

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420370

研究課題名(和文) 協調ビーム形成法を用いたカバレッジ100%のセンサネットワークシステム構成法

研究課題名(英文) Sensor network systems with 100%-coverage by using sensor collaborative beam forming

研究代表者

富里 繁 (Tomisato, Shigeru)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：60362951

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、センサ間で協調してビームを形成する協調ビーム形成法において、適応的に送信する適応送信手法と周波数オフセットを推定する手法を検討した。さらに適応送信手法による消費電力低減効果を計算機シミュレーションにより評価した。

まず、受信品質に応じて協調する送信センサの選択とビーム形成を行う適応送信型センサ協調ビーム形成法を提案した。次に5個の協調センサを用いると最大60%の消費電力低減効果があることを明らかにした。また、同一周波数を用いるセンサからの干渉がある条件で、実用的な精度で周波数オフセットを推定可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This research studies adaptive transmission and frequency offset estimation for sensor collaborative beam forming. In addition, power consumption reduction effect with the beam forming is evaluated by computer simulation.

A sensor collaborative beam forming method with adaptive transmission is proposed in which collaborative sensor selection and beam forming are performed according to obtained reception quality in a receiving sensor. The simulation result with the proposed method shows that total power consumption of the beam forming with 5 collaborative sensors can be reduced by 60%. The result also shows that offset frequency among transmitting and collaborative sensors can be estimated at practical accuracy even under co-channel interference.

研究分野：センサネットワーク

キーワード：センサ協調 ビーム形成 周波数オフセット 消費電力

1. 研究開始当初の背景

ユビキタスネットワークを実現する技術として、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、子供や高齢者の見守りシステムへの応用が可能のため、安心安全な社会を形成する上で、特に重要な技術である。

このようなユビキタスセンサネットワークの実現上の課題の一つにカバレッジの向上がある。センサネットワークでは、各センサは建築物や人などに設置されるため、それらのアンテナ高は周囲の建物と比較すると同等またはそれ以下となる。このため、道路沿いのエリアでは十分な受信レベルが得られるが、建物の影など見通しがいい場所では受信レベルが著しく低下する。この結果、あるエリアのカバレッジを100%とするためには大量のセンサが必要となる。また、センサには送信電力に制限があるため通信距離には限界がある。この課題を解決するための技術として、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安定的に実現できる協調ビーム形成法を研究してきた。

2. 研究の目的

本研究では、協調ビーム形成法の利用を前提とし、実際のシステムへの適用を考慮して、伝送品質に応じて適応的にビームを形成する適応送信手法について検討する。

また、センサネットワークでは、システム構成の単純化のため、各センサが同一の送信周波数を使用するケースが多く、センサ間で干渉が発生する。このため、厳しい同一チャネル干渉下でも大きな周波数オフセットを高精度に推定可能なアルゴリズムを検討する。

さらに、本研究では、このような協調ビーム形成法を用いるセンサネットワークの実現において重要な消費電力低減効果について検討する。

3. 研究の方法

本研究では、センサ協調による協調ビーム形成法を採用し、実システムへの適用に必要な技術を検討する。まず、協調ビーム形成法のための適応送信技術と周波数オフセット推定法を検討する。次に適応送信技術の消費電力低減効果について、送信センサ数、及び送信周波数におけるオフセット周波数をパラメータとして評価する。

4. 研究成果

(1) 適応送信型センサ協調ビーム形成法

センサネットワークにおいて安定的な通信を実現するため、受信状況に応じて協調送信センサの選択とビーム形成を適応的に行う適応送信型センサ協調ビーム形成法を提

案した。この手法では、情報信号の所要受信品質を満たせず再送をする場合にビーム形成を行っている。

図1に本研究で提案する適応送信型センサ協調ビーム形成法を示す。このビーム形成法で用いる各センサは無指向性アンテナを備え、情報送信センサ及び情報受信センサ間で情報信号を伝送しているものとする。

図1(a)に1回目の情報信号の送信方法を示す。送信1回目ではビーム形成を行わず情報送信センサ(Transmitting Sensor: TS)から情報受信センサ(Receiving Sensor: RS)へ情報信号を送信する。

