

# 無線音響センサネットワークの同期のための音・電波ミキサの開発

## Development of a Sound and Radio-Wave Mixer for Synchronization of Wireless Acoustic Sensor Networks



木下 裕磨(Ph. D. Yuma Kinoshita)

東海大学情報理工学部情報科学科・講師

(Lecturer at Department of Human and Information Science, Tokai University)

電子情報通信学会, 日本音響学会, 米国電気電子学会 (IEEE), アジア太平洋信号情報処理学会 (APSIPA)

受賞: APSIPA Annual Summit and Conference 2021 Best Paper Award(2021年)、電気通信普及財団 テレコムシステム技術学生賞 入賞(2021年)、電子情報通信学会 信号処理研究会賞(2020年)、The 23rd International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2020) Best Paper Award(2020年)、IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2019) Excellent Paper Award Gold Prize(2019年)、IEEE Signal Processing Society (SPS) Japan Student Conference Paper Award(2018年)、IEEE Signal Processing Society (SPS) Tokyo Joint Chapter Student Award(2018年)、IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems Best Paper Award(2016年)

研究専門分野: デジタル信号処理, 画像・音響情報処理, 機械学習

### あらまし

本研究では、無線音響センサネットワークにおける多チャンネル信号の同期問題を解決するため、標準電波 JJY をパイロット信号として音信号と同時に収録する音信号同期フレームワークを検討した。各センサノードで音信号と標準電波を重畳して収録し、パイロット信号間の相互相関に基づき信号を同期する枠組みを提案した。計算機シミュレーション実験により、標準電波を重畳しない場合と比較して高精度に信号の同期が実現できることを確認した。さらに、音・電波ミキサのハードウェア実装に向けた検討を行い、アンテナ

で受信されるパイロット信号の特性を評価するとともに、増幅回路およびミキサ回路を設計した。

### 1. 研究の目的

音源の位置や音の到来方向といった音の空間情報は、音源強調や音響シーン分析\*1 などの高度な音響信号処理のために有用である。広範囲にわたる音とその空間情報を取得可能なセンシング方式として、無線マイクロフォンを広い範囲に分散配置し多チャンネルの音響信号を収録する分散マイクロフォンアレイ\*2 (無線音響センサネットワーク) が期待されている。分散マイクロフォンアレイは、たとえば建物内の複数の部屋に無線マイクロフォンを設置して音を収録するもので、広い範囲の音環境を同時にモニタリングすることを可能にする技術である。

しかしながら、分散マイクロフォンアレイの実用化にあたっては、個々のマイクロフォンで収録される多チャンネル信号の非同期性が大きな課題となっている。通常のマイクロフォンアレイでは複数のマイクロフォンが一つの筐体に近接して配置されており、一つのクロックに基づいて同期してアナログ-デジタル (A/D) 変換を行うことができる。一方、無線音響センサネットワークでは各マイクロフォンが独立した機器であるため、サンプリング周波数\*3 の微小なずれや収録開始時刻の差異が生じ、収録される信号間に時間的なずれが発生する。この非同期性を解消しなければ、多チャンネル信号を活用した高度な音響信号処理を行うことができない。

本研究の目的は、この同期問題を解決する新しい手法として、各センサノードにおいて収録される音信号に対し、通常は電波時計の時刻合わせなどに利用される標準電波 JJY\*4 をパイロット信号\*5 として重畳して収録し、このパイロット信号を手がかりとして音信号を同期する枠組み (フレームワーク) を開発することにある (図1参照)。

