

電波電力伝送における RSSI フィードバックを用いた 位相最適化手法の実装と評価

林 健太郎¹ 濱政 光¹ 川崎 慈英¹ 木崎 一廣¹ 田中 勇気² 藤橋 卓也¹ 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

概要：

電波を用いた無線電力伝送は、センサノードに対して天候や時間帯によらない安定した電力供給を行うことが可能である。筆者らは、分散配置した複数の送信アンテナを電波電力伝送に用いるとともに、適切に位相制御を行うことによって、高効率な給電を実現する分散協調電波電力伝送システムに関する検討を行っている。各アンテナに対する位相制御量を決定するために、センサノードがフィードバックする Received Signal Strength Indication (RSSI) にしたがって位相の最適化を行う複数のアルゴリズムがこれまで提案されている。一方その効果については、理想的な電波伝搬環境における議論しかされていない。本稿では、分散協調電波電力伝送システムおよび RSSI フィードバックを元にした各位相最適化アルゴリズムを実機実装することで、実環境における各アルゴリズムの最適化性能を実験評価した。実験評価から、センサノードにおける RSSI フィードバックの分解能、および制御可能な位相の解像度が、各アルゴリズムの給電効率に影響を及ぼすことが分かった。

1. はじめに

Internet of Things (IoT) を実現する重要な一要素技術として、無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Networks) がある。WSN とは、音・光・温度・圧力などの物理量を測定するセンサノードを空間内に散在させ、無線で相互接続することで、実空間に関する様々な情報を収集するためのネットワークである [1] [2]。これまで得られなかった様々な情報の収集が可能になることによって、水質管理 [3] や、防災 [4]、生息地の監視 [5] に挙げられる多様な分野への応用が期待されている。

多くの応用分野において、WSN を展開しようとする際、センサノードの電源に関する問題が大きな制約となる。従来のセンサノードは電池による駆動が一般的とされているが、メンテナンスコストや環境に与える負荷が指摘されている [6]。この解決策として、周囲の環境エネルギーを用いた WSN の自律駆動を目指す研究が行われている [7] [8]。しかしながら、得られる電力が天候や時間帯、場所に左右される点が問題となる。例えば太陽光から電力を得る方式では、夜間や雨天時は発電ができない。常にセンシングを行うためには充電式のバッテリーを装備する必要があるが、センサノードの製造コストの増加やサイズの肥大化につな

がる。

電波を用いた無線電力伝送は、WSN が抱える電源の問題を抜本的に解決できる手法として注目されている。電波電力伝送は、送信アンテナが放射した電波を、受信側がレクテナ (Rectenna: Rectifying Antenna) を用いて直流電流に変換することで、無線での電力供給を実現する技術である [9]。時間や環境にかかわらず安定した電力供給が可能である点と、データの通信を同時に行うことができる [10] 点から、WSN に適した給電方式であるといえる。

一方で電波電力伝送においては、電波の距離減衰に起因する電力伝送範囲の制限が課題となる。図 1 に、単一の送信アンテナを用いたときの空間内の電力供給量を示す。受電電力の強度は、フリスの伝達公式にしたがって距離の 2 乗に反比例する。したがって図 1 に示すように、1 台の送信アンテナでは限られた範囲に配置されたセンサノードにしか十分な電力を供給できない。出力を大きくすれば十分な電力を供給できる範囲を広げることができるが、アンテナの物理的な限界や安全上の理由から出力は制限される。さらに、送信アンテナが放射できる電力は電波法で定められている。例えば、2.4GHz 帯の無変調波を利用するとき、10mW 以上の出力で電波を放射することはできない [11]。

電力伝送範囲の制限を解決するために、多数の送信アンテナを空間内に分散して配置するとともに、各アンテナの協調動作によって高効率な給電を実現する分散協調電波

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

² パナソニック株式会社

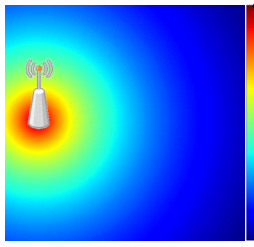


図 1: 単一の送信アンテナを用いた電波電力伝送

電力伝送システムが提案されている [12]. 分散協調電波電力伝送システムでは、各送信アンテナに対する位相制御によって干渉のパターンを変化させる。このとき、給電対象となるセンサノードの位置に建設的干渉を作り出すことで、高効率な電力伝送を行うことができる。

各送信アンテナに対する最適な位相制御量を決定するためには、各送信アンテナとセンサノード間の位相差が必要である。位相差を計測する際には、送信側が既知の信号を送信して、受信側で既知の信号と比較するという方法をとることが一般的であるが、正確な推定には複雑な信号処理が要求される。したがって、センサノードにおける演算能力や消費電力の制約が問題となる。

そこで、センサノードで容易に測定が可能な Received Signal Strength Indication (RSSI) を用いて位相差を間接的に得るとともに、取得した位相差を元にして位相最適化を実現するアルゴリズムが [12–15] などで提案されている。位相差に基づく位相最適化アルゴリズムが給電効率を改善することはシミュレーション評価を通して示されている。しかしながら、実環境において生じる雑音などが各アルゴリズムに与える影響については、十分な議論がなされていない。

