

状況認識のための 周波数シフト型 Backscatter タグの設計と評価

中川 善博¹ 前田 透¹ 内山 彰^{1,2} 東野 輝夫¹

概要: 見守りなどの目的で、人の行動やモノの状況認識に関する研究が注目を集めている。これまでに、様々なセンサを利用した手法が提案されているが、充電や電池交換に伴う管理の手間は普及に向けた大きな課題の一つである。これに対し、我々は超低消費電力で動作する周波数シフト型 backscatter タグを利用した状況認識手法を提案する。Backscatter タグはアンテナと発振器、および物理的なスイッチから構成され、backscatter と呼ばれる周囲の電波を散乱することで通信を行う技術を利用する。人の動きやモノの状況変化によって物理的にスイッチが切り替わることで、タグから散乱される電波には発振周波数に応じた周波数シフトが発生する。この周波数シフトの有無やその時間変化を観測することによって、状況認識を実現する。本研究では、backscatter タグによる状況認識の実現可能性を示すため、backscatter タグを試作し、性能評価を行った。その結果、BLE を利用した backscatter によって、3m 以内の範囲において周波数シフトの検出が可能なが分かった。さらに、コンセプトアプリケーションとして着座センサを実装し、様々な状況認識に応用可能なことを確認した。

1. はじめに

近年、見守りなどの目的で、人の行動やモノの状況認識に関する研究が盛んに行われている。例えば、離床検知により介護者の負担を軽減したり [1]、ドアの開閉を検知することで、空調制御や侵入検知に利用するといった用途がある [2]。また、ポットやリモコンなど、日々使用するモノが実際に使用されている頻度や時間を把握することで、遠隔での見守りサービスに役立てることができる [3]。これまでにウェアラブル端末も含め、様々なセンサを利用した状況認識の手法が多数提案されている。しかし、多くのセンサは充電や電池交換が必要であり、恒常的に使用することが想定されるアプリケーションにとって、維持管理のコストは大きな課題である。

このような課題を解決するため、センサの省電力化と環境発電を組み合わせた取り組みが多数なされており、いくつかの製品も入手できるようになっている*¹。しかし、環境発電ではわずかな電力しか得られないため、動作や通信の頻度などの機能を制限するアプローチが中心である。このため、頻繁な動きを伴う行動のセンシングなど、機能制

限が本質的に困難なアプリケーションを実現できない。これに対して、カメラに代表されるように、設備側でセンシングを行う方式は少数の設備で広範囲をセンシングでき、設備に電源供給が可能な場合も多いため、維持管理の観点ではコストが低い [4]。一方、カメラにはプライバシーの問題もあり、適用できない場合がある。LiDAR などの測距デバイスや RFID, Wi-Fi CSI (Channel State Information) などの電波変動を利用した方式 [2,5] は、プライバシーのリスクが低い方式として注目されている。一方、新たな設備の導入や環境ごとの学習データ収集が必要であったり、認識可能な状況に限られるといった課題も存在する。

そこで、我々は周波数シフト型 backscatter タグ（以降、backscatter タグと呼ぶ）を利用した状況認識手法を提案する。Backscatter は周囲の端末から発信される Wi-Fi や Bluetooth などの電波の反射/吸収の状態を切り替えることで通信を行う技術である [6]。Backscatter は、タグ側で搬送波を生成する必要がないため、超低消費電力でのデータ送信が可能であることから、RFID の通信方式として採用されている。近年では、Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, TV などの既存の電波を利用して backscatter 通信が可能なが報告されている [7-10]。このような技術を用いて、センサデータを backscatter 通信により送信し、状況認識を実現することは可能である。しかし、センサやマイクロコントローラの消費電力も考慮した設計が求められるため、そ

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science & Technology, Osaka University

² JST さきがけ

*¹ <https://www.enocean.com/en/technology/energy-harvesting/>

の実現は容易でない。

この課題を解決するため、backscatter タグでは、センサデータを送信する目的で backscatter を利用するのではなく、センシングそのものを行うための手段として利用する。Backscatter タグは、アンテナと発振器、および物理スイッチから構成され、センサやマイクロコントローラは使用しない。人の動きやモノの状況変化によって物理スイッチが切り替わることで、backscatter タグから散乱される電波には、発振器の周波数に応じた周波数シフトが発生する。提案手法では、この周波数シフトの有無やその時間変化を観測することによって、状況認識を実現する。周波数シフトの有無が物理スイッチの ON/OFF に直結しているため、機械学習によるモデル構築は不要である。さらに、あらかじめ発振周波数とそれに対応するタグの装着部位・箇所の紐をデータベースなどに登録しておけば、シフト周波数に応じた対象の識別も可能である。

また、状況認識における大きな課題として、人の動きによっても数 Hz から数十 Hz の電波変動が発生し、ノイズとなることが挙げられる。この問題に対し、提案手法では、発振器を利用して人の動きの影響を受けない周波数帯に散乱波をシフトさせることで、周辺の人やモノの動きに対して堅牢な散乱波の観測を実現する。発振器は腕時計程度の発振周波数で十分であり、 μW レベルでの消費電力で動作する*2。したがって、ボタン電池でも数年間、環境発電を利用すれば永続的に動作する見込みである。

ただし、発振器の消費電力を抑えるためには、数百 kHz の発振周波数に抑える必要がある。しかし、Wi-Fi や Bluetooth のチャンネル帯域幅が数 MHz から数十 MHz であることを考慮すると、周波数をシフトしても元の搬送波に埋もれてしまい、散乱波の観測は困難となる。このため、提案手法では、Interscatter [9] で提案されている手法を利用し、BLE (Bluetooth Low Energy) による擬似的な狭帯域搬送波の送信を実現した。本稿では、backscatter タグの設計と、散乱波の検出方法について述べる。本研究の貢献は以下の通りである。

