The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	独立成分分析に基づく非同期信号空間分離のための統計的信号処理に関する研究
Author(s)	瀧川, 将弘
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/81870
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　瀧川　将弘　）	
論文題名	独立成分分析に基づく非同期信号空間分離のための 統計的信号処理に関する研究

論文内容の要旨

本論文は，筆者が大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻在学中に行った独立成分分析に基づく非同期信号空間分離のための統計的信号処理に関する研究成果をまとめたものであり，以下の6章で構成した．

第1章は序論であり，IoT通信において重要な通信規格であるBLE（Bluetooth Low Energy）のシステム容量を，BLEのペリフェラルの規格に変更を加えることなくスケーラブルに増大させる手段として，セントラル側に独立成分分析に基づく多重信号分離手法を適用した空間多重方式の実現を研究目標に設定し，その際の課題について述べることで本研究の位置づけを明確化した．

第2章ではまず，BLEシステムにおいて独立成分分析に基づく空間多重をするための統計的信号処理に関する導入を行い，問題点を明確化した．具体的には，独立成分分析では受信信号を分離行列で線形変換し，その独立成分分析出力の要素間の独立性が最大になるような分離行列を逐次的に決定していくことで信号分離を行うことができることを述べ，さらにBLEシステムに対して独立成分分析を適用するにあたって以下の2つの解決すべき課題があることを示した．1つ目の課題は，BLE端末に使用される部品には小型かつ安価であることが求められることに伴って発生する端末・受信機間の時間・周波数同期誤差の補償であった．2つめの課題は，空間多重信号の分離を独立成分分析で行う結果として発生する雑音の有相関化に対する補償であった．本論文ではこの2つの課題を解決するために必要な手法を第3，4，5章で提案した．

第3章では，多重信号分離方式における時間・周波数同期誤差補償法を提案した．独立成分分析における時間タイミングの誤差の影響はパケットの先頭と終わりに対して発生するが，分離行列の導出にあたっては，受信信号全体を使う必要はなく，送信信号が重複しているところのみを使って独立成分分析の計算を行えばよいので，その考え方に基づく分離精度の低下抑制手法を提案した．また，周波数同期誤差に対しては，通常用いられる遅延検波よりも耐オフセット周波数特性補償能力の高い，遅延検波に基づくMAP(Maximum A-Posteriori)検出法を提案した．最後に計算機シミュレーションによって提案する同期誤差補償法の有効性を示した．時間タイミングの誤差の影響については十分な補償能力が確認できたが，周波数同期誤差補償技術は，BLEで許容されている最大許容オフセット周波数を完全に補償するには至っていなかったので，それについては第４章での課題とした．

第4章では，第3章では対応しきれなかったBLEの最大許容周波数オフセットに対応するため，繰り返し周波数オフセット推定法を提案した．周波数オフセットの推定法としてプリアンブルと独立成分分析出力の相関が最大になるように調整する手法があるが，BLEの規格にあるプリアンブルの長さでは十分な推定ができないため，一度推定した信号を等価的にプリアンブルの拡張信号と見なし，プリアンブルと一緒に繰り返し推定に使用することで，参照信号の長さを確保できる周波数オフセット補償技術を提案した．最後に計算機シミュレーションによって提案する繰り返し推定法の有効性を示した．

第5章では，独立成分分析出力の雑音を白色化し，信号成分の干渉は逐次干渉除去法を適用することで対処する技術を提案した．白色化は雑音共分散行列の逆行列のコレスキー分解で得られた上三角行列を独立成分分析出力に乗積することで，雑音を白色化した．またその結果得られる信号成分は，下位の成分には干渉がなく，上に行くにしたがって干渉成分が１つずつ増える構成となるので，逐次干渉波除去を適用することで信号を分離する方式を提案した．最後に計算機シミュレーションによって提案する雑音相関抑圧手法が有効に動作することを示した．

第6章は，本論文の結論であり，本研究で得られた結果の総括を行った．

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（ 瀧川　将弘 ）			
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	教授	三瓶　政一
	副 査	教授	鷲尾　隆
	副 査	教授	丸田　章博
	副 査	准教授	衣斐　信介（同志社大学理工学部電子工学科）
	副 査	教授	滝根　哲哉
	副 査	教授	馬場口　登
	副 査	教授	宮地　充子
	副 査	教授	井上　恭
	副 査	教授	駒谷　和範