実環境において生じる様々な影響の観点から、本研究では実環境における各位相最適化アルゴリズムの性能を実機実験を通して評価した。まず、分散協調電波電力伝送の実験システムを構築した。構築したシステムは、送信系と受信系から構成される。送信系では、複数の送信アンテナが放射する電波について個別に位相制御を行う。受信系では、受け取った電波について RSSI を測定し、送信系に対してフィードバックする。受け取ったフィードバックの値をもとに位相最適化アルゴリズムを適用して、最適な位相制御量を決定する。位相最適化アルゴリズムとしては Greedy 法 [12], 山登り法 [15], 中点山登り法 [13] [15], Lee らの手法 [14] を実機実装し、各アルゴリズムの最適化性能を評価した。さらに、送受信端末の性能が各位相最適化アルゴリズムに与える影響についても評価した。実験の結果から、中点山登り法の最適化性能が優れていることがわかった。また、センサノードにおける RSSI の分解能や測定誤差、送信端末における制御可能な位相解像度が、各位相最適化アルゴリズムの給電効率に影響をもたらすことを明ら

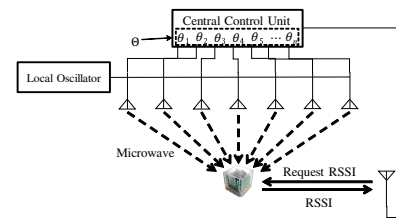


図 2: 分散協調電波電力伝送システム

かにした。

以降の構成は次のとおりである。第 2 節においては分散協調電波電力伝送システムについて説明する。第 3 節においては分散協調電波電力伝送システムにおける位相最適化アルゴリズムについて述べる。第 4 節においては本研究で開発した電波電力伝送の実験システムについて説明する。第 5 節においては実験評価から得られた結果について述べる。第 6 節では関連研究について述べる。最後に第 7 章においてまとめとする。

2. 分散協調電波電力伝送システム

2.1 システムモデル

図 2 に、本稿で想定する分散協調電波電力伝送システムのモデルを示す。空間内には n 台の送信アンテナが存在している。各送信アンテナは中央制御装置に接続され、共通の局部発振器を用いて同じ周波数の電波を放射する。中央制御装置は位相制御器を用いて各送信アンテナが放射する電波の位相を個別に制御する。各送信アンテナに対する位相の組み合わせを位相セット $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ と呼ぶ。センサノードは受信した信号の強度を表す RSSI の値を中央制御装置にフィードバックする。中央制御装置はセンサノードから受信した RSSI フィードバックの値をもとに位相最適化アルゴリズムを適用し、電力伝送に用いる位相セットを決定する。

2.2 RSSI フィードバックを用いた位相最適化

分散協調電波電力伝送システムにおける位相最適化は、位相セットを更新した電波の放射と、センサノードによる RSSI のフィードバックを繰り返すことによって実現する。センサノードに対して最大の電力を供給できる位相セット、すなわち RSSI フィードバックの値を最大とする位相セットを、最適位相セット Θ_{opt} とする。

最適位相セット Θ_{opt} を見つける最も単純な方法として、すべての位相の組み合わせを探索する方法が考えられる。しかしながら、位相階調を P としたとき、全探索から最適位相セット Θ_{opt} を決定するためには $O(P^n)$ の計算量が要求される。すなわち、送信アンテナの台数にしたがって爆発的に増加する。位相最適化を行っている間は効率的な給電ができないため、要求される計算量はセンサノードへの供給電力に大きな影響を与える。

計算量爆発の問題に対して、文献 [12] では各送信アンテナに対する位相制御量を逐次的に決定することによって計算量を削減する方法が提案されている。本稿ではこの方法を漸進探索と呼ぶ。漸進探索では、まず、すべての送信アンテナが電波の放射を停止したあと、送信アンテナ 1 だけが位相 $\hat{\theta}_1$ のもとで電波を放射する。一般性を失うことなく、 $\hat{\theta}_1 = 0$ とする。次に、送信アンテナ 2 に対する最適位相 $\hat{\theta}_2$ を決定する。具体的には、送信アンテナ 2 が放射する電波の位相を変化させつつ、センサノードから RSSI フィードバックを受信する。このとき、センサノードに最も大きな電力を供給できる位相、すなわち最も大きな RSSI フィードバックを受信できる位相を、送信アンテナ 2 の最適位相 $\hat{\theta}_2$ とする。最適位相 $\hat{\theta}_2$ が決定したら、送信アンテナ 2 は位相 $\hat{\theta}_2$ のもとで電波を放射し続ける。同様の手順を、送信アンテナ n に対する最適位相 $\hat{\theta}_n$ が決定するまで繰り返すことで、最適位相セットを求めることができる。すなわち、最適位相セット $\Theta_{\text{opt}} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_n)$ を求める問題を、各 $\hat{\theta}_i$ を $i = 2$ から n まで $n - 1$ 回求める問題に変換することができる。

