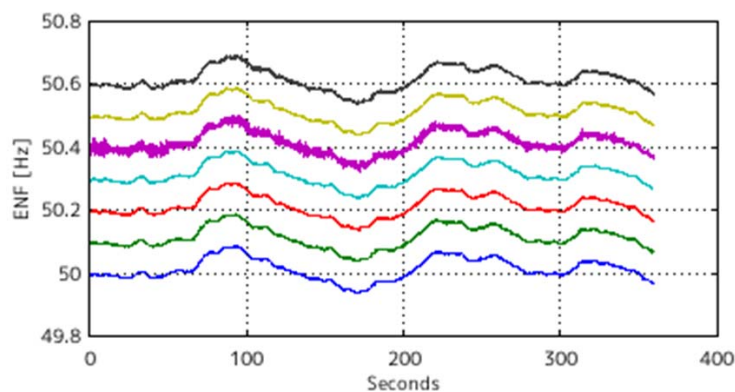


図 1 首都圏 7 か所で測定された 10 分間の ENF. それぞれ 0.1Hz ずつずらして表示している。

2-2 ENF の高周波数成分と地理的距離との関係

ENF 波形を周波数分析し、変動周波数ごとの ENF 強度時間変化の地点間非類似度と地理的距離との相関係数を算出して、図 3 に示した。この結果から、ENF の変動周波数 0.4 ~ 1.0 Hz にかけて地理的距離との相関が相対的に高く、平均すると 0.8 Hz で最も高くなることが分かった。つまり、地点間距離が短いほど、0.8 Hz の変動周波数における ENF 時系列強度変化は類似するということが、0.8 Hz の変動を抽出するには、ENF は 2 Hz の周期での分析と記録が必要であることが分かった。

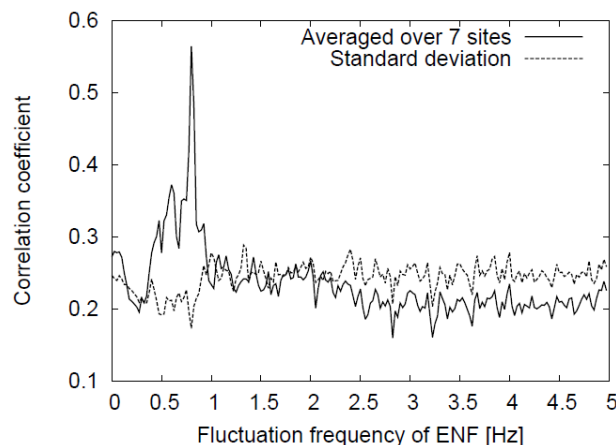


図 2 ENF 変動周波数ごとの地点間非類似度と地理的距離との相関係数

このことを利用して、既知の ENF データベースに記録された複数地点の ENF 変動と、未知の ENF 変動との

類似度を調べることで、未知の録音位置を推定できることが示唆された。これを検証するために、7地点で得られた10分間のENFのうち、1か所を未知とおいてそのENFと、既知の6地点のENFとの類似度から地点間距離を推定し、その位置を地図上にプロットした結果が図3である。推定位置と本来の位置との推定誤差は20~27 km程度であった。現在のENFの類似度に基づく位置推定アルゴリズムでは、地理的制約を全く与えていないため、東京湾上(図中央下部)にも推定地点が現れる。今後は地理的な推定制限条件を加えかつ現実の送電網上で距離を推定することで、推定精度を高められる可能性がある。