- センサやマイクロコントローラを排除した backscatter タグを考案し、backscatter をセンサとしてそのまま利用する新しい概念を提案した。
- backscatter タグは、従来の環境発電と省電力化を併用する方式と比べて、省電力化のために動作や通信の頻度を制限する必要が無い。したがって、従来方式では実現が困難な継続的センシングを必要とする状況の認識への適用が期待できる。
- backscatter タグを利用したセンシングでは、周波数シフトの有無を観測するだけでセンシングが可能のため、学習データの収集が不要であり、異なる環境でも

容易に動作する。

- backscatter タグのプロトタイプを開発し、実環境における性能評価を通して状況認識への実現可能性を確認した。
- backscatter タグを用いたコンセプトアプリケーションとして着座センサを実装し、状況認識への応用可能性を示した。

2. 関連研究

2.1 MEMS センサを用いた行動認識

ユーザが身につけたセンサから得られるデータを解析することで「歩いている」、「走っている」などの行動を認識する手法は、これまで広く研究が行われてきた。行動認識には精度と分解能が高い加速度センサが主に用いられている [11]。また、省電力な人の行動・状況認識として、気圧センサを用いたもの [12] や、低サンプリングレートの加速度データの補完 [13]、人の動きから得られる発電量からの行動推定 [14] など、多くの取り組みがある。しかし、これらは依然として電力消費が大きいスマートフォンやウェアラブルセンサ、マイコンなどに依存しており、電池交換や充電のための管理コストがかかるという課題は解決されていない。

2.2 Wi-Fi 電波を用いた行動認識

Wi-Fi の通信時に得られるチャンネル状態情報 (CSI) を利用した行動認識 [15,16] は、必要な機器が基地局と受信機のみであり、追加のセンサが必要ないことから、近年注目されている。しかし、設置環境ごとに学習が必要であることや、複数の人が存在する時に人物の識別ができないという課題がある。これに対し、我々は管理の手間が無い backscatter タグを人に装着することで、複数の人が存在する状況でも backscatter タグを装着した人のみを識別し、行動認識を実現する。また、backscatter タグを装着した人が複数存在する場合でも、一人一人の識別が可能である。さらに、backscatter タグは物理的なスイッチングをそのまま電波の変動に変換するため、フェージングなどによる複雑な環境の影響を含む CSI と異なり、本質的に環境ごとの学習モデルを構築することなく行動認識を実現できる。

2.3 Backscatter 通信

Ambient Backscatter [7] の発表以来、様々な backscatter 通信の方式が提案されている。Ambient Backscatter は、TV などの環境に存在する電波を反射・非反射の状態を切り替えることで、非常に少ない消費電力での無線通信が実現できるが、通信距離や速度に限られる。これに対して、電波の自己干渉を無くし、通信可能距離を伸ばす手法 [17] や、複数アンテナを利用することで通信可能距離と通信速度を上昇させる手法 [18] などが提案されている。また、既

*2 SiTime 社の発振器 SiT1569 では μW レベルの消費電力で最大 462.5kHz までの周波数が発信可能である。

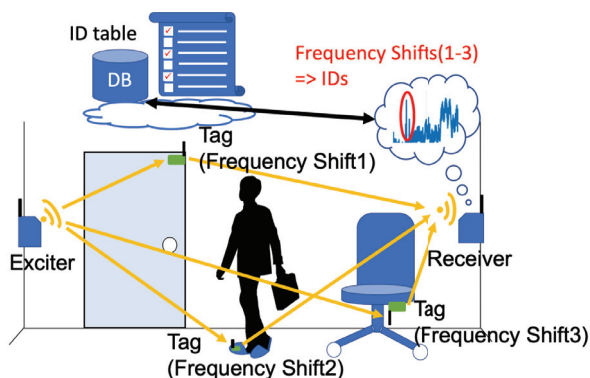


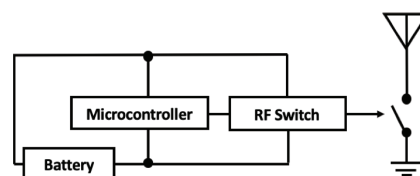
図 1 システム概要

存の Wi-Fi 設備を利用する Wi-Fi Backscatter [10] では、最大 1 kbps の通信速度と最大 2.1 メートルの通信範囲を実現している。さらに、Passive Wi-Fi [19] では基地局側で送出する電波を制御することで、Wi-Fi と同様な通信速度である 1Mbps から 11Mbps で 100 フィートの通信距離を実現しており、これらは環境発電で動作する新しい無線デバイスの普及につながる技術である。Printed Wi-Fi [20] では、3D プリンターで作られたアンテナに接続されたスイッチの物理的な ON/OFF で Backscatter 信号を発生させ、風力計や水流計として利用できることを示している。Printed Wi-Fi は電力を必要とせず、風力や水流、人の力などの周囲の力を利用して backscatter 信号を発生させている点で優れている。また、backscatter 通信では、周囲の環境電波に対して反射・吸収の 2 状態を切り替えることで通信を行うため、電波を生成するための電力が不要であり、無線通信にともなう消費電力を大幅に削減することができる。しかし、センサやマイクロコントローラの消費電力も考慮した設計が求められるため、その実現は容易でない。

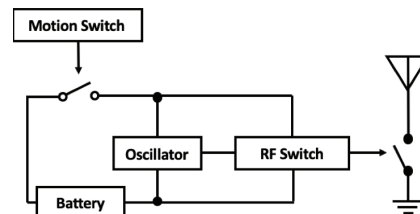
3. システム概要

図 1 のように屋内環境において、搬送波の送信機 (exciter) と受信機が存在し、backscatter タグが靴やドア、椅子などに取り付けられているような環境を想定する。Exciter としては、電源供給された Wi-Fi 基地局や、ノートパソコン、スマートフォンなど、十分な容量のバッテリーを持つ無線通信可能な端末が利用できる。受信機は backscatter タグによる散乱波を観測するための物であり、exciter と同様の端末が利用できる。