次に、送信アンテナ i に対する最適位相 $\hat{\theta}_i$ を決定する方法について述べる。センサノードの受信電力は、送信アンテナ i の位相 θ_i を変数とする凸関数となる。したがって、 θ_i に関する凸最適化問題を解くアルゴリズムを適用することで $\hat{\theta}_i$ を決定できる。本稿では $\hat{\theta}_i$ を決定するアルゴリズムとして、Greedy 法 [12]、山登り法、中点山登り法 [13] [15]、Lee らの手法 [14] について検討する。

3. 位相最適化アルゴリズム

3.1 Greedy 法

Greedy 法では、送信アンテナ i について P 段階の位相を全探索する。探索対象となる P 段階の各位相の間隔は $2\pi/P$ となる。中央制御装置は各位相に対して RSSI フィードバックを受信する。 P 回の RSSI フィードバックのうち、最大の RSSI フィードバックを受信したときの位相を最適位相 $\hat{\theta}_i$ として採用する。Greedy 法で n 台の送信アンテナに対する最適位相セットを決定するために要求される計算量は $\mathcal{O}(nP)$ と表される。

3.2 山登り法

山登り法では、送信アンテナ i について P 段階の位相を逐次探索して、RSSI フィードバックが極大値に達した時点で探索を終了することで計算量を削減する。より具体的には、初期値となる位相から、位相階調 P の中で 1 段階ずつ位相回転する。中央制御装置は各位相に対して RSSI フィードバックを受信する。このとき、RSSI フィードバックが増加から減少に転じた時点で探索を終了する。山登り法で n 台の送信アンテナに対する最適位相セットを決定するために要求される計算量は $\mathcal{O}(nP)$ と表される。ただし、

最悪の場合でも Greedy 法の半分の計算量で最適位相セットを決定できる。

3.3 中点山登り法

中点山登り法は、最適位相が含まれない領域を探索区間から除外することを繰り返しながら探索を行うアルゴリズムである。より具体的には、2つの位相 ϕ_1 と ϕ_2 に対応する RSSI フィードバック $Q_i(\phi_1)$ と $Q_i(\phi_2)$ の大きさを繰り返し比較しながら、探索区間を半分に分割し続ける。 $Q_i(\phi)$ は、送信アンテナ i の位相を ϕ に設定したときの RSSI フィードバックの値である。

図 3 に、中点山登り法によって位相最適化が進む様子を示す。 $A^{(k)}$ は k 回目のステップにおける探索区間である。初期探索区間 $A^{(1)}$ は $[0, 2\pi)$ とし、 ϕ_1 と ϕ_2 の初期値はそれぞれ $\phi_1 = \pi/2$ 、 $\phi_2 = 3\pi/2$ とする。 $Q_i(\phi_1)$ と $Q_i(\phi_2)$ の大きさを比較し、結果に応じて $A^{(k+1)}$ を次式にしたがって更新する。

$$A^{(k+1)} = \begin{cases} A^{(k)} \setminus \{|\phi - \phi_1| < |\phi - \phi_2|\} & \text{if } Q_i(\phi_1) \leq Q_i(\phi_2) \\ A^{(k)} \setminus \{|\phi - \phi_1| > |\phi - \phi_2|\} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

最後に ϕ_1 を $A^{(k+1)}$ の下限、 ϕ_2 を $A^{(k+1)}$ の上限とする。以上の操作を繰り返すことで、探索区間は最適位相の存在する方向に向かって半分ずつ分割される。 ϕ_1 と ϕ_2 が位相階調 P の中で隣り合った段階、すなわち両者の間隔が $2\pi/P$ となった時点で探索を終了する。

図 3 に示すように、初回の分割を除いて ϕ_1 と ϕ_2 のうち、一方は分割によって変化しない。したがって、1 度の RSSI フィードバックの受信と比較演算によって探索区間を半分に分割できる。このとき、 n 台の送信アンテナに対する最適位相セットの決定に要求される計算量は $\mathcal{O}(n \log_2 P)$ と表される。

3.4 Lee らの手法

Lee らが提案した位相最適化手法は、中点山登り法をより一般化したアルゴリズムである。より具体的には、中点山登り法は探索区間を半分に削減するアルゴリズムであるのに対して、Lee らの手法は探索区間を $1/m$ とする。

図 4 に、Lee らの手法において $m = 4$ としたときに位相最適化が進む様子を示す。はじめに、現在の探索区間を m 分割する。続いて、分割された各区間の中点を送信アンテナ i の位相に設定したときの RSSI フィードバックを取得する。このとき、最も大きな RSSI フィードバックを得た位相が属する区間を、次のステップにおける探索区間とする。 ϕ_1 と ϕ_m が位相階調 P の中で隣り合った段階、すなわち両者の間隔が $2\pi/P$ となった時点で探索を終了する。

