

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 10 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560379

研究課題名（和文）

送信協調型ビーム形成法を用いたセンサネットワークシステムの提案

研究課題名（英文）

A New Sensor Network System with Collaborative Transmit Beam Forming

研究代表者

富里 繁 (TOMISATO SHIGERU)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：60362951

研究成果の概要（和文）：本研究では、センサネットワークにおいて、遠く離れたセンサ間の安定的な通信を実現するため、複数の送信センサが協調してビームを形成するセンサ協調型適応ビーム形成法を提案した。この提案ビーム形成法の性能評価結果から、適応送信手法を用いることにより消費電力低減効果が得られることを明らかにし、マルチパスに起因した符号間干渉と同一チャネル干渉が存在する環境で、オフセット周波数の高精度な推定ができることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Sensor collaborative beam forming in which plural transmit sensors collaborate to form a signal beam is proposed to realize highly reliable signal transmission in wireless sensor network systems. The evaluation results confirm that the proposed beam forming method can effectively decrease total power consumption and perform highly-accurate estimation of offset frequency under inter-symbol and co-channel interference conditions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：モバイル通信工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：センサネットワーク，ビーム形成，適応送信，周波数オフセット推定

## 1. 研究開始当初の背景

ユビキタスネットワーク社会を支える技術として、多数のセンサ間で情報のやりとりを行うセンサネットワーク技術が国内外で注目されている。この技術は、センシングした情報を収集するだけでなく、子供や高齢者の見守りシステムへの応用が期待されており、安心安全な社会を形成する上で、今

後、特に重要となる技術である。本研究では、センサネットワークにおいて、遠く離れたセンサ間の通信を実現するため、センサが協調して適応的にビームを形成するセンサ協調型適応ビーム形成法を研究する。

## 2. 研究の目的

ユビキタスネットワーク社会の実現

においては、センサネットワーク技術が重要な位置を占めるが、任意のセンサ間通信を可能とする信号伝送技術は未だ確立されていない。本研究では、遠く離れたセンサ間の通信を実現するため複数の送信センサが協調して適応的にビームを形成するセンサ協調型適応ビーム形成法について検討する。さらに、これをマルチホップ通信に拡張し、任意のセンサ間に通信リンクを形成させる技術の実現法を研究する。そこで、(1) 適応ビーム形成法、(2) センサ間同期方式の検討、(3) マルチホップ伝送時の性能評価、(4) 消費電力低減効果の評価、(5) 実システムへの応用の順で研究を進め、実システムへ応用可能な信号伝送技術を確立する。

### 3. 研究の方法

本研究では、小型で安価なセンサでも、複数のセンサが協調することによりビーム形成が可能な手法を検討し、このビーム形成に必要なセンサ間同期手法、マルチホップ伝送時の性能、及び消費電力低減効果の検討を行う。さらに、実システムへの応用についても検討する。

#### (1) 適応ビーム形成法

各センサに無指向性アンテナを備え、複数のセンサのアンテナをアレーアンテナの給電素子と見なしてビームを形成する手法を検討する。また、ビーム形成に用いるセンサの配置方法、及び伝送路の状態に応じて効率的にセンサを選択する手法についても検討する。

#### (2) センサ間同期方式の検討

基準となるセンサのタイミングに他のセンサが合わせる従属同期方式を基本とし、送信センサから参照キャリア信号やタイミング信号を送信し、その信号に同期して協調センサが信号を送信する手法について検討す

る。また、同期回路のジッタによる形成ビームの性能劣化について評価する。

#### (3) マルチホップ伝送時の性能評価

マルチホップを用いるセンサネットワークシステムの基本構成を検討する。また、(1)で検討したビーム形成法をマルチホップシステムに適用することを検討し、それに伴う再検討と性能評価を行う。

#### (4) 消費電力低減効果の評価

ビーム形成による受信品質改善効果に基づいて、各センサの消費電力低減効果について、送信位相誤差による形成ビームの性能劣化も含めて評価する。

#### (5) 実システムへの応用の検討

センサネットワークの応用システムとしては、子供や高齢者の見守りシステム、及び物品やペットなどの探索システムなどが期待される。ただし、実際のシステムでは、センサの性能や配置に制限を受ける場合が多い。また、ビーム形成によるネットワークにおける負荷増大についても評価する必要がある。そこで、これらのシステムにおける制約条件を明らかにし、本研究で検討した適応ビーム形成法の適用方法と有効性を検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) 適応ビーム形成法の検討

各センサに無指向性アンテナを備え、複数のセンサのアンテナをアレーアンテナの給電素子と見なして、送信センサが協調してビームを形成する適応ビーム形成法を検討し、計算機シミュレーションにより、受信品質改善効果と消費電力低減効果を評価した。