# 無線音響センサネットワークの同期のための音・電波ミキサの開発

## Development of a Sound and Radio-Wave Mixer for Synchronization of Wireless Acoustic Sensor Networks

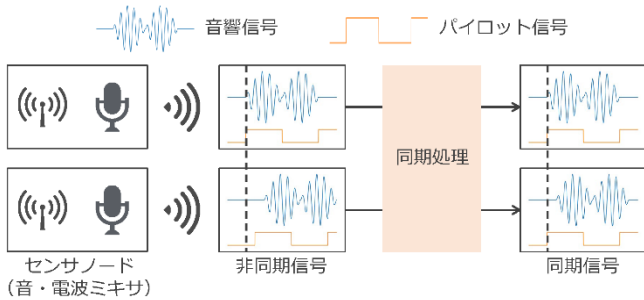


図 1

### 2. 研究の背景

分散配置されたマイクロフォンから得られる多チャンネル信号の同期には、これまでにいくつかの手法が提案されている。

第一に、有線接続による多チャンネル信号の同時収録がある。この方法では厳密な信号の同期が達成できるものの、広範囲にケーブルを敷設した上で専用の多チャンネルレコーダを用いる必要があり、設置の手間やコストが大きいという問題がある。第二に、GPS (Global Positioning System) 衛星からの信号を用いる同期手法もある [1]。しかし、GPS 信号を利用する手法では、信号の同期のために 1 秒ごとのパルス波を利用するため、信号 1 秒ごとに線形な同期のずれを補償できるとどまり、サンプル単位での厳密な同期には不十分である。加えて、GPS 衛星からの信号を受信できない屋内環境では利用が困難である。第三に、Bluetooth 等の無線通信を用いる同期手法があるが、音と映像との同期を想定しているものが多く、30 ミリ秒程度の精度にとどまり、音響信号処理に必要とされるサンプル単位の精度には達していない。そのため、無線通信とハードウェア補正を組み合わせるネットワーク全体の同期を図る手法も提案されている [2]。第四に、音響信号のみを用いるブラインド同期手法 [3]-[9] も研究されているが、音場条件や信号モデルに一定の仮定を置くものが多く、適用可能な状況が限定される場合がある。

このように、従来の手法にはそれぞれ制約があり、屋内外を問わず広く利用可能で、かつサンプル単位の高精度な同期を実現できる手法の開発が求められている。そこで本研究では、情報通信研究機構 (NICT) が

運用する標準電波 JJY に着目した。標準電波 JJY は日本全国で受信可能であり、屋内でも受信できる場合が多い。この標準電波をパイロット信号として利用することで、従来手法の課題を克服する新しい同期フレームワークの実現を目指し、研究を実施した。この研究で得られた成果の一部は、文献 [10] として発表した。

### 3. 研究の方法

#### 3. 1 提案する同期フレームワーク

提案する音信号同期フレームワークの概要を図 1 に示す。本フレームワークでは、各センサノードにおいて、マイクロフォンで収録した音信号とアンテナで受信したパイロット信号 (標準電波) とを混合して収録する。パイロット信号には、NICT が運用する標準電波 JJY のうち搬送波周波数が 40 kHz のものを用いる。40 kHz は人間の可聴域 (おおよそ 20 Hz から 20 kHz) の上限を超えた周波数帯域であるため、パイロット信号が重畳されても音の聴感上の品質には影響を与えない。

音信号とパイロット信号を混合する際には、まず音信号に対してカットオフ周波数 24 kHz の低域通過フィルタ (ローパスフィルタ\*6) を適用し、40 kHz 付近の周波数成分を除去する。その後、フィルタ処理された音信号とパイロット信号とを加算する。このとき、混合信号を適切に記録するため、サンプリング周波数を 96 kHz に設定する (通常の音信号収録では 48 kHz が一般的であるが、40 kHz のパイロット信号を記録するためにはその 2 倍以上のサンプリング周波数が必要となる)。

信号の同期処理では、まず、収録された混合信号に対して高域通過フィルタ (ハイパスフィルタ) を適用し、音の成分を除去してパイロット信号成分のみを抽出する。次に、基準となるセンサノードのパイロット信号と他のセンサノードのパイロット信号との間で相互相関関数\*7 を計算し、その最大点を求めることにより、センサノード間の時間的なずれ (時間シフト) を推定する。推定された時間シフトに基づいて信号を補正することで、多チャンネル信号の同期を実現する。

# 無線音響センサネットワークの同期のための音・電波ミキサの開発

## Development of a Sound and Radio-Wave Mixer for Synchronization of Wireless Acoustic Sensor Networks

### 3. 2 計算機シミュレーション実験

提案する同期フレームワークの実現可能性を検証するため、計算機シミュレーション実験を実施した。実験では、10 m × 7.5 m × 3.5 m の室内に4つのセンサノードが設置された状況を想定し、音源からセンサノードへの音の伝搬および音信号と標準電波信号の混合をシミュレートした。音の伝搬のシミュレーションには、室内音響シミュレーションのためのオープンソースライブラリである Pyroomacoustics [11] を用いた。音源信号には、大規模音データセットである AudioSet [12] から選択した、音声・音楽・環境音など10種類の音を使用した。

各センサノードの収録開始時刻のずれを模し、1番目のセンサノードを基準として他のセンサノードの信号にランダムな時間シフトを施した。パイロット信号間の相互相関関数の最大点として時間シフトを推定し、推定値と真値との二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) により推定精度を評価した。

実験では、音信号とパイロット信号のパワー比 (SPR: Signal-to-Pilot Ratio) を 0 dB、10 dB、20 dB、30 dB と変化させた。SPR が 0 dB とは音信号とパイロット信号のパワーが等しい状態を意味し、SPR が大きくなるほどパイロット信号が音信号に対して相対的に弱くなる。

