

IRSの反射位相パターン最適化における計算量削減に関する一検討

熊代 壮晟[†] 森 友紘[‡] 木崎 一廣[‡] 藤橋 卓也[‡] 猿渡 俊介[‡] 渡辺 尚[‡]
[†]大阪大学工学部 [‡]大阪大学大学院情報科学研究科

1 はじめに

6Gを実現する無線通信技術の1つとして知的反射平面(Intelligent Reflecting Surface: IRS)が注目を集めている。IRSは多くの反射素子をもつため、その反射位相パターンの最適化には膨大な計算量を要する。本稿では、IRSの反射位相パターン最適化における計算量を削減するための手法として山登り法を基に検討する。また、シミュレーションで実施した検討手法の基本性能評価についても述べる。

2 背景

IRSは平面上に配置した複数の反射素子から構成される。一般的にIRSは無線送受信端末間に配置され、各反射素子は送信端末が送信した電波の方向や位相を任意に変更して反射することによって、送受信端末間に理想的な無線チャネルを提供する。また、電波を直接届けにくいエリアに対して物理的障壁を迂回させて電波を届けたり、空間中に拡散した無駄な電波を回収して目的地に届けることができる。

IRSに関する研究は用途も含め多種多様である。文献[1]では、MIMOによる無線通信においてAPとクライアント間に制御可能な反射板を設置することでAPを仮想的に増やし、電波の位相を制御することでデータスループットの向上を試みている。文献[2]では、電波を反射させるか透過させるかを選択可能な反射素子を搭載した薄い反射板を用いて、屋内の各部屋に複数設置した受信機のRSSIを増大させることを試みている。

3 課題

IRSの効果的な利用には膨大な計算量を伴う場合がある。以下、各反射素子においては反射位相のみの制御を想定する。一般に N 個の反射素子で構成され各反射素子で入射する電波に与える反射位相を M 種類のうちから選択できるIRSは全体として M^N 種類の反射位相パターンをもつ。反射素子数や反射位相の種類が増加すれば、反射位相パターンは指数関数的に増加し、最適な反射位相パターンを全探索で見つけることは計算時間の観点から非現実的であると考えられる。

4 検討手法

本稿では、図1に示すような縦横5個ずつ並べた計25個の反射素子から構成されるIRSを想定する。各反射素子には2段階(0° , 180°)または3段階(0° , 90° , 180°)、4段階(0° , 60° , 120° , 180°)の反射位相を設定することができるものとする。また、本稿では無線電力伝送での利用を想定し、各反射素子に独立に反射位相を設定する場合に受信機が最大電力を得るときの各反射素子の反射位相の組み合わせを、設置したIRSの最適な反射位相パターンとする。

4.1 全探索

本稿で想定するIRSの反射位相パターンを全探索する場合について考える。全探索では各反射素子の反射位相を独立に設定しながら、設定可能な反射位相パターンを網羅する。位相変化が2段階の場合、反射位相パターンの総数は $2^{25} \approx 3 \times 10^7$ である。同様に、3段階の場合は $3^{25} \approx 8 \times 10^{11}$ 、4段階の場合は $4^{25} \approx 1 \times 10^{15}$ である。全探索の場合、最適な反射位相パターンを確実に得ることができる反面、高性能な計算機を用いても長時間を要する。また、IRSを社会実装することを考えると、環境が変化する度にパターン最適化のために無視できない程度の計算時間がかかるような状況下ではIRSを最大限利用することは難しい。

4.2 山登り法

IRSの最適な反射位相パターンをより短時間で得ることを目的に、本稿では全探索より計算量が小さい手法の一検討として山登り法(Hill Climbing: HC)を取り上げる。山登り法は目的関数 $f(x)$ に対して、極値 $f(a)$ 及びその解 $x = a$ を求める探索アルゴリズムである。手順の概要は、設定した初期値 $x = x_0$ とその近傍 $x = x_0'$ に対して、 $f(x_0')$ が $f(x_0)$ よりも「良い」値ならば現状の最適解を $x = x_0'$ とし、これを繰り返すことで最適であると思われる解 $x = a$ を求め