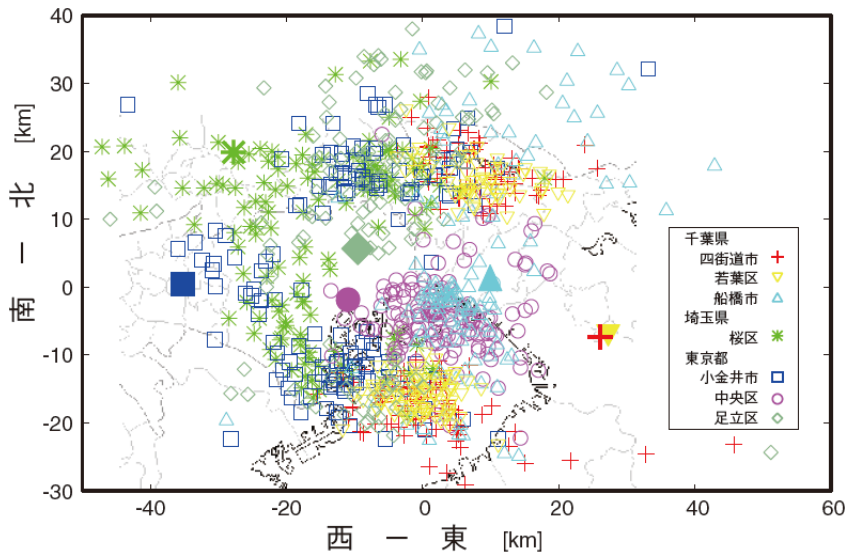


図3 10分間のENFの類似度から得られた、ENF測定地点の推定結果。大きい点が実際の測定地点であり、小さい点がそれらの推定地点である。

3 ENF 改ざんとその検出

3-1 電源雑音の除去とENF改ざん

録音信号から電源雑音をノッチフィルタで除去し、別の時刻や電源網の交流電源信号あるいは合成電源雑音を加算することで、ENFの偽装は可能である。従来研究では、電源周波数近傍の振幅成分における統計量に着目することで、偽装の識別が可能であった。本報告では従来法で識別が不可能な、電源雑音と逆位相の合成信号を加算することによる電源雑音の除去方法を示す。具体的には、半分重なりをもつ一定時間フレームごとに電源雑音位相と振幅を推定し[7]、電源雑音の逆位相信号を合成して加算することによって、電源雑音除去を行う。その電源雑音除去前後のスペクトログラムを図4に示した。除去処理は、電源周波数である50Hz付近のスペクトル成分には、ほとんど影響を与えていないことが分かる。このため、従来手法では除去の痕跡を見つけることは非常に困難である。

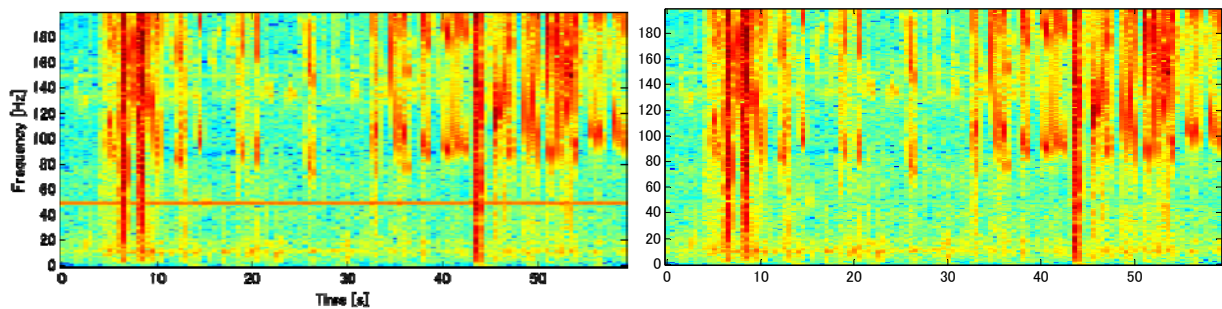


図4 左：電源雑音が含まれた録音のスペクトログラム、右：電源雑音を除去したスペクトログラム

本研究で対象とした録音信号は、千葉大学3人会話コーパス[8,9]に収録された、chibaXX32-A.wav (XXは

01 ~ 12) の 12 ファイルである。これらは、3 者の会話音声を録音した際の話者 A の音声を収録したものである。いずれも、サンプリング周波数は 16 kHz、量子化ビット数は 16 bit、1 チャンネル、長さは 9 分 26 秒であり、図 4 左 に示したような 50 Hz の電源雑音を含んでいる。これらは、同じ場所で、異なる時間帯に、同じ録音機材を用いて録音されたものなので、ある 1 つの録音信号に ENF 偽装が行われた場合、それ以外の 11 の録音信号の音響特徴を参照する、1 節で説明した基準参照反法科学処理検出を行うことができる。

上述の電源雑音除去を行った後、別の時刻に録音された電源信号の振幅を元の電源雑音振幅と同じになるよう調整して加算し、ENF を偽装する。こうして得られた録音信号は、従来の電源周波数ピーク振幅の時間変化の統計量に基づく反法科学処理検出では検出できない。

3-2 ENF 偽装の検出

前節で示した ENF 偽装に対して、電源雑音除去の痕跡の統計的性質を用いた識別方法を検討する。前節で示した電源雑音除去処理は、フレーム長 N サンプルの半分ごとに電源雑音信号を合成し、Hann 窓をかけた後にフレーム長の半分だけ前後に重ね合わせて合成する。こうして合成された電源雑音信号の周波数は、フレームが最も重なる $N/4$ および $3N/4$ 付近で、電源雑音信号の真の周波数との誤差が最も大きくなる。つまり、電源雑音除去後の電源周波数の成分には、 $N/2$ の周期で、振幅が他の区間よりわずかに大きい区間が生じることになる。よって、電源雑音除去のフレーム周期が分かれば、電源雑音のない録音信号を分析することで、電源雑音が除去されたのか元々含まれていないのかを検出できる。そのためには、最初に録音信号に含まれる電源雑音（偽装されたものか、本来のものかは分からない状態）をまず除去することで、電源雑音を除去した痕跡を見つけやすくしておく。