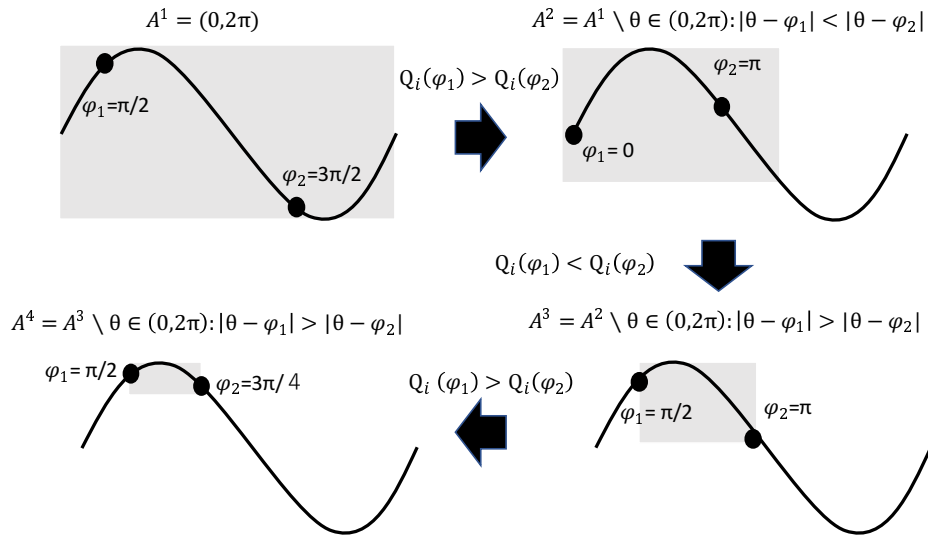


図 3: 中点山登り法

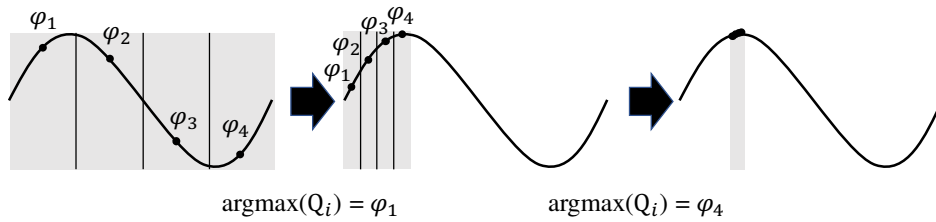


図 4: Lee らの手法 ($m = 4$)

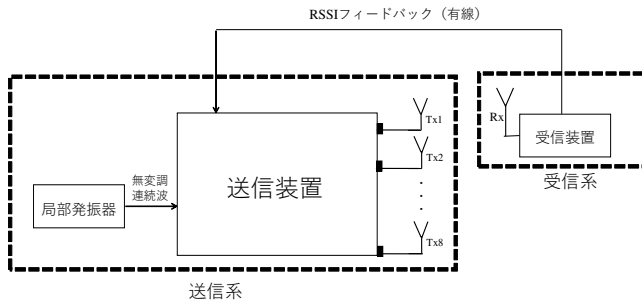


図 5: 実験の概要

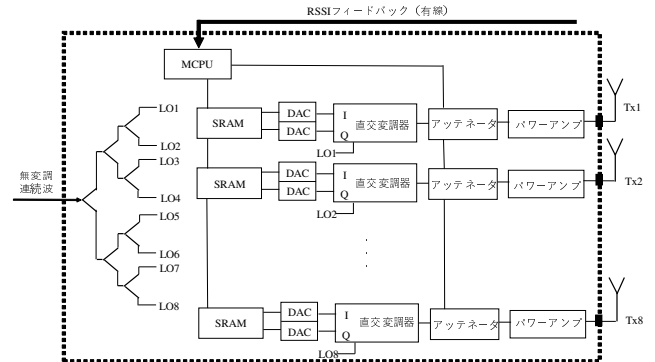


図 6: 送信装置の詳細

4. 実験システム

実環境における各位相最適化アルゴリズムの性能を評価することを目的として、分散協調電波電力伝送の実験システムを構築した。図 5 に開発した実験システムの構成を示す。実験システムは、大きく分けて送信系と受信系から構成される。表 1 に本実験システムで用いたモジュールを示す。

送信系は局所発振器と送信装置、8 本の送信アンテナから構成される。局所発振器は同軸ケーブルを通して 920MHz の無変調連続波を送信装置に入力する。送信装置内部で信号の分配、位相制御、出力強度の調節を経たのち、同軸ケーブルを通して各送信アンテナに入力される。各送信アンテナ

表 1: 実装において用いたモジュール

モジュール名	型番
コントローラ	STM32F446RE
送信アンテナ	APAMS-118
受信アンテナ	APAMS-118
受信装置	MICRF221
局所発振器	CC1352P1
SRAM	CY7C1059DV33-12
DAC	DAC5662
直交変調器	TRF370317
アッテネータ	HMC624
パワーアンプ	SKY65162-70LF