次に、情報信号を受信した情報受信センサ(RS)で受信品質を判定する。このとき情報送信センサ(TS)周囲の協調送信センサ候補(Candidates of Collaborative Transmitting Sensor: C-CTS)においても送信された情報信号の受信が可能であるため、これらのセンサにおいても受信品質を判定しておく。ここで、協調送信センサ候補は、情報送受信センサ間の距離で正規化された半径 R の円内に存在しているとする。情報受信センサ(RS)において所要受信品質を満たしている場合、情報送信センサ(TS)に受信確認信号が送られる。情報送信センサ(TS)は情報確認信号を受信した場合、それ以上同じ情報信号を送信せず、この通信については完了となる。一方、受信確認信号が一定時間内に受信されない場合、情報送信センサ(TS)は同じ情報信号を再送する準備を行う。

図1(b)に再送を行う場合のビーム形成法を示す。再送を行う場合、協調送信センサ候補(C-CTS)において所要受信品質が得られたもののみを協調送信センサ(Collaborative Transmitting Sensor: CTS)として選択し、これらの協調送信センサ(CTS)と情報送信センサ(TS)で協調してビームを形成する。

ここでは情報受信センサ(RS)からのパイロット信号に基づき、情報送信センサ(TS)と協調送信センサ(CTS)の信号が情報受信センサ(RS)で同相合成されるように、各送信センサの送信位相を設定することによりビームを形成する。

パイロット信号については、情報信号送信に先立ち情報受信センサ側から送信センサ側へ情報信号の送信と同じ周波数を用いて送信することとし、このパイロット信号の各送信センサにおける受信位相を反転させて各送信位相を設定すれば情報受信センサで同相合成が実現する。

このビーム形成により情報受信センサ(RS)において所要受信品質を満たせば通信を終了する。また、所要受信品質を満たせない場合、さらに同じ再送処理を一定回数だけ繰り返す。

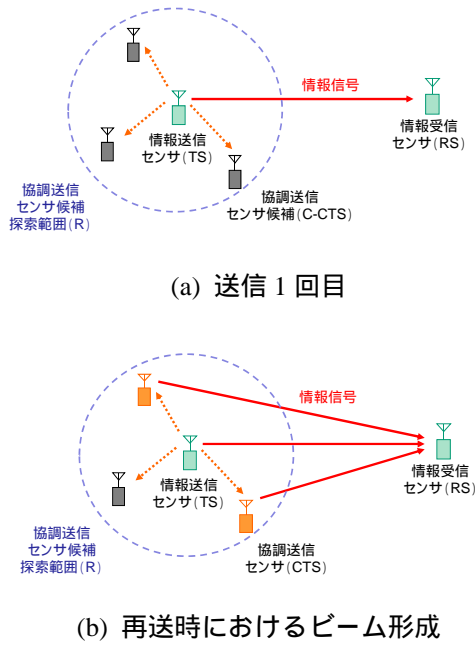


図1 適応送信型センサ協調ビーム形成法

(2) 消費電力低減効果

この手法では、送信センサにおいて消費電力低減効果が得られる。ここでは、適応送信手法による消費電力低減効果と、送受信センサ間で位相誤差がある場合の消費電力低減効果への影響を明らかにしている。図2に示す評価結果から、適応送信型センサ協調ビーム形成法を用いることにより、ビーム形成を行わない場合と比べて、最大60%の消費電力低減効果があることが分かる。また、位相誤差 σ_e が 20° の場合においてもビーム形成を行わない場合と比べて、43%の消費電力低減効果が得られることを明らかにした。

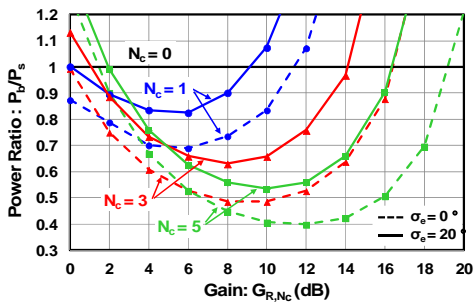


図2 適応送信手法による消費電力低減効果 (位相誤差無し及び $\sigma_e = 20^\circ$)