るというものである。本稿では「良い」値を「大きい」値とする。

本稿で想定するIRSの反射位相パターンを最適化する際に山登り法を適用する場合について考える。IRSのみに注目すると、考えるべき目的関数は受信電力を返す25変数関数となる。本稿では、簡略化のために25変数をまとめて1変数すなわちある1つの反射位相パターンとして扱う。まず、初期値(初期状態)としてある反射位相パターンを設定する。そして、図1に示すような順番で段階的に反射素子の反射位相を変更しながら、より受信電力の大きい反射位相パターンに更新していく。これを繰り返すことで最適であると思われる反射位相パターンを求める。また、最後の反射素子を辿り終わった後の反射位相パターンを初期状態として再び0番目の反射素子から山登り法を適用することもでき、複数周山登り法を適用することでさらなる最適化を図ることもできる。山登り法の計算量について考える。1周の山登り法で位相変化が2段階の場合、最後の反射素子を辿り終えるまでに設定される反射位相パターンの総数は $2 \times 25 = 50$ である。同様に、3段階の場合は $3 \times 25 = 75$ 、4段階の場合は $4 \times 25 = 100$ である。このように、全探索に比べて計算量を大幅に削減できることが山登り法の最大のメリットである。しかし、初期値によっては局所的最適解に陥ってしまうというデメリットがあり、大域的最適解を得るためには初期値を適切に選択する等の工夫が必要となる。

5 評価環境

現在検討されているIRSの多くはミリ波帯を想定している。一方で、ミリ波帯を利用可能な送受信端末は市場に出回っていないため入手が困難である。本稿では、現在広く利用されている2.4GHz帯を対象としたIRSを実装した。

5.1 シミュレーション環境

図2に本稿における評価環境の模式図を示す。ただし、各寸法や位置関係は後述する実機実験環境に従っている。本稿ではIRSを1枚、送受信機を各1台ずつ用いており、受信地点は25箇所である。IRSは30cm四方で、6cm四方の反射素子を水平方向に縦横5個ずつ並べた計25個で構成される。送信機は送信電力1mW、周波数2.44GHzの電波を生成するものとした。送信機からの直接波は無視し、受信電力はIRSの下部に平行に縦横5個ずつ12cm間隔で設けた各点で測定した。また、IRSにおける反射点は各反射素子の中心と定め、送受信機のアンテナ利得、IRS以外の物体による反射波及びノイズは考慮しないものとした。

5.2 実機実験環境

本研究では、シミュレーションに並行して、比較的安価かつ小型であるIRS及びIRSの簡易実験プラットフォームの実装も進めている。図3に実装したIRSの実機を示す。IRSは反射素子基板と制御回路基板から構成される。反射素子基板から4分の1波長分離して制御回路基板を接続する。反射素子基板を構成する反射素子はダイポールアンテナとパルクタダイオードから構成される。各反射素子は入射した電波を反射するか透過するかを選択できる。反射素子は鉛直方向に入射した電波の位相を 180° 変更することが可能となる。反射素子を透過した場合は、後方の制御回路基板が電波を反射する。パルクタダイオードに印加する電圧の大きさによって電波遮断特性が変化するため入射波の透過度を調整、すなわち反射素子基板と制御回路基板の反射波を細かく制御することができるため、IRSは任意の位相の合成波を生成できる。

図4に実機実験環境の全体像を示す。送受信端末には安価に入手可能なソフトウェア無線機であるANALOG DEVICESのADALM-PLUTOを使用している。ADALM-PLUTOは325MHz-3.8GHzのRF信号を送受信できる。ここでRF信号の中心周波数は2.44GHzに定めた。ソフトウェアにはGNU Radioを用いた。受信端末の位置座標による影響を測定するために直行ロボットIGUS DLE-RG-0001を利用した。本直行ロボットは、受信端末の位置座標をx軸方向に500mm、y軸方向に500mm、z軸方向に100mmまでの範囲で変更することができる。