対象環境に存在する backscatter タグにおいて、物理スイッチが ON になっていれば、exciter から送出された周波数 f_c の搬送波に対して、タグごとに固有の周波数シフトが発生する。対象環境に存在するタグ i の発振周波数 f_i と、タグの物理スイッチに対応する人の行動やモノの状況 c_i の組があらかじめデータベースに登録されているものとする。受信機は、周波数スペクトラムに対してピーク検出を行い、周波数シフト f_i の有無を判別する。これによ



(a) 従来の Backscatter デバイス



(b) 周波数シフト型 Backscatter タグ

図 2 回路構成

て、タグ i の物理スイッチの ON/OFF 状態をセンシングすることができ、それに対応する人の行動やモノの状況 c_i を認識する。

4. システム設計と実装

4.1 周波数シフト型 Backscatter タグの設計

従来の backscatter を通信として利用する方式では、図 2(a) に示すように、通信制御やセンサデータ処理のためにマイクロコントローラを搭載している。一方、周波数シフト型 backscatter タグは図 2(b) のように発振器と RF スイッチ、アンテナ、物理スイッチにより構成される。物理スイッチは人の動きやモノの状態変化に応じて ON/OFF が切り替わる。物理スイッチが ON の時は、回路に電源が供給され、backscatter タグ i に搭載された発振器の周波数 f_i [Hz] に従って、アンテナに接続された RF スイッチの ON/OFF が切り替わる。RF スイッチの ON/OFF に応じてアンテナのインピーダンスが切り替わり、散乱波に f_i [Hz] の周波数シフトが発生する。これは、三角法の基礎において、

$$2 \sin ft \sin f_i t = \cos(f - f_i)t - \cos(f + f_i)t$$

であることから説明できる。上式は、周波数 f_c, f_i である 2 つの正弦波の積をとることで、周波数 $f_c + f_i, f_c - f_i$ の余弦波 (位相が $\pi/2$ 遅れた正弦波) となることを示している。搬送波の周波数 f_c に対して、 f_i と $-f_i$ の 2 つの周波数シフトが発生することに注意されたい。搬送波に対する f_i または $-f_i$ のいずれかの周波数シフトの有無を観測することで、状況認識を実現する。

4.2 周波数シフト検出

受信した信号から周波数シフトを検出するため、SFTF (短時間フーリエ変換) を適用して、信号のパワースペクトラムの時系列データを取得する。さらに、時間軸と周波数軸に対して移動平均フィルタを適用し、平滑化を行う。

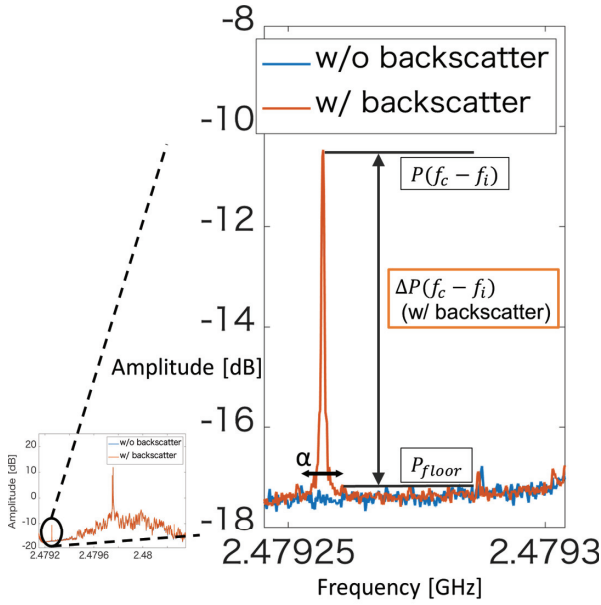


図 3 ピーク検出

移動平均フィルタのウィンドウ幅は、それぞれ経験的に 10, 2 とした。図 3 に平滑化後のスペクトラムの例を示す。搬送波の周波数は 2480MHz であり、500kHz の周波数シフトを発生させている。±500kHz に周波数シフトによるピークが発生するはずであるが、搬送波成分の隆起によって +500kHz のピークは観測が難しい状態になっている。このような場合でも、正負の周波数シフトのうちいずれか一方が検出できれば十分なことから、提案手法は高いノイズ耐性を有する。

以下では、ピーク検出手法の詳細を述べる。周波数 f の信号レベルを $P(f)$ とする。以下では、負の方向の周波数シフトに対する検出方法について説明するが、正の方向の場合も同様である。また、スペクトラムのノイズフロア P_{ffloor} を以下の式で定義する。

$$P_{ffloor} = P(f_c - f_i + \alpha/2). \quad (1)$$

ここで、 α は周波数シフトにより表れるピークの幅であり、経験的に 6[kHz] とした。

図 3 で示すように、 P_{ffloor} を基準とした時のシフト周波数 $f_c - f_i$ の信号レベルの高さ

$$\Delta P(f_c - f_i) = P(f_c - f_i) - P_{ffloor}, \quad (2)$$

が閾値 TH_P を超える場合に、 $f_c - f_i$ におけるピークを検出する。 $f_c - f_i$ のピークが検出された場合、backscatter タグ i に対応づけられた状況 c_i が発生しているものとする。ただし、実際には人やモノ、送信機、受信機の動きによって、ドップラーシフトが発生する可能性がある。このため、ドップラーシフトの許容幅 f_δ を導入し、 $[f_c - f_i - f_\delta, f_c - f_i + f_\delta]$ の範囲内に存在する高さ最大のピークを $\Delta P(f_c - f_i)$ とする。 $\Delta P(f_c - f_i)$ が TH_P を超える場合に、backscatter タ