その後、 $N/4$ づつフレームをずらしながら Hanning 窓掛け後の N 点の波形を DFT して得られた、 t 番目のフレームの離散電源周波数 fe における振幅を $S(fe, t)$ とおく。このとき、 $\log S(fe, 2t-1)$ と $\log S(fe, 2t)$ の間で対応のある差の両側 t 検定を実施し、差がないという帰無仮説を棄却する危険率 p を得る。DFT を行うフレームの開始時刻 tf を 0 から $N/4$ までずらしていくと、 $N/8$ 付近で p は極大、つまり偶数フレームと奇数フレームの振幅に有意差が無い、という結果が得られる。実際の分析結果を、横軸にフレームのオフセット時間 tf 、縦軸に p 値として、図 5 に示した。図中の Un-forged は、偽装のない録音信号に含まれる電源雑音を除去した後に得られたもので、Forged は 3.1 節に従い電源雑音を除去後に別の電源雑音を加算することで ENF を偽装した録音信号から、再度電源雑音を除去した後に得られたものである。この図から、ENF 偽装が行われた録音信号は、電源雑音の除去を 2 度受けているため、より偶数フレームと奇数フレームとの振幅差が大きく、 p 値の分布が鋭くなっていることが分かる。

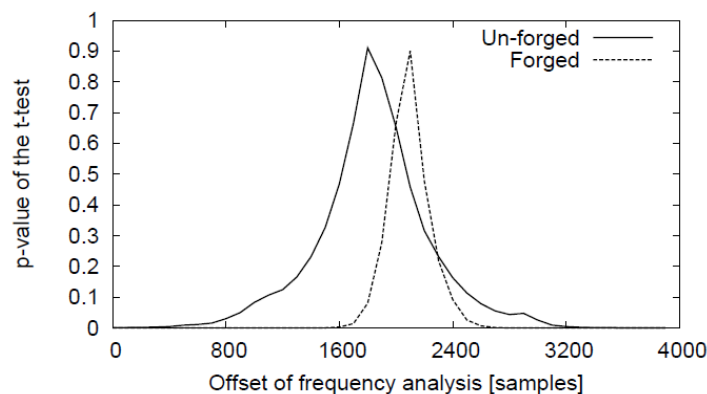


図 5 電源雑音除去処理後に行う周波数分析のオフセットに対する、偶数フレームと奇数フレームの振幅差の t 検定で得られた p 値. Un-forged (ENF 偽装なし)、Forged (ENF 偽装あり)の比較。

実際には 2 度目に行われる電源除去処理の開始時刻 td は未知なので、 td を $N/2$ ($N = 16000$) までずらしていくと、 $N/4$ だけずれたときに、偶数フレームと奇数フレームの振幅の差は最も小さくなり、周波数分析フレームのいずれの開始時刻に対しても p は大きくなる。つまり、 td をパラメータとして p の分布を調べる必要がある。図 6 は、横軸を td 、縦軸を tf として p 値の分布を示した。図 6 左側は、本来の電源雑音を初めて除去した録音信号を分析した結果(偽装なし)を示し、図 6 右側はその後任意の電源雑音信号を加算し ENF

偽装を行った後に2度目の電源雑音除去を行った後の分析結果(偽装あり)を示している。偽装した録音を分析した場合に対して p 値の分布が鋭いのは、2度の電源雑音除去のフレームが重なる電源雑音除去処理開始時刻帯であり、 p 値の分布が広がっているのは2度の電源雑音除去のフレームが大きくずれる時間帯($td \neq N/4$ 付近)であることが分かる。