さらに、送受信センサ間で周波数オフセットがある場合の消費電力低減効果への影響を計算機シミュレーションにより明らかにした。図3に示す評価結果から、5つの協調センサを用いた適応送信型センサ協調ビーム形成法により、シンボル周期 T_s で正規化したオフセット周波数 $\Delta f T_s$ が 1.0×10^{-3} の場合においてもビーム形成を行わない場合と比べて、50%以上の消費電力低減効果が得られることが分かる。

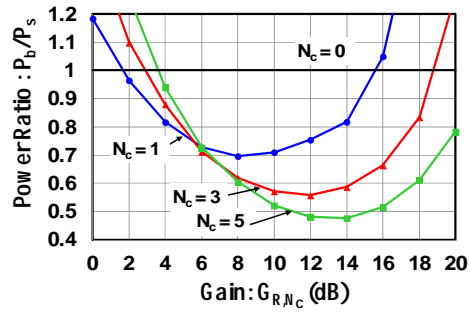


図3 周波数オフセットがある場合の消費電力低減効果 (周波数オフセット $\Delta f T_s = 1 \times 10^{-3}$)

(3) 周波数オフセット推定手法

周波数オフセット推定法を提案し、オフセット周波数に対する推定誤差を評価した。パス数を2とした場合の評価結果を図4に示す。周波数オフセット推定の最大繰り返し回数を10とし、ステップサイズを 1.0×10^{-1} とした。周波数推定フィルタの繰り返し演算回数を100とし、送信パケット数は10とし、CIRは0dBとした。図4より、提案手法では平均 E_b/N_0 の値によらず、 $\Delta f T = 8.0 \times 10^{-1}$ まで推定可能であることが分かる。

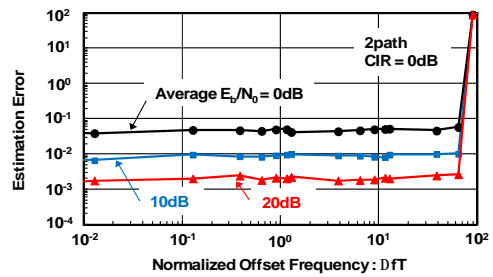


図4 オフセット周波数に対する推定誤差

パス数に対する推定誤差の評価結果を図5に示す。図5より、オフセット周波数 $\Delta f T = 12.8$ の場合、パス数が増えることで、符号間干渉の影響が大きくなるため推定精度が劣化するが、5パスの場合においても平均 $E_b/N_0 = 15\text{dB}$ 以上で、推定誤差 1.0×10^{-2} を達成できることが分かる。

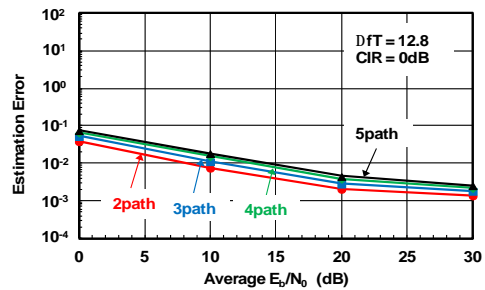


図5 パス数に対する推定誤差

CIR に対する推定誤差を評価した。パス数を 2 とした場合の評価結果を図 6 に示す。図 6 より、CIR が小さくなると、推定誤差が劣化していることが分かる。平均 E_b/N_0 が 30dB の時、CIR = 0dB の場合は推定誤差が 1.3×10^{-3} となることが分かる。