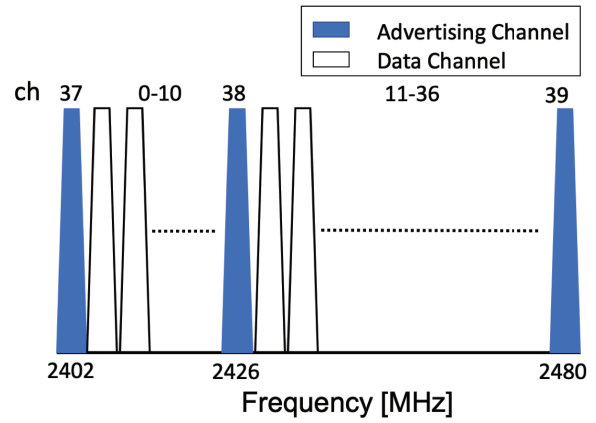


図 4 BLE のチャンネル割り当て

グ i に対応する状況 c_i を検出する。周波数シフトによるピークの高さは exciter, backscatter タグ, 受信機の位置関係に応じて変化する。 TH_P の決定に影響する要因については、5.2 節で述べる。

4.3 BLE による搬送波生成

多くの端末で利用可能な Wi-Fi や Bluetooth では、チャンネルごとに数 MHz から数十 MHz の帯域幅を割り当てている。例えば、IEEE 802.11ax では、転送レートに応じて 20MHz から 80MHz のチャンネル幅が定められている。BLE のチャンネル幅は 2MHz である。Backscatter タグによる散乱波の到達距離を伸ばすためには、exciter から発信される搬送波との干渉を避けることが望ましい。このためには、できるだけ狭い帯域幅で搬送波を送出することが必要となる。そこで、我々は Interscatter [9] で提案されている手法を利用し、BLE による擬似的な搬送波の生成を実現する。

図 4 に BLE のチャンネル割り当てを示す。BLE は 2.4GHz 帯に 40 個のチャンネルを持ち、チャンネル幅は 2MHz である。変調方式には GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying) を用いており、チャンネルの中心周波数から ±250kHz シフトした周波数がそれぞれビットの '1' と '0' に対応する。40 チャンネルの内、37, 38, 39 の 3 つのチャンネルはアドバタイジングチャンネルと呼ばれ、デバイス間の接続確立に使用される。接続確立後は、残りの 37 個のデータチャンネルを使用して、周波数ホッピングにより通信を行う。

以上の BLE の仕組みから、Interscatter [9] では、1 つのアドバタイジング・チャンネルで常に '0' または '1' を送り続けることで、擬似的に搬送波を生成している。これに基づき、我々は BLE による搬送波の生成を行った。実装には Texas Instruments 社の BLE 評価ボード LAUNCHXL-CC1352P-2 を利用した。図 5 にチャンネル 39 (中心周波数 2480MHz) で生成した搬送波のスペクトラムを示す。信号の出力強度は最大の 20dBm であり、'0' を送り続けることで負の方向に 250kHz シフトした周波数に搬送波を生成した。この結果より、通常の BLE 通信と比較して、狭帯域

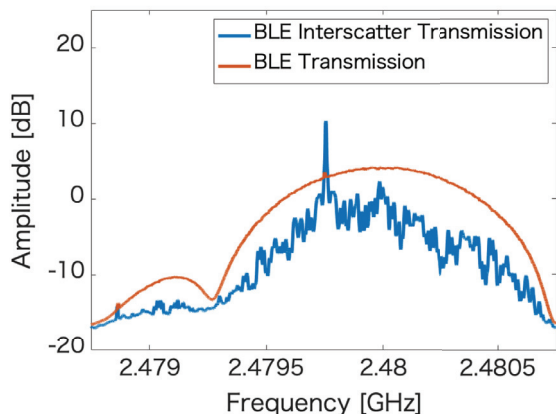


図 5 BLE Interscatter の例

かつ高いピークを持つ搬送波が生成できていることがわかる。また、ピークより高い周波数に強い信号強度が偏っていることが確認できる。これは、BLE チャンネルの中心周波数から負の方向にシフトした搬送波を生成しているためである。したがって、backscatter タグによる周波数シフトのピーク検出を行う場合は、正負の方向に 2 つのシフトが発生するが、BLE チャンネルの中心周波数からより遠い方の周波数シフトを観測することで、搬送波の影響をより低減することができる。

5. 性能評価

5.1 評価環境

Backscatter タグの性能を評価するため、シールドテントおよび実環境での実験を行った。シールドテントは高さ 2m で、幅 2m、奥行き 3m である。電波の観測には、ソフトウェア無線フロントエンド USRP B210 を使用した。BLE で生成した搬送波はスペクトラム上で中心周波数から片側約 350kHz の隆起が発生するため、タグによって発生させる周波数シフトは 350kHz 以上が望ましい。そのため、USRP のサンプリングレートは 1.2Mbytes に設定した。BLE にはパケットの送信インターバルが存在するため、FFT のウィンドウサイズはこの送信インターバルより十分に大きい 8192 に設定した。タグ、USRP、Exciter のアンテナは無指向性で、利得 2dBi のモノポールアンテナである。搬送波は、特に明示しない限り、BLE チャンネル 39 (中心周波数 2480MHz) を用いた。実験のため、発振器の代わりに、発振周波数を自由に設定できる Kuman 社の信号発生器 FY6600 を使用した。RF スイッチには Analog Devices 社の EVAL-ADG902EBZ を使用しており、バッテリーにはコイン電池 CR2032 を使用した。