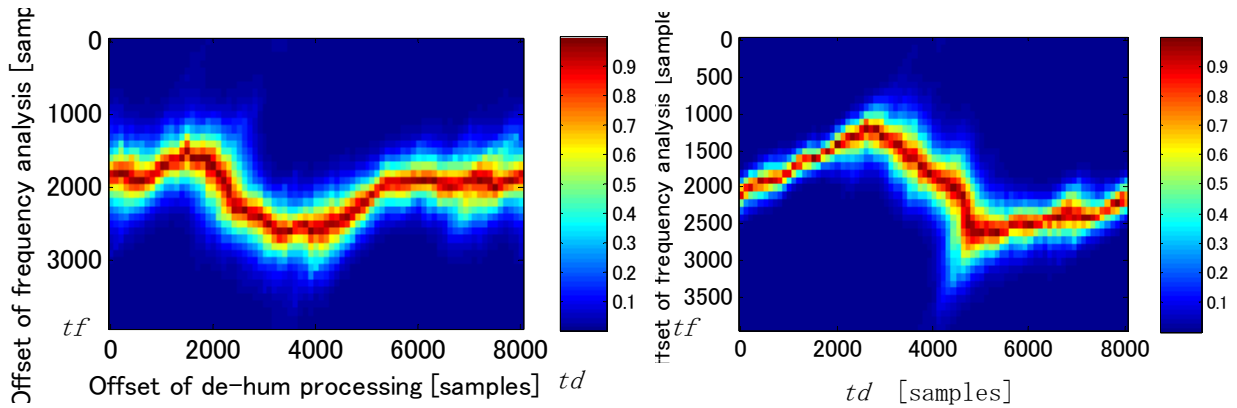


図6 左側 Un-forged (偽装なし) の p 値の分布、右側 Forged (偽装あり) の p 値の分布。

この p 値の分布の鋭さを評価するため、 p 値が 0.001 より小さい(図6中の紺色の部分)領域の面積を計算し、ある閾値より大きければ偽装あり、そうでなければ偽装なしと判定する。この閾値を変えながら12個の録音ファイルについて、ROC 曲線を描いたのが図7である。これより、多くのケースで偽装を正しく判定できることが分かった。

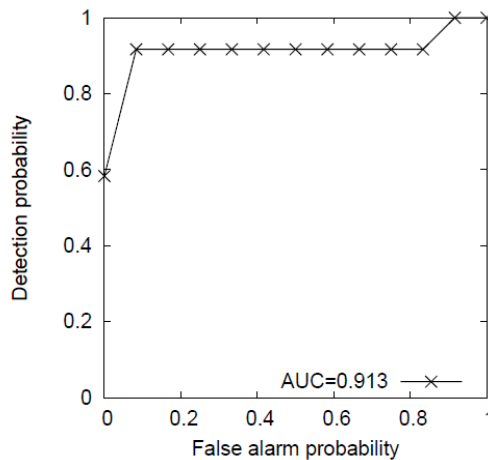


図7 p 値が 0.001 未満となる領域の面積に基づく識別を行った際の ROC 曲線。

4 考察

4-1 ENF の抽出と分析

録音信号から ENF を高精度に(1秒間に2回)検出することで、録音位置を推定できる可能性を示したが、ENF を高精度に検出する手法については、従来手法より高精度な手法は開発できなかったため、さらなる検討と改善が必要と考える。特に日本では、北米やヨーロッパより総電源容量が少ないため、ENF の変動幅がより大きくなることが予想されていたが、その通りであった。よって、これまで研究が進められていた北米やヨーロッパより短い時間の録音信号によって、データベースとのマッチングや周波数変動測定が有効にできると考えられるので、それらについても今後の検討が必要である。

4-2 ENF を用いた録音位置推定

位置推定精度を高めるためには、観測地点を増やす方法が考えられる。ただし、地点間の地理的距離は、ENF の非類似度と完全には対応しないことが分かっている。つまり、ENF の変動の地点間相違は、電源網内での発電所の位置、需要地点の位置、それらの接続関係などに影響をうける[1] からである。よって、誤差はある程度許容する必要がある。また、先行研究のように、電源網内のより広い範囲に観測点を置けば、推定誤差は観測地点間距離に対して相対的に小さくなると見込まれる。

4-3 ENF の改ざんとその検出

今回示した電源雑音除去以外にも、電源雑音の振幅と瞬時位相を推定して、別の手法で逆位相の電源雑音を合成して加算することで、同様な電源雑音除去が可能である。その場合でも、振幅と瞬時位相推定誤差による除去残りの成分が生じるはずであり、それを検出する手法が望まれる。今回行った、電源雑音除去の有無の識別や、除去後の ENF 偽装の識別に対しては、フレーム処理に基づいた電源雑音除去や電源雑音合成が行われており、かつフレーム長が既知という前提が必要である。また、今回はサンプリング周波数 16,000 Hz に対して、80 回の電源雑音除去とそのそれぞれに対して 40 回の周波数分析と t 検定の実施を必要としており、演算コストは非常に高い。フレーム長が未知の場合は、フレーム長も変えて上記を繰り返す必要があり、さらに演算コストは高まる。よって、従来研究で示された ENF 偽装識別も、本手法を実施する前に実施する必要がある。