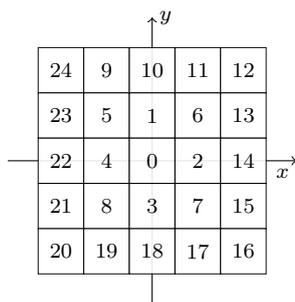


図1: 反射素子の辿り方

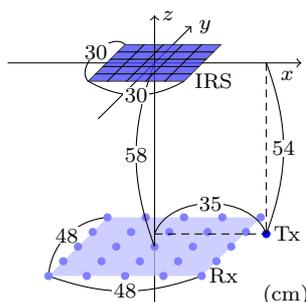


図2: 評価環境の模式図



図3: IRS実機本体

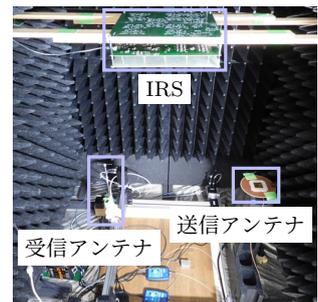


図4: 実機実験環境の全体像

6 評価

本稿では、シミュレーションを用いて山登り法の基本性能評価を4つ実施した。1つ目は、全探索及び山登り法の計算時間の比較評価である。山登り法を用いることによる IRS の反射位相パターン最適化の計算量削減の効果を評価することが目的である。2つ目は、山登り法の周回数を1周から3周まで変えたときの受信電力の評価である。山登り法の周回数を増加させることによる受信電力の改善を評価することが目的である。3つ目は、位相変化を2段階から4段階まで変えたときの受信電力の評価である。位相変化数を増加させることによる受信電力の改善を評価することが目的である。4つ目は、初期状態と受信電力の関係の評価である。山登り法の初期状態が IRS の反射位相パターン最適化に及ぼす影響及び効果的な初期状態の選択方法を評価することが目的である。

6.1 計算時間の比較評価

位相変化の段階数	手法	計算時間
2 段階	全探索	14 042 ms
	山登り法	10 ms
3 段階	全探索	98 h
	山登り法	10 ms
4 段階	全探索	130 885 h
	山登り法	11 ms

表 1: IRS 反射位相パターン最適化に費やす計算時間

表 1 に各手法における計算時間を示す。図 2 における受信エリアの中央(以下、中心点)に設置した受信機に最大電力を与えるときの IRS の反射位相パターンを求めるまでの計算時間を計測した。それぞれ計 10 回の計測における平均値を評価に用いた。ただし、位相変化が 3 段階及び 4 段階における全探索の計算時間については概算値を示す。全探索では 2 段階の時点で約 14s を要するが、山登り法では 4 段階まで位相変化数を増加させても 11ms と 2 段階における全探索の約 0.08%程度にまで計算時間を小さくすることが可能である。また、全探索では位相変化数が増加すると反射位相パターンが指数関数的に増加するため計算時間も大幅に長くなるが、山登り法を用いることで位相変化数が増加しても計算時間は微増で済むことも確かめられた。よって、山登り法を用いることで、計算時間の大幅な短縮が期待できる上、全探索では計算量の面で非現実的である 3 段階以上の位相変化数にも短時間で対応できることがわかる。

6.2 山登り法の周回数に関する評価

図 6 に、山登り法の周回数に対する受信電力の経験累積分布を示す。中心点に設置した受信機で測定し、無作為に設定した初期状態での山登り法を 10000 回実行した。ただし、Max は全探索で求めた最大受信電力を示す。いずれの周回数においても最大受信電力を得るパターンを求めることができている。また、周回数を増加させるとその確率が大きくなり、最小受信電力も含めて全体的に安定している。特に顕著な改善として、1周から2周に増やした場合の最大受信電力を得る確率が約 25%増加している。全探索と山登り法の計算時間や山登り法で周回数を増やしても計算時間は微増であることも加味すれば、山登り法を用いることによるコストパフォーマンスは大きいと考えられる。また、所々受信電力が変化しない箇所が見られるが、これは局所解に陥っているためであると考えられる。

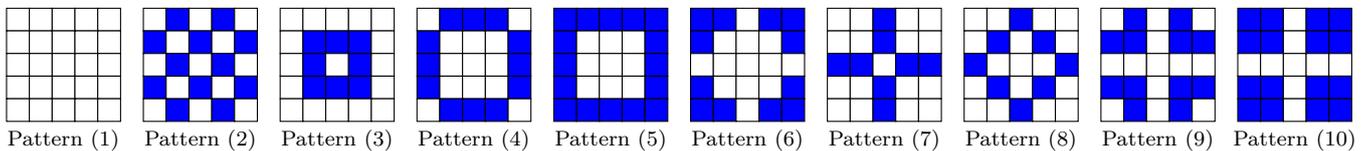


図 5: 山登り法における反射位相パターンの初期状態(□: 0° ■: 180°)