5.2 検出距離と複数周波数シフトの検出

周波数シフトを観測可能な距離、ならびに複数の backscatter タグの存在を同時に区別できるかを調べるため、図 6 の

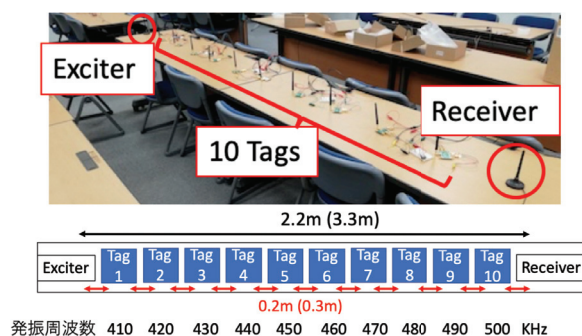


図 6 複数 backscatter タグの配置

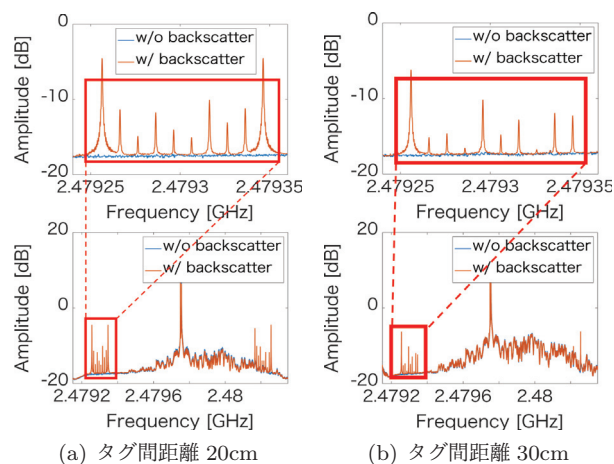
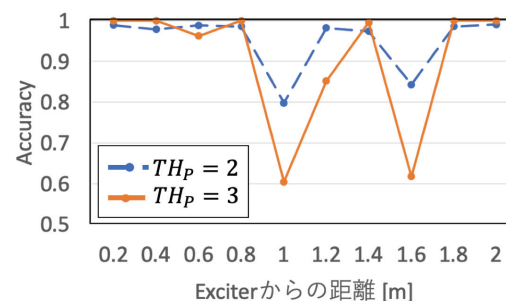
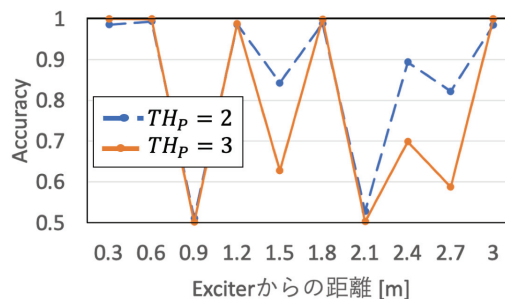


図 7 複数タグ設置時のスペクトラム



(a) タグ間距離 20cm



(b) タグ間距離 30cm

図 8 複数タグ設置時の距離と正解率

ように exciter と受信機の間 に 10 個のタグを設置し、実験を行った。backscatter タグと exciter、受信機の間隔を全て 20cm または全て 30cm の 2 通りで設置した。タグの発

振周波数は、最も exciter に近いタグを 410kHz とし、順に 10kHz ずつ増加させた。物理スイッチは常に ON の状態で、exciter から搬送波を送信し続けて、受信機で 10 秒間取得した信号に対し、パワースペクトラムの平均を計算した。図 7 より、設定したシフト周波数付近に複数のピークが見られることが分かる。図 8 は各距離に設置したタグに対するピーク検出の正解率を表している。正解率 (Accuracy) は以下の式で定義する。

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}. \quad (3)$$

TP と FN (FP と TN) はそれぞれ、Backscatter を継続的に発生させた (オフにした) ときに、シフト周波数における信号レベルがピーク検出の閾値 TH_P 以上のサンプルと閾値未満のサンプルである。また、シフト周波数における信号レベルの特性から、正解率が取りうる範囲は 0.5 から 1 の範囲となる。

図 8(a) はタグの間隔が 20cm の場合の結果である。exciter と受信機の距離は 2.2m である。受信機で観測される信号の品質は、exciter とタグ、およびタグと受信機の距離に依存するため、単に exciter から遠いほど正解率が低下するわけではない点に注意されたい。1m と 1.6m の地点で検出率の低下が見られる理由は、フェージングの影響を受けているためと考えられる。また、ピーク検出の閾値 TH_P は 3 よりも 2 に設定した方が高い正解率となっており、どの地点でも正解率 0.8 以上を達成している。一方、図 8(b) はタグの間隔が 30cm の場合の結果である。この場合の exciter と受信機の距離は 3.3m である。タグ間距離 20cm の場合と比べて、大きく正解率が低下する地点があることが分かる。特に、0.9m、2.1m では正解率が 0.5 となっており、周波数シフトが全く観測できていないことが分かる。これは、exciter と受信機の距離が離れていること、およびフェージングが原因と考えられる。

さらに詳細な分析をするため、図 8 において正解率の低い地点におけるピークレベルの累積度数分布を図 9、10 に示す。グラフ中の w/o backscatter は、タグによる周波数シフトが存在しない場合のノイズフロアのレベルを示す。一方、w/ backscatter はタグによる周波数シフトが存在する場合のピークのレベルを示す。w/o backscatter でのノイズフロアのレベルは、w/ backscatter で求められる $P(f_c - f_i)$ 、 P_{floor} と同じ周波数ポイントのレベルの差から求められる。w/o backscatter と w/ backscatter の CDF が離れているほど、ピーク検出性能が高いと言える。図 9、10 を比較すると、明らかにタグ間隔 30cm の場合はピーク検出性能が低く、0.9m の地点では周波数シフトが全く観測できないことが分かる。また、これらの結果より、 TH_P を高くすると偽陰性の割合が増加する一方、 TH_P を低くすると偽陽性の割合が増加することが分かる。

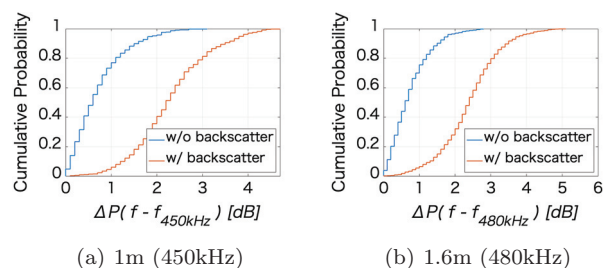


図 9 シフト周波数の信号レベルの累積度数分布 (20cm 間隔)