ビーム形成に用いる協調センサ数  $N_t$  に対する受信品質改善効果について、ビット誤り率 (Bit Error Rate: BER) による評価結果を図 1 に示す。ビーム形成に用いる協調センサ数

を3とすると、受信平均 BER における所要平均  $E_b/N_0$  特性が、ビームを形成しない場合 ( $N_t=0$ ) と比較して、11.2dB 改善することを明らかにした。

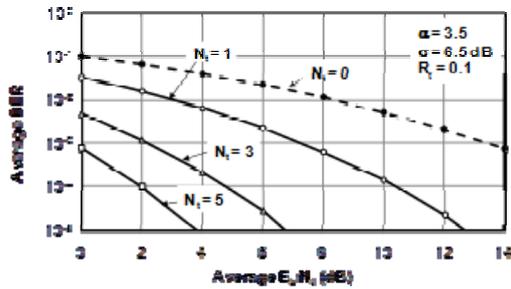


図1 協調センサ数  $N_t$  に対する BER 特性

消費電力低減効果については、ビーム形成に用いる送信センサ数を3とすると、消費電力を94%低減できることを明らかにした。また、送信センサ間の送信位相誤差が大きい場合、さらに受信センサ間でも協調することにより大幅な省電力効果が得られることが分かった。位相誤差に対する消費電力低減効果を図2に示す。図2から分かるように、受信センサ数  $N_r$  を3とすると、送信センサ間の送信位相誤差によらず、消費電力を80%以上低減できることを明らかにした。

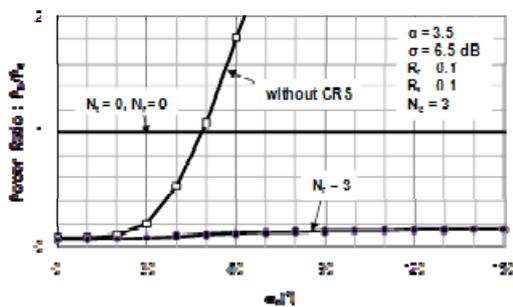


図2 送信位相誤差に対する消費電力低減効果

さらに、このビーム形成法をフェージング変動がある伝送路に用いた場合の受信特性について計算機シミュレーションで評価した。評価結果から、フェージング変動がある

場合においても、センサの移動が歩行速度程度であれば、本ビーム形成法が有効に動作することを示し、センサネットワークにおいて安定的な通信を実現できることを明らかにした。

## (2) 適応ビーム形成法における適応送信法

適応ビーム形成法について、送受信センサ間の伝搬路の状況に応じて協調送信センサを選択する適応送信法について検討し、計算機シミュレーションにより、消費電力低減効果を評価した。ビーム形成時の各送信センサの送信電力低減量に対する消費電力低減効果を図3に示す。図3より、協調センサ候補数を3とした場合、消費電力を最大46%低減できることが分かる。また、ビーム形成時の各センサの消費電力について、送信電力を14dB 以上低減すると再送回数が增大するため、ビーム形成を行わない場合より消費電力が増大することが分かった。この結果、協調センサ候補数が3の場合、CNR を8dB とすると消費電力低減において最適な各送信センサの送信電力比は、ビーム形成を行わない場合の送信電力に対して-6dB であることを明らかにした。

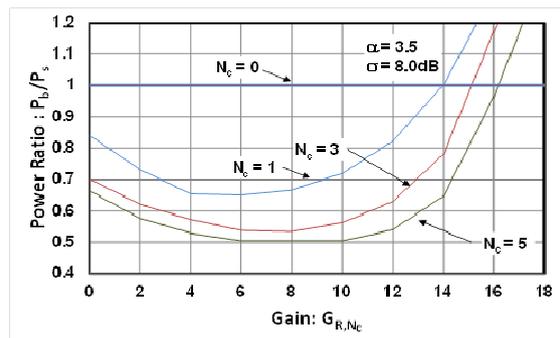


図3 送信電力低減量に対する消費電力低減効果

以上の結果から、センサ協調送信ビーム形成法において適応送信手法を用いることにより消費電力低減効果が得られることを明らかにした。

### (3) 送信センサ間高精度同期方式の検討

マルチパスに起因した符号間干渉と同一チャンネル干渉が存在する環境で、送信センサ間のオフセット周波数を高精度に推定することが可能になる手法を提案し、計算機シミュレーションにより推定精度を評価した。提案手法では、受信パイロット信号を用いて生成した相関行列を固有値分解し、求めた固有値の最大値に対応する固有ベクトルからオフセット周波数を推定する。また、推定精度改善手法として、遅延波合成法 (Delayed paths combining: DPC) とサンプルスペース拡大法 (Sample space expansion: SSE) を用いている。評価結果を図 4 に示す。図 4 より、DPC と SSE を用いた提案手法を用いることにより、CIR=0dB の同一チャンネル干渉があるマルチパスフェージング伝送路において、送信チップ周期で正規化した周波数オフセット  $\Delta fT$  が  $1.28 \times 10^0$  の場合でも、 $E_b/N_0$  を 10dB とすると推定誤差を  $1.0 \times 10^{-2}$  以下に抑えることが可能であることを明らかにした。