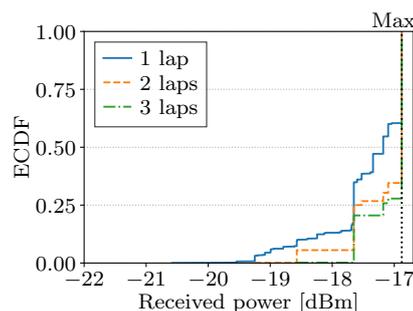


図 6: 周回数に対する受信電力

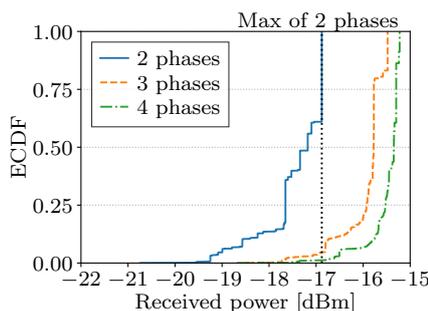


図 7: 位相変化数に対する受信電力

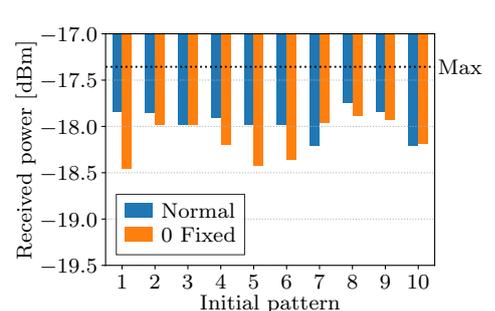


図 8: 初期状態に対する平均受信電力

6.3 山登り法の位相変化数に関する評価

図 7 に、山登り法の位相変化数に対する受信電力の経験累積分布を示す。中心点に設置した受信機で測定し、無作為に設定した初期状態での山登り法 1 周を 10000 回実行した。ただし、Max of 2 phases は 2 段階において全探索で求めた最大受信電力を示す。位相変化数を増加させることで、各反射素子の位相をより精密に制御でき、受信電力が向上することがわかる。3, 4 段階では 2 段階における最大受信電力を 90%以上の確率で超えている。また、2 段階よりも 3, 4 段階の方が無作為に設定した初期状態に対する受信電力のばらつきが小さい。よって、計算時間の観点から 3 段階以上における全探索での最適化は実質的に不可能であると考え、全探索を用いるよりも 3 段階以上の反射位相を設定した IRS に対して山登り法を適用する方が結果として受信電力を向上させることが期待できる。

6.4 山登り法の初期状態に関する評価

図 8 に、山登り法の初期状態に対する平均受信電力を示す。図 5 に示す 10 種類の反射位相パターンを初期状態とし、受信エリア内の計 25 点での受信電力の平均値を計測した。また、本評価では最初に辿る反射素子の位相変化を初期状態から変更するか否かで受信電力に生じる差についても評価する。図 1 における 0 番目の反射素子の反射位相を固定したものが 0 Fixed、そうでないものが Normal である。Max は全探索における受信エリア内の計 25 点での最大受信電力の平均値を示す。初期状態によって平均受信電力に差が見られることから、適切に初期状態を設定することによる平均受信電力の向上が期待できる。Normal, 0 Fixed に関わらず 10 種類の中で比較的高い受信電力を与えた初期状態は(2)(3)(8)(9)であった。(2)が比較的高い受信電力を与えたのは、2種類の反射位相が交互に満遍なく並んでいるためどの受信地点に対してもパターン最適化が比較的順調に進んだためであると考えられる。(2)は比較的高い受信電力を与えた初期状態の中でも機械的かつ拡張性が高いパターンであるため 10 種類の中では受信地点によらない万能な初期状態の候補として期待できる。Normal と 0 Fixed で受信電力に比較的大きな差が生じた初期状態は(1)(5)(6)であった。また、0 番目の反射素子の反射位相を固定しない方が反射位相パターン決定における自由度が高くなり、受信電力が大きくなる傾向が見られる。

7 おわりに

本稿では、IRS の反射位相パターン最適化における計算量の削減を目的とした、山登り法を基にした最適化アルゴリズムの検討及び基本性能の評価を示した。現在、山登り法の効果を向上させるため、パラメータを変えてさらなる網羅的な評価を行っている。また、大域的最適解の取得率を向上させるための山登り法の改良や IRS 簡易実験のプラットフォームを用いた実証的な評価等も行っている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費(JP23H00470, JP22K12010)及び JST さきがけ(課題番号: JPMJPR2032)の支援の下で行った。

参考文献

[1]M. Dunna, C. Zhang, D. Sievenpiper, and D. Bharadia, "Scattermimo: Enabling virtual mimo with smart surfaces," in *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ser. MobiCom '20, 2020, pp. 10.1–10.14. DOI: 10.1145/3372224.3380887.

[2]V. Arun and H. Balakrishnan, "Rfocus: Beamforming using thousands of passive antennas," in *Proceedings of the 17th Usenix Conference on Networked Systems Design and Implementation*, ser. NSDI'20, 2020, pp. 1047–1062. DOI: 10.5555/3388242.3388317.