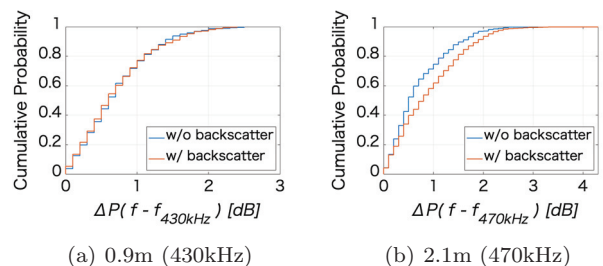


図 10 シフト周波数の信号レベルの累積度数分布 (30cm 間隔)

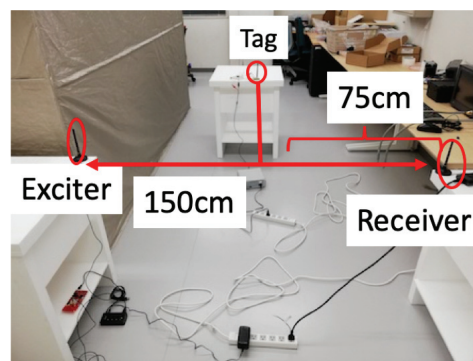


図 11 垂直方向検出実験の配置

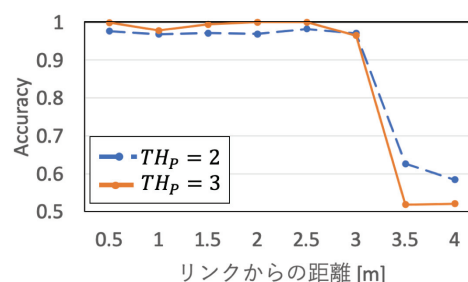


図 12 垂直方向実験の正解率

5.3 Exciter と受信機の位置関係の影響

exciter, 受信機, タグの配置による影響を調べるため、5.2 節とは異なる図 11 に示す配置で実験を行った。Exciter と受信機の距離を 1.5m に固定し、それらを結ぶ線分の中間地点から垂直な位置にタグを配置して、ピーク検出の正解率を調べた。図 12 の結果より、距離 3m 以下の場合、正解率は 0.9 以上となることが分かる。一方、3.5m 以上の位置にタグを設置した場合は、正解率が 0.5 程度まで低下している。これは距離の増加によって exciter からの搬送波とタグからの散乱波が減衰したためである。距離 3m の

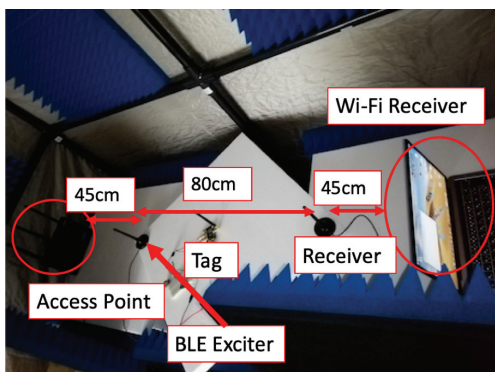
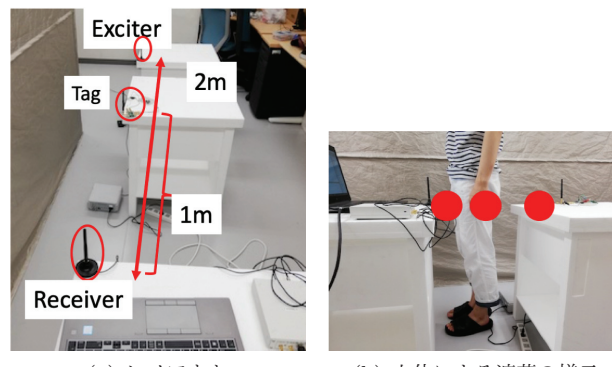


図 13 Wi-Fi 干渉実験レイアウト



(a) レイアウト (b) 人体による遮蔽の様子

図 16 人体遮蔽実験の環境

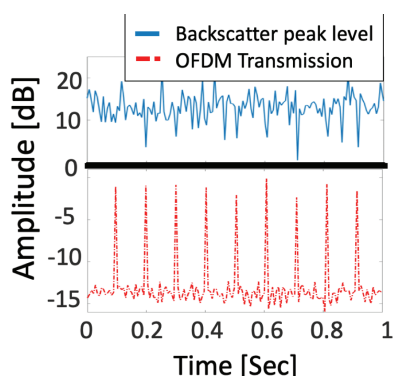


図 14 UDP 通信時の信号レベル変動

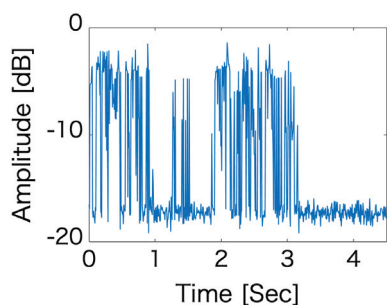


図 15 ストリーミング時の Wi-Fi 信号レベル (2425.3MHz)

時、タグと exciter/受信機の距離はどちらも約 3m であることから、backscatter タグによるピーク検出が高い精度で可能な範囲は、exciter, 受信機双方から 3m 以内の範囲であることが分かった。

5.4 Wi-Fi 通信による干渉の影響

Wi-Fi 通信が周波数シフトの性能に与える干渉の影響を調べるため、図 13 のように Wi-Fi 送受信機と backscatter タグの exciter, 受信機, タグを配置し、実験を行った。Backscatter タグにより発生するピーク周波数と重なるよう、Wi-Fi の通信チャンネルを 4 (中心周波数 2427MHz) に設定し、Wi-Fi 送信機から UDP パケットを送信し続けることで断続的なトラフィックを発生させた。exciter の搬送波は BLE のチャンネル 38 (中心周波数 2426MHz) に設定し