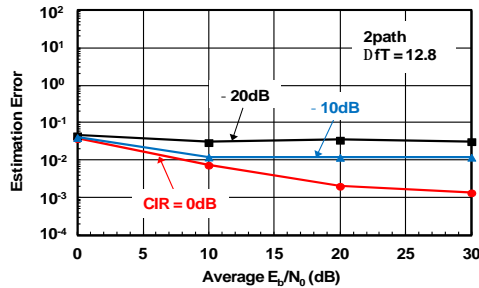


図 6 CIR に対する推定誤差

(4) マルチホップ伝送時の消費電力

ここでは、マルチホップ伝送に適応送信型センサ協調ビーム形成法を適用する場合の消費電力低減効果を計算機シミュレーションにより評価する。評価においては、情報送信センサの送信電力に対する再送率を求め、求めた再送率を用いて情報送信センサ、協調送信センサ及び情報受信センサの送信電力と受信電力を算出する。また、制御信号の送受信時の消費電力も算出する。これらの結果から、センサネットワーク全体の消費電力低減効果を明らかにする。

各センサの信号送受信タイミングを図 7 に示す。情報送信センサ (TS) と協調送信センサ (CTS) は、情報受信センサ (RS) からのパイロット及び ACK/NACK 信号受信後に情報信号を送信する。このビーム形成により情報受信センサ (RS) において所要受信品質を満たせば通信を終了する。また、所要受信品質を満たせなかった場合、さらに同じ再送処理を繰り返す。

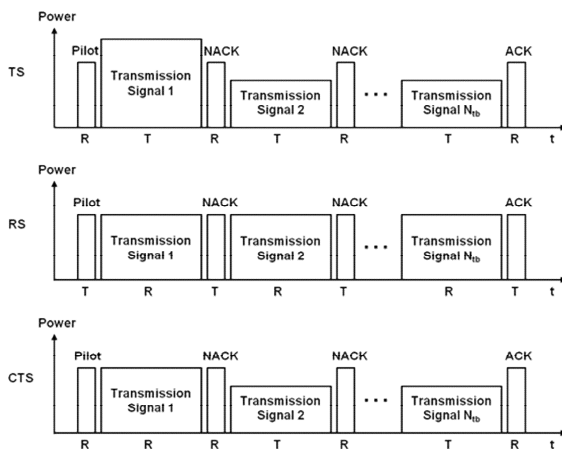


図 7 送受信タイミング

適応送信型センサ協調ビーム形成法を適用した場合の消費電力低減効果を計算機シミュレーションにより評価した。送信電力と受信電力の比を 1 : 1 とした場合の消費電力低減効果を図 8 に示す。平均 CNR を 5dB とした場合、協調センサ数 N_c が 1 の場合、協調ビーム形成時の送信電力を 2dB 下げることにより 43% の消費電力低減効果が得られることが分かる。また N_c を 3 及び 5 とした場合、それぞれ最大で 18% 及び 3% の消費電力低減効果が得られる。

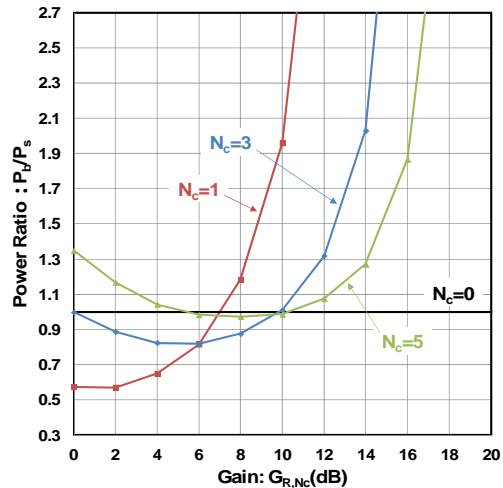


図 8 消費電力低減効果
(送信 : 受信 = 1 : 1, 平均 CNR = 5 dB)

次に送信電力と受信電力の比を 10 : 1 とした場合の消費電力低減効果を図 9 に示す。図 9 より、平均 CNR を 5dB とした場合 N_c が 1, 3 及び 5 の場合、それぞれ最大で 32%, 45% 及び 50% の消費電力低減効果が得られる。図 8 と比較して、受信電力の比率が小さい場合、消費電力低減効果が大きくなることが分かる。