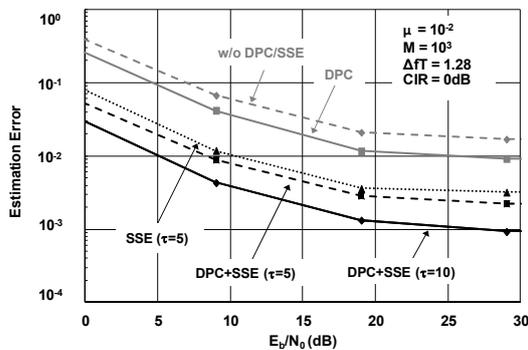


図 4  $E_b/N_0$  に対する推定精度

以上の検討結果から、センサ協調型適応ビーム形成法を用いることにより、受信特性改善効果による大幅な消費電力低減効果が得られることを明らかにした。また、実システムへの応用を考慮し、実際のシステムで発生する送信センサ間の送信位相誤差について、

送信位相誤差がある場合でも同様の消費電力低減効果が得られるビーム形成手法を確立した。さらに、実用上問題となる送受信センサ間の周波数オフセットに対する高精度推定手法を確立した。

センサネットワークにおける協調ビーム形成については、従来、消費電力低減効果も含めた評価は世界的に十分行われていなかったが、本研究の成果により高信頼なセンサネットワークシステムの実用化に貢献できると考える。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

①松本 祐也, 田野 哲, 富里 繁, 秦 正治, センサネットワークシステムのための同一チャンネル干渉下での周波数オフセット推定法, 電子情報通信学会論文誌B, 査読有, vol.J96-B, no.2, 2013, pp.171-179.

②中野 淳次郎, 駒田 善紀, 富里 繁, 田野 哲, 秦 正治, 簡易な信号処理を用いるセンサ協調型ビーム形成法の検討, 電子情報通信学会論文誌B, 査読有, vol.J94-B, no.2, 2011, pp.137-146.

[学会発表] (計 10 件)

①長谷部 雅孝, 田野 哲, 富里 繁, 秦 正治, SVDを用いた周波数オフセット推定法における特性改善法, 電子情報通信学会短距離無線通信研究会, 2012年12月10日, 富士通川崎工場.

②別府 多久哉, 富里 繁, 田野 哲, 秦 正治, センサネットワーク用協調ビーム形成法における適応送信手法の検討, 平成 24 年度年電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2012年10月20日, 島根大学.

③平井 大暁, 富里 繁, 田野 哲, 秦 正治, センサネットワーク用送信センサ選択型協調ビーム形成法の一検討, 電子情報通信学会

短距離無線通信研究会，2012年8月20日，  
芝浦工業大学（東京）。

④長谷部 雅孝，田野 哲，富里 繁，秦 正治，同一チャンネル干渉下におけるセンサネットワーク用周波数オフセット推定法の検討，電子情報通信学会短距離無線通信研究会，2012年8月20日，芝浦工業大学（東京）。

⑤松本 祐也，田野 哲，富里 繁，秦 正治，同一チャンネル干渉下での周波数オフセット推定法の検討，電子情報通信学会無線通信システム研究会，2012年1月27日，福岡大学。

⑥松本 祐也，富里 繁，田野 哲，秦 正治，センサネットワークシステムにおける高精度な周波数オフセット推定手法の検討，The 13th IEEE Hiroshima Student Symposium，2011年11月12日，広島大学。

⑦平井 大暁，富里 繁，秦 正治，モバイルアドホック通信用送信端末選択型協調ビーム形成法の検討，平成23年度年電気・情報関連学会中国支部連合大会，2011年10月22日，広島工業大学。

⑧中野 淳次郎，駒田 善紀，富里 繁，田野 哲，秦 正治，送受信センサ協調ビーム形成法におけるフェージング変動の影響，The 12th IEEE Hiroshima Student Symposium，2010年11月6日，島根大学。

⑨駒田 善紀，中野 淳次郎，富里 繁，田野 哲，秦 正治，センサ協調ビーム形成法における協調受信センサ数による消費電力低減効果，The 12th IEEE Hiroshima Student Symposium，2010年11月6日，島根大学。

⑩駒田 善紀，富里 繁，秦 正治，センサネ

ットワーク用送受信協調ビーム形成法の省電力効果，平成22年度年電気・情報関連学会中国支部連合大会，2010年10月23日，岡山県立大学。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

富里 繁 (TOMISATO SHIGERU)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授  
研究者番号：60362951

### (2) 研究分担者

田野 哲 (DENNO SATOSHI)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号：80378835