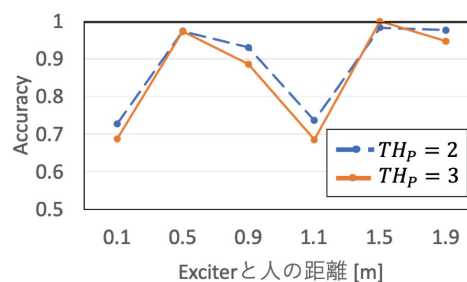


図 17 人体遮蔽が正解率に与える影響

ている。図 14 は、UDP 通信時の Wi-Fi チャンネル内周波数 (2425.3MHz) およびシフト周波数における信号レベルの変動を表している。Wi-Fi チャンネル内の周波数では、およそ 0.1 秒の間隔でパケット送信に伴うピークが発生していることがわかる。一方、パケット送信のタイミングにあわせて、シフト周波数におけるピークレベルが低下していることが分かる。このことから、同一周波数で Wi-Fi 通信などの干渉が存在する場合には、ピーク検出が困難であることが分かった。

ただし、多くの通信において、パケットの送信インターバル中は周波数シフトを観測することが可能である。図 15 に Youtube のライブ動画視聴時の Wi-Fi チャンネル内の周波数 (2411.7MHz) における信号レベルを示す。観測されたトラフィックには、送信期間とインターバルがバースト的に表れている。このことから、例えば数秒に一度周波数シフトを観測できれば良いようなアプリケーションでは、他のトラフィックが発生している状況でも backscatter タグを適用することが可能と考えられる。また、継続的な周波数シフトの監視が必要なアプリケーションにおいては、RTS/CTS の仕組みを利用して、一定期間 Wi-Fi 通信を行わないようにするといった方法も考えられる。

5.5 人体による遮蔽の影響

人体により exciter, backscatter タグ, 受信機間の見通しが遮られた場合の影響を調べるため、実験を行った。図 16(a) のように、exciter と受信機の距離を 2m で固定し、そ

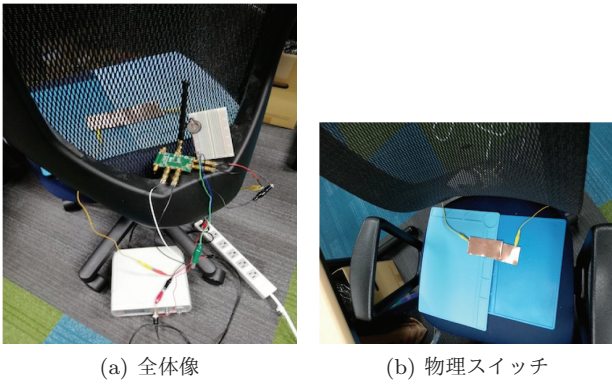


図 18 作成した着座センサ

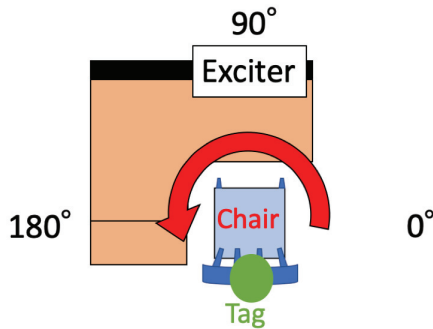


図 19 着座センサ実験レイアウト

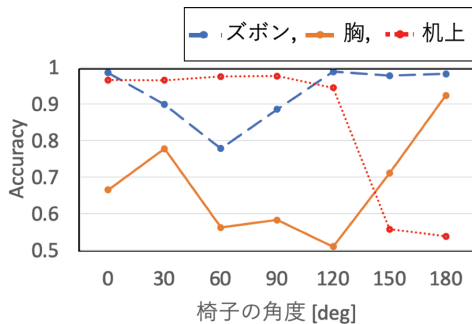


図 20 着座センサの検出正解率

の中間地点にタグを配置した。そのうえで、図 16(b) のように、受信機、タグ、exciter の間で人が立つ位置を変えて実験を行った。結果を図 17 に示す。0.1m および 1.1m に人がいる場合、正解率が 0.8 を下回っている。一方、他の 4 地点でも人体による見通しの遮蔽が存在するが、正解率はほぼ 0.9 を超えている。0.1m (1.1m) の地点は、他の地点と比べて、搬送波 (散乱波) が、タグ (受信機) 方向に発信された直後に、人体による遮蔽が起こる。一方、他の地点では見通しが遮蔽されたとしても、周囲の壁や机などの物体に反射して搬送波や散乱波がタグや受信機に到達する。このため、電波が発信されてから十分に拡散する前に遮蔽されると、大きな性能低下につながると考えられる。

6. 着座センサの実装と評価

コンセプトアプリケーションの一つとして、図 18(a) に示す着座センサを作成した。着座したときに、図 18(b) に示す物理スイッチがオンに切り替わり、周波数シフトが発生する仕組みである。

オフィスなどでの使用を考慮して、図 19 のように機器を配置した。タグは椅子の背もたれの部分に配置し、exciter はルータなどを想定した位置に設置している。タグと exciter の距離は 1.4m である。受信機はスマートフォンを想定し、左胸ポケット、ズボン右ポケット、机上 (180° 方向) の 3 つの配置で実験を行った。椅子に座っている人体の影響を評価するため、図 19 のように異なる向きに椅子を回転させて座り、0° から 180° の範囲で 30° 刻みでデータを取得した。

図 20 に評価結果を示す。受信機をズボンポケットに入れた場合は、全ての角度でおよそ 8 割の正解率となった。これは、ズボンの位置とタグの位置が近かったためであると考えられる。一方、受信機がシャツの胸ポケットにある場合は、180° の時を除き、8 割未満の正解率となった。これはタグと受信機の間には身体があり、散乱波が人体に遮られてしまったためだと考えられる。180° のときは、受信機、タグ、身体の関係によって、散乱波に対する遮蔽効果が小さかったため、正解率が 8 割を超えたと考えられる。受信機を机上に配置した場合、120° 以下では、9 割を超える正解率となったが、150°、180° のときは大きく正解率が低下した。これは、胸ポケットの場合と同様に、受信機とタグの間に身体があり、散乱波を遮ったためと考えられる。以上の結果から、散乱波は人体遮蔽に弱く、人体に遮られにくい位置にタグと受信機を配置することが重要であることが分かった。