ナは入力された信号を電波として放射する。送信アンテナは、利得が 2.14 dBi のモノポールアンテナである。

図 6 に送信装置の詳細を示す。送信装置はコントローラ、SRAM、DAC、直交変調器、パワーアンプ、アッテネータによって構成される。SRAM、DAC、直交変調器、パワーアンプ、アッテネータに関しては、8 つの出力に対してそれぞれ 1 組ずつ用意されている。コントローラは、各直交変換器への入力と各アッテネータの減衰量を個別に制御するとともに、受信装置に対して RSSI フィードバックを要求する。局部発振器から同軸ケーブルを通して送信装置に輸入された 920MHz の無変調連続波は、送信装置内で 8 つの信号に分配される。分配された信号は直交変換器に輸入され、同時に直交変換器に IQ 値を入力することによって、無変調連続波に対して位相制御を行うことができる。例えば送信アンテナ i に対して位相 θ の制御を加える場合は、直交変換器 i に対して $I = \cos(\theta)$ 、 $Q = \sin(\theta)$ の値をそれぞれ入力する。入力された IQ 値は、局部発振器から生成された無変調連続波と直交変換器内部でミキサされる。このとき、次式に示すように、位相が ϕ である無変調連続波に対して θ の位相制御が加えられる。

$$\cos(\phi + \theta) = I\cos(\phi) - Q\sin(\phi). \quad (2)$$

送信装置で処理された 8 つの出力信号は、8 本の送電アンテナからそれぞれ約 -1dBm の強度で出力される。ただし、送信アンテナ i から電波を放射する必要がない場合は、アッテネータ i の減衰量を最大の 31.5dB に設定することによって出力を限りなく小さくする。

受信系は受信装置と 1 本の受信アンテナから構成される。受信アンテナは、利得が 2.14 dBi のモノポールアンテナである。受信装置では、コントローラからの要求に応じて RSSI を測定し、測定した値をフィードバックする。RSSI は dBm 単位で得られる。なお、本実験は各アルゴリズムの位相最適化性能を評価することを目的としているため、RSSI フィードバックは有線で実現している。

図 7(a) に実験の様子を示す。実験はシールドテント (株式会社ティエスエスジャパン製 ST-2448-200S-B-1) 内で実施した。図 7(b) にアンテナの配置を示す。プラスチックダンボールに 3×3 箇所の穴を空けてグリッドとし、グリッド上に送信アンテナと受信アンテナをそれぞれ配置した。上下左右に隣接するグリッド間の距離は 70cm で、斜めに隣接するグリッド間の距離は約 100cm である。

5. 実機評価

5.1 基礎実験

基礎実験として、位相と RSSI フィードバックの関係を調べた。図 8 に、送信アンテナ 1 から 7 までの位相を固定した状態で、送信アンテナ 8 の位相を 0 から 2π までスイープしたときの RSSI フィードバックの推移を示す。図 8(a)

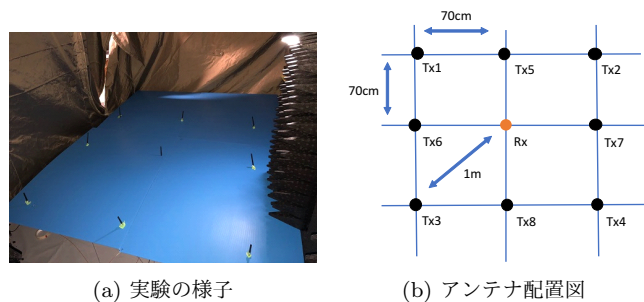


図 7: 実験環境

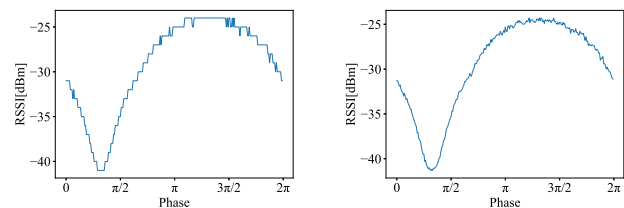


図 8: 位相と RSSI フィードバックの関係の例

は RSSI の分解能が 1dB の場合、図 8(b) は RSSI の分解能が 0.1dB の場合である。横軸は送信アンテナ 8 の位相、縦軸は RSSI フィードバック [dBm] である。位相階調は 256 としている。

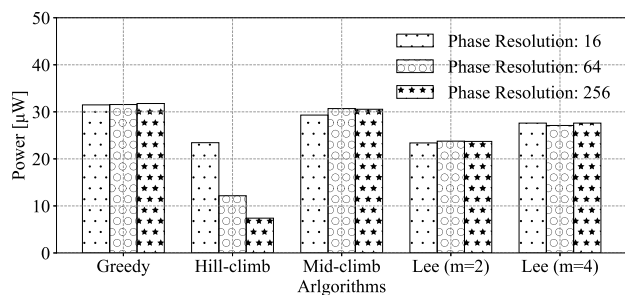
図 8 から 2 つのことがわかる。1 つ目は、位相制御量にしたがって RSSI フィードバックが最大 15dBm 程度変化することである。2 つ目は、測定精度や周囲の電波環境の変化などに起因する RSSI フィードバックの値の変動によって、局所的な最適解が複数存在していることである。