### 3. 3 実験結果

シミュレーション実験の結果を表1に示す。標準電波を重畳しない場合の時間シフト推定の平均 RMSE は 549.226 サンプルであったのに対し、標準電波を重畳した場合には、SPR が 0 dB のとき平均 RMSE は 0.000 サンプル、SPR が 10 dB のときは 0.849 サンプルとなり、高精度な同期が実現された。SPR が 20 dB および 30 dB の場合でも、標準電波を重畳しない場合と比較して推定精度は大幅に改善された。この結果から、パイロット信号が音信号に比べて弱い場合でも、標準電波を用いた同期フレームワークが有効に機能することが確認された。

また、シミュレーション実験を通して、音信号にカットオフ周波数 24 kHz の低域通過フィルタを適用した後パイロット信号を重畳すること、および、相互

相関関数の計算においてパイロット信号の周波数成分に大きな重みを与えることが、同期精度の向上に重要であることが明らかになった。これは、同じ音源からの信号が複数のセンサノードに到達するため、音源信号成分自体が同期処理を妨げる要因になり得ることに起因する。

表 1. 時間シフト推定の平均 RMSE (10 セグメント)

Signal	w/ JJY				
	w/o JJY	0	10	20	30
SPR		0	10	20	30
Average	549.22	0.00	0.84	21.48	150.40
Std.	6	0	9	5	8
	0.774	0.00	2.54	11.96	76.952
		0	6	7	

### 3. 4 ハードウェア実装に向けた検討

シミュレーション実験による有効性の検証に加え、音・電波ミキサのハードウェア実装に向けた検討も進めた。パイロット信号として標準電波 JJY の送信周波数 40 kHz の信号を想定し、超高精度水晶式時刻送信機 P18-NTPSA を用いて標準電波と同等の信号を発信させ、40 kHz に調整されたフェライトバーアンテナから得られる出力信号を測定した。測定の結果、送信機とアンテナ間の距離を約 15 cm とした条件下で、受信信号の電圧が約 6 mV 程度であることを確認した。この微小信号を扱うため、増幅率を 0 倍から最大 100 倍まで調整可能な増幅回路を設計した。音響信号の取得には既存の高感度アンプ付コンデンサマイクروفオンを用い、音響信号とアンテナにより受信されるパイロット信号を加算するミキサ回路の設計も完了した。設計した回路のプロトタイプを実装し、コンデンサマイクで取得した音響信号と、標準電波 JJY と同じ 40 kHz の正弦波を重畳できることを確認した。

### 4. 将来展望

本研究では、計算機シミュレーションにより標準電波を用いた音信号同期フレームワークの有効性を示し、

# 無線音響センサネットワークの同期のための音・電波ミキサの開発

## Development of a Sound and Radio-Wave Mixer for Synchronization of Wireless Acoustic Sensor Networks

ハードウェアの設計およびプロトタイプ作成までを完了した。今後は、実環境における分散音響センシング実験を実施して、提案手法の実用性を検証する必要がある。

将来的には、本研究で開発した音・電波ミキサを用いることで、建物内や街中などの広い空間における音環境のモニタリングシステムの構築が可能になると期待される。具体的な応用としては、高齢者や幼児の見守りシステム、工場や大規模施設における異常音検知システム、スマートシティにおける環境音の監視・分析システムなどが考えられる。また、音・電波ミキサを用いて同期した多チャンネル音響信号からなる大規模データセットを構築し、深層学習技術と組み合わせることで、音響シーン分析技術のさらなる高精度化につながると期待できる。

### おわりに

本研究では、無線音響センサネットワークにおける多チャンネル信号の同期問題に対し、標準電波 JJY をパイロット信号として音信号と同時に収録する同期フレームワークを検討した。計算機シミュレーション実験により、標準電波を重畳することで高精度な信号の同期が実現可能であることを示した。また、音・電波ミキサのハードウェア実装に向けて、アンテナ受信信号の特性評価、増幅回路の設計、およびミキサ回路の設計を行った。今後は、ハードウェアの製作と実環境実験による検証を進めていく予定である。

### 用語解説

\*1 音響シーン分析：音から周囲の状況（オフィス、電車内、屋外など）や発生している事象（人が話している、車が走っているなど）を認識・分類する技術。

\*2 分散マイクロフォンアレイ：複数のマイクロフォンを離れた位置に分散配置して音を収録する方式。マイクロフォンアレイは、複数のマイクロフォンで得られた信号を組み合わせることで、特定の方向の音を強調するなどの機能を実現する技術である。