7. まとめと今後の課題

本研究では、超低消費電力での状況認識を実現するため、周波数シフト型 backscatter タグの設計と評価を行った。従来の通信を目的とした backscatter とは異なり、提案手法では backscatter をセンサとしてそのまま利用し、状況認識を行う。性能評価の結果、exciter、受信機、タグがそれぞれ 3m 以内の見通し通信可能な範囲に存在すれば、タグによる状況認識が可能になったことが分かった。一方、Wi-Fi などの他の通信が発生している場合や人体による見通しの遮蔽が存在する場合には、状況認識が困難になることが確認された。今後は、実際に複数の backscatter タグを作成し、複数のアプリケーションを実現することで、状況認識において提案手法が有効な条件を明らかにする予定である。また、環境発電と組み合わせた backscatter タグを開発することも、今後の計画の一つである。

謝辞

本研究の一部は JST, さきがけ, JPMJPR1932 ならびに JSPS 科研費 19K11941, JP20K20398, JP19H05665 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Chesser, M., Jayatilaka, A., Visvanathan, R., Fumeaux, C., Sample, A. and Ranasinghe, D. C.: Super Low Resolution RF Powered Accelerometers for Alerting on Hospitalized Patient Bed Exits, *Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pp. 1–10 (2019).
- [2] Ohara, K., Maekawa, T. and Matsushita, Y.: Detecting State Changes of Indoor Everyday Objects Using Wi-Fi Channel State Information, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, No. 3 (online), DOI: 10.1145/3131898 (2017).
- [3] Mshali, H., Lemlouma, T., Moloney, M. and Magoni, D.: A Survey on Health Monitoring Systems for Health Smart Homes, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 66, pp. 26–56 (2018).
- [4] Khurana, R. and Singh Kushwaha, A. K.: A Deep Survey on Human Activity Recognition in Video Surveillance, *Proceedings of International Conference on Research in Intelligent and Computing in Engineering (RICE)*, pp. 1–5 (2018).
- [5] Benedek, C., Gálai, B., Nagy, B. and Jankó, Z.: Lidar-Based Gait Analysis and Activity Recognition in a 4D Surveillance System, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 28, No. 1, pp. 101–113 (2018).
- [6] Xu, C., Yang, L. and Zhang, P.: Practical Backscatter Communication Systems for Battery-Free Internet of Things: A Tutorial and Survey of Recent Research, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 35, No. 5, pp. 16–27 (2018).
- [7] Liu, V., Parks, A., Talla, V., Gollakota, S., Wetherall, D. and Smith, J. R.: Ambient Backscatter: Wireless Communication out of Thin Air, *SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 43, No. 4, pp. 39–50 (2013).
- [8] Talla, V., Hesar, M., Kellogg, B., Najafi, A., Smith, J. R. and Gollakota, S.: LoRa Backscatter: Enabling The Vision of Ubiquitous Connectivity, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, No. 3 (online), DOI: 10.1145/3130970 (2017).
- [9] Iyer, V., Talla, V., Kellogg, B., Gollakota, S. and Smith, J.: Inter-Technology Backscatter: Towards Internet Connectivity for Implanted Devices, *Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Conference*, ACM, p. 356–369 (online), DOI: 10.1145/2934872.2934894 (2016).
- [10] Kellogg, B., Parks, A., Gollakota, S., Smith, J. R. and Wetherall, D.: Wi-Fi Backscatter: Internet Connectivity for RF-Powered Devices, *SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 44, No. 4, p. 607–618 (online), DOI: 10.1145/2740070.2626319 (2014).
- [11] Bao, L. and Intille, S. S.: Activity recognition from user-annotated acceleration data, *Proceedings of the 2nd International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2004)*, pp. 1–17 (2004).
- [12] Sankaran, K., Zhu, M., Guo, X. F., Ananda, A. L., Chan, M. C. and Peh, L.-S.: Using mobile phone barometer for low-power transportation context detection, *Proceedings of the 12th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys '14)*, pp. 191–205 (2014).
- [13] Nakajima, Y., Murao, K., Terada, T. and Tsukamoto, M.: A method for energy saving on context-aware system by sampling control and data complement, *Proceedings of International Symposium on Wearable Computers (ISWC)*, pp. 1–4 (2010).
- [14] Khalifa, S., Hassan, M. and Seneviratne, A.: Pervasive self-powered human activity recognition without the accelerometer, *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pp. 79–86 (2015).
- [15] Wang, Y., Liu, J., Chen, Y., Gruteser, M., Yang, J. and Liu, H.: E-eyes: Device-free Location-oriented Activity Identification Using Fine-grained WiFi Signatures, *Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 617–628 (2014).
- [16] Wang, W., Liu, A. X., Shahzad, M., Ling, K. and Lu, S.: Understanding and Modeling of WiFi Signal Based Human Activity Recognition, *Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 65–76 (2015).
- [17] Varshney, A., Harms, O., Penichet, C.-P., Rohner, C., Hermans, F. and Voigt, T.: LoRea: A backscatter architecture that achieves a long communication range, *Proceedings of the 15th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys '17)* (2017).
- [18] Parks, A. N., Liu, A., Gollakota, S. and Smith, J. R.: Turbocharging ambient backscatter communication, *Proceedings of the ACM Conference on SIGCOMM*, pp. 619–630 (2014).
- [19] Kellogg, B., Talla, V., Gollakota, S. and Smith, J. R.: Passive Wi-Fi: Bringing Low Power to Wi-Fi Transmissions, *Proceedings of the 13th Usenix Conference on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'16)*, pp. 151–164 (2016).
- [20] Iyer, V., Chan, J. and Gollakota, S.: 3D Printing Wireless Connected Objects, *ACM Transactions on Graphics (TOG)* (2017).