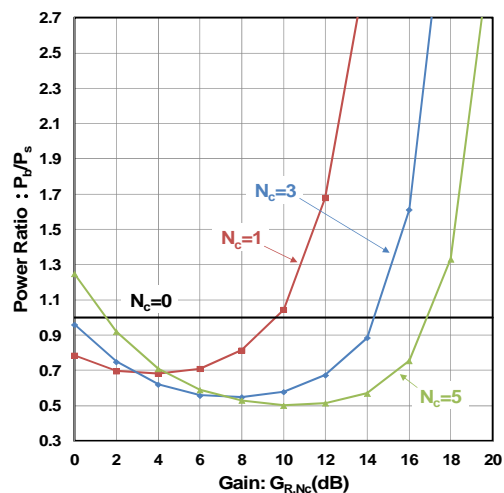


図 9 消費電力低減効果
(送信 : 受信 = 10 : 1, 平均 CNR = 5 dB)

(5) まとめ

以上より，適応送信型センサ協調ビーム形成法の有効性を実用的な評価条件において明らかにした．また，システム応用時に必要となる周波数オフセットを高精度に検出できる手法を提案した．本研究の協調ビーム形成法は受信品質を大幅に改善できるため，センサネットワークにおけるカバレッジの飛躍的な向上に貢献できると考える．また，センサの消費電力を効果的に低減できるため，センサの小型化や長寿命化などに貢献でき，実用的なシステムを構成する上で重要な成果が得られたと考えられる．

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

藤田将大, 別府多久哉, 富里繁, 田野哲, 秦正治, “センサネットワーク用適応送信型センサ協調ビーム形成法,” 信学論(B), vol.J98-B, no.10, pp.1146-1154, 2015年10月.(査読有)

田野哲, 長谷部雅孝, 富里繁, 秦正治, “センサネットワークシステムのための特異値分解を用いた繰返し周波数オフセット推定”, 電子情報通信学会論文誌B, vol.J97-B, no.12, pp.1199-1212, 2014年12月.(査読有)

[学会発表](計9件)

Satoshi Denno, Masataka Hasebe, Shigeru Tomisato, and Masaharu Hata, “Iterative SVD-based frequency offset estimation with decorrelation for wireless sensor networks”, Proc. of the 17th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC 2014, PHY-2, pp.1-6, Sept. 2014. (査読有)

藤田将大, 小椋あかね, 富里繁, 秦正治, 田野哲, “適応送信型センサ協調ビーム形成法における周波数オフセットの影響,” 信学技報, SRW2014-20, 2014年8月.(査読無)

藤田将大, 富里繁, 田野哲, 秦正治, “適

応送信型センサ協調ビーム形成法の受信特性,” 信学技報, RCS2014-103, 2014年7月.(査読無)

田野哲, 長谷部雅孝, 富里繁, 秦正治, “センサネットワークシステムのための特異値分解を用いた繰返し周波数オフセット推定”, 電子情報通信学会短距離無線通信研究会, 信学技報, vol.114, no.84, SRW2014-12, pp.65-70, 2014年6月.(査読無)

藤田将大, 別府多久哉, 富里繁, 田野哲, 秦正治, “適応送信型センサ協調ビーム形成法における送信位相誤差の影響評価,” 2014年電子情報通信学会総合大会, no.B-19-26, 2014年3月.(査読無)

藤田将大, 別府多久哉, 富里繁, 田野哲, 秦正治, “適応送信型センサ協調ビーム形成法の消費電力低減効果,” The 15th IEEE Hiroshima Student Symposium, 講演論文集, no.C-12, pp.1-4, 2013年11月.(査読有)

M. Hasebe, S. Denno, S. Tomisato, and M. Hata, “Iterative frequency offset estimation based on singular value decomposition,” 2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, ISPACS 2013, pp.125-130, Nov. 2013. (査読有)

M. Hasebe, S. Denno, S. Tomisato, and M. Hata, “SVD-based frequency offset estimation in the presence of co-channel interference for DS-SS sensor networks,” 2013 International Conference on Sensor Network and Mobile Computing, ICSNMC 2013, pp.24.1-24.5, Sept. 2013. (査読有)

別府多久哉, 藤田将大, 富里繁, 田野哲, 秦正治, “センサ協調ビーム形成法における適応送信手法による受信特性改善効果,” 信学技報, SRW 2013-26, Aug. 2013. (査読無)

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