\*3 サンプル周波数：アナログ信号をデジタル信号に変換する際に、1秒間に信号の値を読み取る回数。たとえば 48 kHz のサンプル周波数では、1秒

間に 48,000 回の計測を行う。

\*4 標準電波 JJY：情報通信研究機構（NICT）が運用する長波標準電波で、おたかどや山（40 kHz）とはがね山（60 kHz）から送信されている。電波時計の時刻合わせなどに広く利用されている。

\*5 パイロット信号：受信側で信号の同期や補正のために用いる既知の基準信号。

\*6 低域通過フィルタ（ローパスフィルタ）：設定した周波数（カットオフ周波数）以下の信号成分を通過させ、それより高い周波数の成分を減衰させるフィルタ。

\*7 相互相関関数：2つの信号間の類似度を時間のずれの関数として表したもの。相互相関関数が最大となる時間のずれが、2つの信号間の時間的なずれに対応する。

### 参考文献

[1] I. Ikemi, K. Harada, A. Sugahara, and Y. Hiraguri, "A basic study on estimating location of sound source by using distributed acoustic measurement network," in Proc. INTER-NOISE 2021 - 2021 Int. Congr. Expo. Noise Control Eng., art. no. IN21\_2439, Aug. 2021, doi: 10.3397/IN-2021-2439.

[2] J. Schmalenstroeer, P. Jebramcik, and R. Haeb-Umbach, "A combined hardware-software approach for acoustic sensor network synchronization," Signal Processing, vol. 107, pp. 171-184, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.sigpro.2014.06.030.

[3] Y. Masuyama, K. Yamaoka, and N. Ono, "Joint optimization of sampling rate offsets based on entire signal relationship among distributed microphones," in Proc. INTERSPEECH 2022, Sep. 2022, pp. 704-708, doi: 10.21437/INTERSPEECH.2022-97.

[4] S. Markovich-Golan, S. Gannot, and I. Cohen, "Blind sampling rate offset estimation and compensation in wireless acoustic sensor networks with application to beamforming," in Proc. Int. Workshop Acoustic Signal Enhancement (IWAENC), art. no. 6309395, Sep. 2012.

[5] S. Miyabe, N. Ono, and S. Makino, "Blind

## 無線音響センサネットワークの同期のための音・電波ミキサの開発

Development of a Sound and Radio-Wave Mixer for Synchronization of Wireless Acoustic Sensor Networks

compensation of interchannel sampling frequency mismatch for ad hoc microphone array based on maximum likelihood estimation," *Signal Processing*, vol. 107, pp. 185-196, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.sigpro.2014.09.015.

[6] L. Wang and S. Doclo, "Correlation maximization-based sampling rate offset estimation for distributed microphone arrays," *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Lang. Process.*, vol. 24, no. 3, pp. 571-582, Mar. 2016, doi: 10.1109/TASLP.2016.2517326.

[7] D. Cherkassky and S. Gannot, "Blind synchronization in wireless acoustic sensor networks," *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Lang. Process.*, vol. 25, no. 3, pp. 651-661, Mar. 2017, doi: 10.1109/TASLP.2017.2655259.

[8] M. H. Bahari, A. Bertrand, and M. Moonen, "Blind sampling rate offset estimation for wireless acoustic sensor networks through weighted least-squares coherence drift estimation," *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Lang. Process.*, vol. 25, no. 3, pp. 674-686, Mar. 2017, doi: 10.1109/TASLP.2017.2649958.

[9] A. Chinaev, P. Thune, and G. Enzner, "Double-cross-correlation processing for blind sampling-rate and time-offset estimation," *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Lang. Process.*, vol. 29, pp. 1881-1896, 2021, doi: 10.1109/TASLP.2021.3071967.

[10] Y. Kinoshita, "標準電波の同時収録に基づく音信号同期フレームワークの検討," in 2024 年電子情報通信学会総合大会, art. no. A-5-11, Mar. 2024.

[11] R. Scheibler, E. Bezzam, and I. Dokmanic, "Pyroomacoustics: A Python package for audio room simulation and array processing algorithms," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process. (ICASSP)*, Apr. 2018, pp. 351-355, doi: 10.1109/ICASSP.2018.8461310.

[12] J. F. Gemmeke, D. P. W. Ellis, D. Freedman, A. Jansen, W. Lawrence, R. C. Moore, M. Plakal, and M. Ritter, "Audio Set: An ontology and human-labeled

dataset for audio events," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process. (ICASSP)*, Mar. 2017, pp. 776-780, doi: 10.1109/ICASSP.2017.7952261.

この研究は、令和4年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和5～6年度に実施されたものです。