5.2 位相階調と RSSI の分解能が給電効率に与える影響

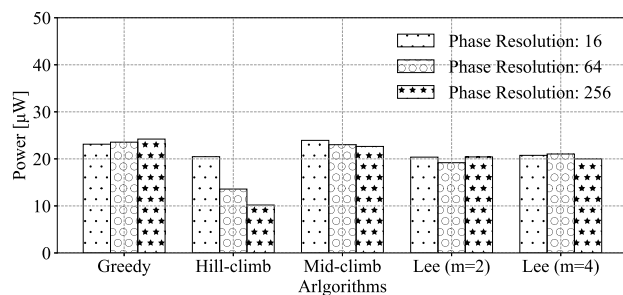
各位相最適化アルゴリズムの性能を評価するために、以下の 5 つの手法を実装して評価を行った。

- (1) Greedy: 3.1 節にて述べた Greedy 法である。
- (2) Hill-climb: 3.2 節にて述べた山登り法である。
- (3) Mid-climb: 3.3 節にて述べた中点山登り法である。
- (4) Lee ($m = 2$): 3.4 節にて述べた Lee らの手法において $m = 2$ とした場合である。
- (5) Lee ($m = 4$): 3.4 節にて述べた Lee らの手法において $m = 4$ とした場合である。

最初に、送信機側の位相階調と受信機側の RSSI の分解能が各位相最適化アルゴリズムにおける供給電力に与える影響について述べる。図 9(a) と図 9(b) に、各アルゴリズムによって得られた最適位相セットを用いて供給できる電力を位相階調ごとに示す。図 9(a) は RSSI の分解能が 0.1dB の場合、図 9(b) は RSSI の分解能が 1dB である場合である。位相階調は 16, 64, および 256 の 3 通りで実験を行っ

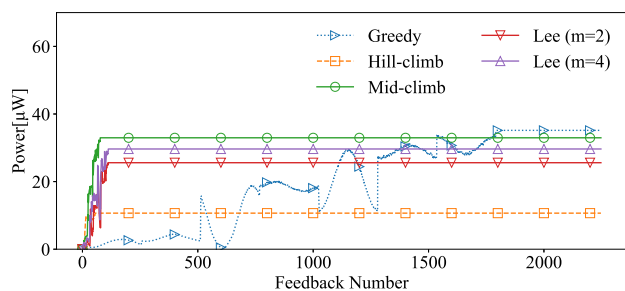


(a) RSSI の分解能が 0.1 dB

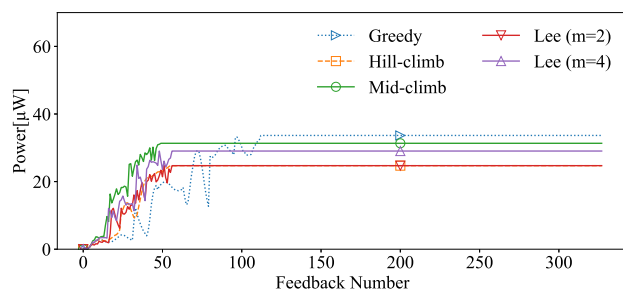


(b) RSSI の分解能が 1 dB

図 9: 各アルゴリズムによって得られた最適位相セットによってセンサノードが受信できる電力



(a) 位相階調を 256 としたとき



(b) 位相階調を 16 としたとき

図 10: 各アルゴリズムにおける RSSI フィードバック回数に対する供給電力の推移 (RSSI の分解能が 0.1dB)

た。電力の単位は μW としている。

図 9(a) および図 9(b) に示した実験結果から、以下のことがわかる。

- Greedy 法と中点山登り法は、位相階調や RSSI の分解能によらず、ほとんど同等の電力を供給することができる。
- 山登り法によって供給できる電力が他の手法と比較して小さい。図 8 に示すような関数を対象に山登り法を適用した場合、局所的な最適解を早期に見つけ、アルゴリズムを終えるためと考えられる。
- RSSI の分解能が高いほど、より真の最適位相に近い点を最適位相として採用しやすくなるため、結果として大きな電力を供給できる。
- 山登り法を除いて、位相階調の値が各位相最適化アルゴリズムによって得られる供給電力に与える影響は小さい。位相階調が高いほど位相を細かく見られるため、より大きな電力を供給できると考えられるが、実験結果からは位相階調による差はほとんど見られなかった。文献 [13] においても、位相階調 16 の場合で 95% 以上の電力を供給できることがシミュレーション結果から示されている。一方で山登り法において位相階調が低いほど供給電力が大きいの、位相階調が低いと位相の間隔が大きくなり、比較対象となる 2 つの

RSSI フィードバックの値の間の差が大きくなることで、雑音によって比較を誤る可能性が低くなるためと考えられる。

5.3 最適化の速度

5.2 節において、送信機側の位相階調と受信機側の RSSI の分解能が各位相最適化アルゴリズムにおける供給電力に与える影響を示した。本節では、各アルゴリズムの最適化の速度、より具体的には、位相最適化に要求する RSSI フィードバック回数という観点から、各アルゴリズムの最適化性能を評価する。

