

角度情報を用いた BLE 測位の高精度化に関する検討

山見 悠人 湯 素華

電気通信大学

1. はじめに

近年、様々なモノやセンサーは、省電力で扱える Bluetooth Low Energy (BLE) を利用して位置を推定することが一般的になってきている。また、BLE ビーコンが比較的安価であるため、スマートフォンやスマートウォッチ等のモバイル端末の普及によって、BLE を使用した位置情報が道案内ナビゲーション、屋内ロボット走行制御や倉庫の物流追跡など、様々な場面に幅広く活用されている。高精度測位の必要性が高まってきているが、受信信号強度 (RSSI) を用いた測位[1]はこれを満足できない。高精度測位に角度情報の併用は考えられるが、Bluetooth5.1 に標準化された信号の方位計測機能を利用した測位については、まだ細かく検討がされていない。

本研究では、角度情報利用の先行研究をベースに、角度情報の取得方法の最適化と高精度化を検討する。

2. 先行研究[2]

角度情報を利用するためには、BLE 受信機に複数のアンテナを搭載し、アンテナ間の位相差を求めなければならない。しかし、コストを抑えるために、BLE 受信機には複数のアンテナに対して受信モジュールが1つしかなく、複数のアンテナからの信号を同時に受信できない。また、従来の BLE 信号の電波はデータの伝達のために変調が使われており、信号の位相が常に変化する。これらの問題を解決するために、一定期間の無変調電波 (CTE : Constant Tone Extension) を通常の信号パケットの継続に追加し、アンテナを切り替えてそれぞれの位相を取得可能にした。

CTE パケットは図 1 に示すように各期間に分割されている。この Switch slot ではアンテナの切り替えが行われ、Sample slot ではそのアンテナを経由して受信した信号の位相情報 IQ サンプルを取得する。また、前記の複数のアンテナから得られた信号の位相差を利用して、図 2 のように信号の到着角度 Angle of Arrival (AoA) の測定が可能になった。受信機側のアンテナ間の距

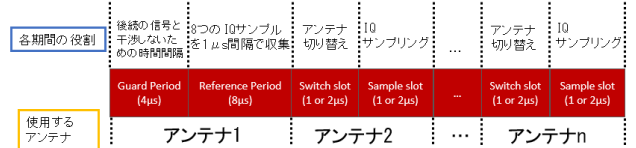


図 1 CTE パケット

離を d 、アンテナ切り替えの位相差を φ 、信号の波長を λ とすると、AoA は、

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\lambda\varphi}{2\pi d} \quad (1)$$

で表される。

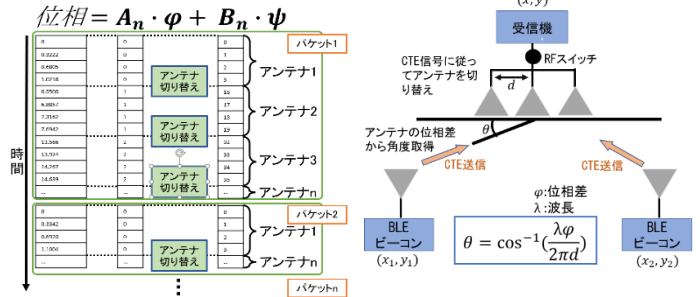


図 2 AoA の算出

これらの先行研究の手法において角度情報を取得するためには、この CTE の追加が必要不可欠である。しかし、問題点としてこの CTE の最適な長さ、測定時間やアンテナを切り替える際のサンプリング時刻差などが議論されておらず、これらのパラメータや位相差による角度の推定精度について調査が必要である。

3. 検討方式

測定をする際、実際にはアンテナ切り替え位相差の他に、サンプリング時刻差によるサンプリング位相差もあるため、直接(1)式から角度を求めることはできない。そこで、サンプリング位相差を ψ とし、一定間隔で取得される IQ データの位相を位相接続法によって予備処理し、

$$\text{位相} = A_n \cdot \varphi + B_n \cdot \psi \quad (2)$$

より位相毎に図 2 のような適切な A_n と B_n を設定することで、線形回帰より φ と ψ を求める。

パケットにおけるアンテナ切替周期数を a とし、測定に使用するパケット数を b とし、 $a \times b$ のアンテナ切替周期から、角度の平均値を算出する。