今後は、本手法の電源雑音除去処理と周波数分析処理を間引きして演算コストを下げる必要がある。また、より少ない演算コストで識別を行う手法を検討する必要がある。さらに、フレーム長が処理を通じて一定でないような ENF 偽装に対応するためには、別の識別手法を検討する必要がある。

今回示した、ENF 偽装の識別対象録音ファイルに対して、電源雑音除去処理を行った後で偽装を検出する手法は新しく、従来研究では提案されていない。この手法は、後で付加された交流電源信号を取り去って電源雑音除去の痕跡を見つけやすくするという意味において、今後の偽装検出手法の枠組みとして有効であると考えられる。

5 まとめ

本研究は、マイクロホンやラインケーブル経由での録音に含まれる微細な電源ハム雑音に含まれる ENF を検出し、録音時刻の同定、録音地点の推定、改ざんの検出等を行う技術の検証と、その改ざんを隠ぺいする手法への対抗策を明らかにした。海外にはこれらの研究例はあるが、国内では皆無であり、国内での ENF の特性を明らかにする必要がある。そのため、まず首都圏内 7 か所で電源信号を 24 時間 365 日録音して ENF を検出し、各地点で得られたゆっくりとした電源周波数の変動が一致することを確認した。次に ENF データベースを構築し、音響信号に含まれる ENF を分析抽出して ENF データベースと照合することにより録音属性(録音日時や場所)を推定する手法を検討した。特に ENF の 0.8 Hz の変動は、録音地点間距離に近いほど類似する傾向にあることが分かり、この特性を用いて録音地点の推定ができる可能性を示した。また、音響信号に含まれる ENF を検出できないように、除去し改ざんすることも可能であり、それを検出する従来手法が無効になる場合を示した。このような録音属性等を偽装する改ざん攻撃に対して、その攻撃を検出する新たな手法を開発した。このような研究実績は国内では初のものであり、先行している国外研究成果と併せて、国内での ENF の音響法科学への活用が期待される。

【参考文献】

1. S.J. Tsai, A. L. Zhang, Y.L. Phadke, M.R. Ingram, S.C. Bell, I.S. Grant, D.T. Bradshaw, D. Lubkeman, and L. Tang, "Frequency sensitivity and electromechanical propagation simulation study in large power systems," IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol.54, no.8, pp.1819-1828, 2007.
2. M. Kajstura, A. Trawinska, and J. Hebenstreit, "Application of the electrical network frequency (ENF) criterion a case of a digital recording," Forensic Science International, vol.155, pp.165-171, 2005.

3. M.K. Rogers and J.M. Smith, "Computer forensics for the forensic audio professional," Proceedings of the 39th AES Conference on Audio Forensics, 2010.
4. C. Grigoras, J.M. Smith, and C. Jenkins, "Advances in ENF database configuration for forensic authentication of digital media," Proceedings of the 131st Convention of the Audio Engineering Society, no.8492, 2011.
5. R. Garg, A. Hajj-Ahmad, and M. Wu, "Geo-location estimation from electrical network frequency signals," Proceedings of ICASSP 2013, pp.2862-2866, 2013.
6. A. Nishimura and N. Koizumi, "Measurement of sampling jitter in analog-to-digital and digital-to-analog converters using analytic signals," Acoustical Science and Technology, vol.31, no.2, pp.172-180, 2010.
7. L. Fu, P.N. Markham, R.W. Conners, and Y. Liu, "An improved discrete fourier transform-based algorithm for electric network frequency extraction," IEEE Trans. Fund. Info. Forensics and Security, vol.8, no.7, pp.1173-1181, 2013.
8. Y. Den and M. Enomoto, "Conversational informatics: An engineering approach," pp.307-330, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.
9. 伝康晴, 榎本美香, "千葉大学 3 人会話コーパス," 2014. <http://research.nii.ac.jp/src/Chiba3Party.html>

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Analysis and localization for ENF signals in the Tokyo metropolitan area	Proceedings of AES 141st Convention	2016 年 9 月
首都圏における同時多点電源周波数変動観測に基づく観測地点の推定	電子情報通信学会技術報告	2016 年 11 月
録音信号に含まれる電源周波数信号の除去および偽装による反法科学手法とそれらの検出	電子情報通信学会技術報告	2017 年 5 月
Anti-forensics subtraction of electrical network frequency trace and its countermeasure	Proceedings of AES International Conference on Audio Forensics	2017 年 6 月