図 10(a) および 10(b) に、各アルゴリズムにおいて RSSI フィードバック回数に対する供給電力の推移を示す。図 10(a) は位相の解像度が 256 の場合、図 10(b) は位相の解像度が 16 の場合である。いずれも RSSI の分解能が 0.1dB の場合である。

図 10(a) および図 10(b) に示した実験結果から、以下のことがわかる。

- 他の手法と比較して、中点山登り法は少ない RSSI フィードバック回数のもとで高い最適化性能を有する。
- Greedy 法は最終的には大きな電力を供給できるが、多くの RSSI フィードバック回数が要求される。
- 山登り法はアルゴリズムを早期に終了してしまう。

6. 関連研究

本研究は、位相制御協調電力伝送、電波電力伝送における RSSI フィードバックに基づいた位相最適化に関する研究と関連する。

6.1 位相制御協調電力伝送

本研究では給電対象となるセンサノードの台数を1台と考える。一方で WSN においては、多数のセンサノードを用いることが想定される。センサノードが複数存在する場合、各センサノードに対してできるだけ公平に電力を供給する必要がある。供給電力量が各センサノード間で公平ではない場合、供給電力量が少ないセンサノードに対して、駆動に必要な電力を供給できない可能性があるためである。

本研究で取り上げた位相最適化アルゴリズムは、文献 [12] で提案されている位相制御協調電力伝送に適用できる。位相制御協調電力伝送は、複数のセンサノードに対する供給電力量を向上する手法である。より具体的には、各センサノードに対する最適位相セットを時分割で切り替えることによって、すべてのセンサノードに対する電力需要を満たす。

位相制御協調電力伝送では、まず各センサノードに対する最適位相セットを決定する。例えばセンサノードの台数を m とするとき、各センサノードに対して最適位相セット $\Theta_1, \dots, \Theta_m$ を決定する。

次に、位相セット Θ_j を用いて電力伝送する時間 T_j を式 (3) にしたがって決定する。

$$T_j = \frac{\sum_{k=1}^m W_{k,k}}{W_{j,j}}, \quad \forall j \in S. \quad (3)$$

ここに $W_{j,j}$ は位相セット Θ_j によるセンサノード j に対する供給電力であり、位相最適化を行う過程で知ることができる。また、 S はセンサノードの集合である。位相セット Θ_j を用いる時間を、位相セット Θ_j によってセンサノード j が得られる電力 $W_{j,j}$ の逆数比にする。すなわち $W_{j,j}$ が大きいほど短い時間、小さいほど長い時間にわたって θ_j を用いる。式 (3) に基づいた時間を割り当てることで、すべてのセンサノードに対して公平に電力を供給できる。

文献 [12] では実機実装を行って、位相制御協調電力伝送の効果を検証している。実験は、4 台の送信アンテナと 3 台の受信アンテナを用いて行われた。結果から、位相制御協調電力伝送は従来手法である CSD (Carrier Shift Diversity) 電力伝送 [16] と比較して供給電力について最大 222.8% 改善した。公平性については分散を用いて評価を行い、CSD 電力伝送と比較して最大 40% 改善した。

位相制御協調電力伝送を行うためには、最適位相セットをセンサノードの台数分だけ決定する必要がある。したがって、多数のセンサノードを使用することが多い WSN

においては、位相セット決定に要求される速度は極めて重要となる。本稿では 4 つのアルゴリズムをとりあげて、各アルゴリズムが電力供給効率に与える影響を実機環境のもとで評価した。実験結果から、中点山登り法が最も優れた最適化性能を有することがわかった。今後の複数センサノード環境への拡張に向けた 1 課題として、中点山登り法をもとにした位相制御が達成できる供給電力量を実証することが挙げられる。

6.2 電波電力伝送における RSSI フィードバックに基づいた位相最適化

RSSI フィードバックに基づく位相最適化手法は大きく 2 通りに分けられる [17, 18]。1 つ目は、RSSI フィードバックの値から完全なチャネル推定を行う方法である。文献 [17] では、生成したランダム位相と対応する RSSI フィードバックに対してカルマンフィルタを適用することでチャネル推定を実現する手法が提案されている。すべての送信アンテナに対する位相の最適化を同時に実現するため、送信アンテナの本数が計算量の増加に与える影響が少ない。一方で送信端末において複雑な計算が要求される。

2 つ目は、位相を入力とする受信電力の関数をもとにして、各送信アンテナとセンサノード間の位相差を間接的に推定する方法である。送信機に高度な演算能力が要求されないため、無線センサネットワークを想定するとき、1 つ目の手法よりも適しているといえる。本稿で扱った手法はこちらに該当しており、いずれも比較演算だけで動作するため、簡易なハードウェアで実現することができる。本稿でとりあげた手法以外にも、例えば文献 [18] では、現在の最適位相からランダムな幅だけ移動することを繰り返す手法が提案されている。RSSI の増加または減少を示す 1 ビットフィードバックに基づいて、RSSI が増加した場合は最適位相を更新するという処理を所定の回数だけ繰り返す。シミュレーションによって収束性に関する効果が実証されている一方、実環境において生じる様々な要因、例えば RSSI への雑音の影響や、センサノードにおける RSSI 分解能がもたらす影響などは考慮されていない。