また、 a 、 b などのパラメータの変化による角度計測精度への影響を調べる。

3.1. 実験環境

Bluetooth の方位計測機能は比較的新しく、市販の BLE 機器にはまだほとんど実装されていない。そこで、本検討方式の実装機器として、図 3 のような Bluetooth 5.1 の方位計測機能を使用可能である TI 社製、1 つの 2.4GHz ダイポールアンテナを搭載する送受信機 LAUNCHXL-CC26X2R1 と、3 つの同様なアンテナを備えた 2 つのアンテナアレイがある BOOSTXL-AoA を利用する。LAUNCHXL-CC26X2R1 は BLE ビーコンとして使用し、LAUNCHXL-CC26X2R1 と BOOSTXL-AoA を組み合わせることで複数のアンテナを備えた受信機として利用する。測定環境は屋内でマルチパス波が発生する環境である。

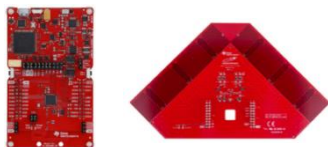


図 3 LAUNCHXL-CC26X2R1(左)BOOSTXL-AoA(右)

3.2. 実験と考察

測定条件として、CTE の長さを $160\mu s$ 、スロット時間を $2\mu s$ 、書き込み時間を 60 秒、アンテナ数 3 の場合を初期設定とする。この初期設定から上記の項目を変更して精度の比較を行う。

まず、CTE の時間の長さを変更した際、 a と書き込むデータ量が変わるため b も変化する。表 1 より CTE の長さが $80\mu s$ のときに一番データ量が多くなり、 $120\mu s$ のとき真の角度との誤差は一番小さくなるとわかる。 $80\mu s$ と $120\mu s$ のときでほとんど誤差に違いはなく、より短い時間で多くのデータを計測できるため CTE の長さが 80 のときが最適な条件だと思われる。

表 1 CTE の長さ と各データ量の関係

CTE 長 (μs)	a	b	$a \times b$	誤差 (度)
40	2	65	130	9.0
80	5	30	150	8.1
120	8	12	96	7.8
160	11	6	66	9.8

次に CTE の長さが $80\mu s$ の際の各スロットの長さを考える。スロットの長さは $1\mu s$ か $2\mu s$ に調節が可能であり、表 2 よりスロットの長さが短いほどデータ量が多くなるため、誤差も低くなることがわかる。よってスロットの長さは $1\mu s$ のときが最適だと考えられる。

表 2 スロットの長さ と各データ量の関係

スロット (μs)	a	b	$a \times b$	誤差 (度)
1	11	25	275	6.3
2	5	30	150	8.1

次にアンテナ数について、表 3 からアンテナ数が 2 つの場合データ量が多くなる一方、誤差は高まっている。これはアンテナ数が少ないため、一周期での信号の位相差の誤差が多くなるからだと考えられる。

表 3 アンテナ数 と各データ量の関係

アンテナ数	a	b	$a \times b$	誤差 (度)
2	18	25	450	7.1
3	11	25	275	6.3

最後に、測定条件を CTE の長さが $80\mu s$ 、スロットの長さを $1\mu s$ 、アンテナ数を 3 とし、書き込み時間を変えることで精度の比較を検討する。

表 4 書き込み時間 と各データ量の関係

書き込み時間 (s)	a	b	$a \times b$	誤差 (度)
20	11	8	88	10.3
60	11	25	275	6.3
120	11	60	660	5.7

表 4 より、時間が長いほどパケット数が多くなり精度が良くなることがわかる。しかし、実際には長い時間静止している状態は考えられず、また IQ データの書き込み制限を無くした場合、1 パケット毎に約 0.8ms 程度の時間に短縮できるため、書き込み時間は 120 秒でも 60 パケットの合計送信時間が約 48ms 程度で、十分に短いと考えられる。以上から最適な選択では誤差を 5.7 度に抑えることができた。

4. おわりに

本稿では、屋内測位の精度を改善するために利用される角度情報について、省電力通信である BLE を使用し、その取得の際に用いられるパラメータの選択手法を検討した。

今後、更なる最適化のために、様々な条件での測定を行う。

参考文献

- [1] N. Nakajima, et al., "Improving precision of BLE-based indoor positioning by using multiple wearable devices," in *MUSICAL 2016*.
- [2] M. Won, et al. "An Experimental Study on Direction Finding of Bluetooth5.1: Indoor vs Outdoor," *arXiv:2103.04121*, March 2021.