論文審査の結果の要旨

本論文は、無線局免許不要な帯域を利用する BLE（Bluetooth Low Energy）を用いた屋内無線センシングシステムにおいて、標準規格を変えることなくスケーラブルにシステム容量を拡大させるため、独立成分分析を用いた空間多重技術を検討している。その際、空間多重されたユーザの信号同士は、信号間のタイミングや搬送周波数が非同期であること、特に搬送周波数の許容周波数オフセットは他の無線システムと比較して大きいという点に配慮する必要があるので、本論文では、これらの非同期条件を満足させるための技術開発も含めて空間多重信号を高精度に分離する技術について議論している。

第 1 章では、本論文が検討対象としている BLE システムの研究背景を説明し、BLE の標準規格に変更を加えることなく、空間多重を実現可能とすることの重要性を議論すると共に、本論文が検討する技術課題を説明することで、本論文の全体構成を明確化している。

第 2 章では、BLE システムにおいて独立成分分析を用いた空間多重信号分離を行うための統計信号処理を説明し、その原理と課題を明確化している。特に大きな課題として、空間多重された信号のシンボルタイミングの非同期性への対処、多重化された信号それぞれの搬送周波数の周波数オフセットの補償を考慮した空間多重信号分離が必要であること、さらに独立成分分析で多重化された信号を分離する際、分離された信号の雑音成分は有相関性を有するので，雑音成分を白色化しつつ信号の分離を行う技術の開発が必要であることを明確化している。

第 3 章では、シンボルタイミングの非同期性の影響抑制と周波数オフセットの補償法を提案している。独立成分分析で導出される行列処理は、信号に含まれるデータ系列には依存しないので、必ずしもフレーム信号全てを用いる必要はないことに着目し、全ての空間多重信号が存在する時間区間を検出し、その区間の信号を用いて処理行列を導出する手法を提案している。本技術については計算機シミュレーションにより、目的の性能が達成されることを明らかにしている。また周波数オフセットへの対処としては、遅延検波に加えて事後確率最大則に基づく復調技術を提案している。計算機シミュレーションにより、本技術は受信性能を向上させると共に，ある程度の周波数オフセットまでは対応できるものの、BLE の標準規格において許容されている最大許容周波数オフセットには対処しきれないことを明らかにし、その対策については引き続き第 4 章で議論することとしている。

第 4 章では、周波数オフセット補償能力をさらに拡大するため、一度復号された系列を周波数オフセット推定のための参照信号として利用し、この処理を繰り返す周波数オフセット補償方式を提案している。ここで独立成分分析を用いて空間多重信号を分離する際、分離された各信号には任意の位相誤差が加わるため、空間多重信号の分離後に位相誤差を補償する必要があるが、これは言い換えれば、周波数オフセットが存在しても空間多重信号の分離には影響

はないことを意味している。本章で提案されている技術はこの特徴を利用したものである。計算機シミュレーションによって、BLE の標準規格において設定されている許容周波数オフセットに対しても提案手法は十分対処できることを確認し、その有効性を明らかにしている。

第 5 章は、提案する空間多重信号分離方式の性能をさらに改善するため、独立成分分析出力における雑音の白色化を行うための逐次干渉波除去方式を提案している。具体的には、独立成分分析器出力に対して、雑音共分散行列のコレスキー分解で得られた上三角行列を独立成分分析器出力に乗積することで雑音の白色化を実現するとともに、信号判定の際に逐次干渉波除去方式を適用することで信頼性の高い信号分離を実現している。なお第 3 章から第 5 章で提案された手法は、BLE システムにおいてセントラルと呼ばれる基地局で、アンテナ数を増すことでシステム容量をスケーラブルに増大させることが可能であり、この点において拡張性が高い方式であると言える。

第 6 章は本論文の結論であり、本研究で得られた結果の総括を行っている。

以上で議論した技術は、標準規格を変更しないという拘束条件の下で、ユーザデバイスについては全く規格の変更を行わず、セントラルと呼ばれる BLE システムの基地局のアルゴリズムだけを変えることとでシステム容量の増大をスケーラブルに実現できるという点において、技術的能力が高いことに加えて、実用性も高いと言える。

以上のように、本論文は、無線アクセスシステムのシステム容量をスケーラブルに増大させることに関して数多くの有用な知見を与えており、情報通信工学の発展に寄与するところが多い。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。