これまで 2 つ目の位相最適化手法は、シミュレーションによる評価を通してその効果が議論されてきた。本研究は、位相最適化手法が実環境においてもたらす効果を実証した初めての研究である。例えば実証実験から、センサノードにおける RSSI 分解能が各手法の供給電力量に影響をもたらすことがわかった。

7. おわりに

本稿では電波電力伝送における位相の最適化を検討した。センサノードから受信する RSSI フィードバックの値を利用した最適化アルゴリズムとして Greedy 法、山登り法、Lee らの手法をとりあげ、実機実験によって各アルゴ

リズムを評価した。評価結果から、中点山登り法が高い最適化性能を持つことを明らかにした。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP19H01101, JP19K11923, 18H03231) の支援の下で行った。

参考文献

- [1] 阪田史郎, 田中成興, 西室洋介, 川崎光博, 福井潔, “ZigBee センサネットワーク,” 秀和システム, July 2015.
- [2] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless Sensor Networks: A Survey,” *Computer networks*, vol.38, no.4, pp.393–422, March 2002.
- [3] Y. Ruan, and Y. Tang, “A Water Quality Monitoring System Based On Wireless Sensor Network and Solar Power Supply,” 2011 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems(IEEE-CYBER 2016), pp.126–129, March 2011.
- [4] N.A.A. Aziz, and K.A. Aziz, “Managing Disaster with Wireless Sensor Networks,” 2011 International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2011), pp.202–207, February 2011.
- [5] N. Tomasz, F. Robin, K. Holly, D. Ben, C. Martin, L. Achim, B. Alexander, G. Tim, and S. Jochen, “Wireless Sensor Network for Habitat Monitoring on Skomer Island,” 2010 IEEE Local Computer Network Conference(LCN 2016), pp.882–889, October 2010.
- [6] S. Winston, Khoon-Guan, E. Zhi, Ang, and T. Hwee-Pink, “Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) - Survey and Challenges,” 2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace and Electronic Systems Technology(Wireless VITAE 2009), pp.1–5, May 2009.
- [7] Y. Kawahara, X. Bian, R. Shigeta, R. Vyas, M.M. Tentzeris, and T. Asami, “Power Harvesting From Microwave Oven Electromagnetic Leakage,” *Proceedings of the 15th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2013)*, pp.373–382, September 2013.
- [8] C. Lim, Jin, D. Micheal, S. Patrick, and H. Lo, Hai, “A Simple Solar Energy Harvester for Wireless Sensor Networks,” 2016 6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS 2016), pp.1–6, August 2016.
- [9] S. Bernd, and K. Chang, “Microwave Power Transmission: Historical Milestones and System Components,” *Proceedings of the IEEE*, vol.101, no.6, pp.83–86, June 2013.
- [10] L.R. Varshney, “Transporting Information and Energy Simultaneously,” 2008 IEEE International Symposium on Information Theory(ISIT 2008), pp.1612–1616, July 2008.
- [11] 総務省, “無線設備規則,” , November 1950.
- [12] K. Jiei, H. Hikaru, K. Kazuhiro, S. Shunsuke, and W. Takashi, “Phase-controlled Cooperative Wireless Power Transfer for Backscatter IoT Devices,” *IEEE International Conference on Communications (ICCC 2020)*, pp.1–6, February 2020.
- [13] L. Seunghyun, and Z. Rui, “Distributed Energy Beamforming with One-Bit Feedback,” 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW 2016), pp.398–403, April 2016.
- [14] L. Seunghyun, and Z. Rui, “Distributed Wireless Power Transfer With Energy Feedback,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol.65, no.7, pp.1685–1699, December 2017.
- [15] 濱政光, 川崎慈英, 田中勇氣, 木崎一廣, 猿渡俊介, 渡辺尚, “複数のアンテナ位相制御における位相最適化アルゴリズムの検討,” モバイルコンピューティングとパーベシブシステム (MBL) 研究会, pp.1–8, March 2020.
- [16] D. Maehara, G.K. Tran, K. Sakaguchi, K. Arai, and M. Furukawa, “Experiments Validating the Effectiveness of Multi-point Wireless Energy Transmission with Carrier Shift Diversity,” *IEICE transactions on Communication*, vol.97, no.9, pp.1928–1937, September 2014.
- [17] K.W. Choi, L. Ginting, P.A. Rosyady, A.A. Aziz, and D.I. Kim, “Wireless-powered Sensor Networks: How to Realize,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.16, no.1, pp.221–234, October 2016.
- [18] M. Raghuraman, H. Joao, M. Upamanyu, and B. Gwen, “Distributed Transmit Beamforming Using Feedback Control,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.56, no.1, pp.411–426, December 2009.