

## ドップラー環境下における LTE ランダムアクセス検知アルゴリズムの検討

嘉納 健<sup>†</sup> 和田 知久<sup>‡</sup>

琉球大学大学院理工学研究科 〒903-0213 沖縄県西原町字千原 1 番地

E-mail: <sup>†</sup> kano@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp, <sup>‡</sup> wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

あらまし 移動体通信として第3世代と第4世代間の移行をスムーズに行うために、第3.9世代であるLTE (Long Term Evolution) が急速に普及しつつある。本稿ではLTE 端末と基地局間の通信を確立するために最初に行われる動作であるランダムアクセスに着目した。基地局は端末から送信される既知信号の相関を取ることで端末の検知を行うが、ドップラー環境下では性能が低下してしまう。ドップラー環境下で発生するサイドピークを合成することによって、端末検知能力の向上を計算機シミュレーションにより確認した。

キーワード LTE, 第3.9世代携帯電話, ランダムアクセス, PRACH, ドップラー, レイリーフェージング

## Detection Algorithm for LTE Random Access in Doppler Environment

Takeshi KANO<sup>†</sup> and Tomohisa WADA<sup>‡</sup>

Department of Information Engineering, University of the Ryukyus 1-2-3 Sembaru 1, Nishihara, Okinawa,

903-0213 Japan

E-mail: <sup>†</sup> kano@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp, <sup>‡</sup> wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

**Abstract** LTE (Long Term Evolution) was became widespread for 3rd Generation to 4th Generation changing smoothly. This paper was focused on Random Access which is LTE mobile phone connect base station at first action. Base station was detected LTE mobile phone from terminal sending known-signal correlation. Although, performance degradation was happen in Doppler environment. LTE mobile phone detection performance was became improvement from side-peak combine method.

**Keyword** LTE, 3.9th Generation mobile phone, Random Access, PRACH, Doppler, Rayleigh fading

### 1. はじめに

第3.9世代携帯電話用通信規格である Long Term Evolution (LTE) は標準化団体である 3GPP にて規格化された。[1] LTE では端末の電源を入れた時や別のセルへ移動した時など、ランダムアクセスという手順を用いて基地局と端末間の通信を確立する。

端末はセルサーチによってすでに下りリンクとの同期を終えている状態から行われ、ランダムアクセス手順は以下の4つのStepからなる。[2]

#### Step1. ランダムアクセスプリアンブル送信

下りリンクとの同期は終わっているが、上りリンクの同期はまだ取れていない。ランダムアクセス試行を行う端末があることを基地局に知らせ、基地局に端末間との遅延推定を行わせる。

#### Step2. ランダムアクセス応答

基地局はタイミング補正情報を端末に送信し、上りリンクの同期を取る。その他、周波数利用帯域の指定なども行う。

#### Step3. 端末識別子送信

端末は自身の識別情報を送る。

#### Step4. アクセス競合解決メッセージ送信

Step1 で複数の端末が同じプリアンブルを送信すると Step2 によって各端末は同じ情報を受け取る。Step3 により端末固有の識別子を送るので、競合が起きた場合このステップで解決する。

ランダムアクセスプリアンブルを送信可能なタイミングと周波数領域は基地局によって決められており、Physical random access channel (PRACH) と呼ばれる。

図1に Step1. のブロック図を示す。

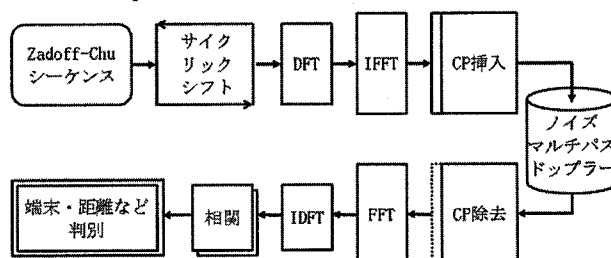


図1. ランダムアクセスのブロック図

本稿では相関を取ったあとに CPU 処理することにより端末の検知率を向上させる。

次に、図2はランダムアクセスプリアンプのフレーム図である。[3]

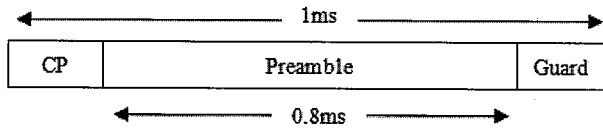


図2. ランダムアクセスプリアンプのフレーム図

フレーム長は1msでプリアンプとそのサイクリックプレフィックス, ガードタイムによってできている。

### 1.1. Zadoff-Chu シーケンス

端末が基地局へ送信するプリアンプには, Zadoff-Chu シーケンス (ZC シーケンス) と呼ばれるシーケンスが用いられ, 式(1)で表される。

$$x_u(n) = e^{-j \frac{\pi n(n+1)}{N_{ZC}}}, 0 \leq n \leq N_{ZC} - 1 \quad (1)$$

ここで  $n$  はシンボル番号,  $u$  はシーケンス番号,  $N_{ZC}$  はシーケンス長である。

$u, N_{ZC}$  は基地局によって決められており,  $N_{ZC}=839$  のとき,  $u$  は1~838の値をもちそれぞれ異なるシーケンスが生成される。

ZC シーケンスはノイズやドップラー周波数誤差が無いとき, 式(2)と図3に示すような完全な自己相関特性を示す。

$$|R_u(l,0)| = \begin{cases} 1 & l=0 \\ 0 & l=1, \dots, N_{ZC} - 1 \end{cases} \quad (2)$$

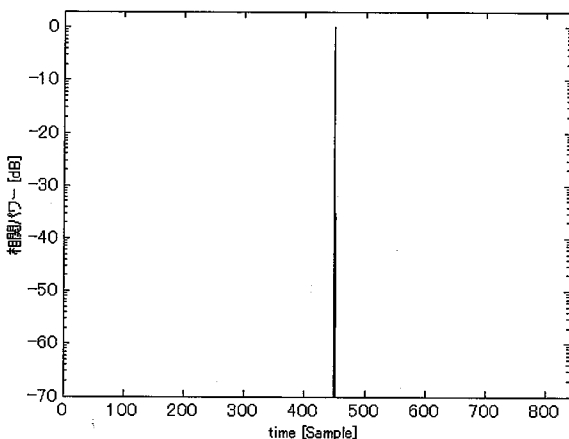


図3. ZC シーケンスの自己相関結果

基地局は端末により送信された ZC シーケンスと基地局側で生成した ZC シーケンスの相関を取ることで,

ランダムアクセスを試みている端末があるか判定し, どの程度の遅延があるのを推定する。

### 1.2. サイクリックシフト

各々の  $u$  から生成される一つのシーケンスはサイクリックシフト値  $C_v$  によって最大 64 の端末を同時に検知できる。式(3), 式(4)にサイクリックシフトの式を示す。

$$x_{u,v}(n) = x_u((n + C_v) \bmod N_{ZC}) \quad (3)$$

ここで,

$$C_v = \begin{cases} vN_{CS} & v=0,1,\dots, \lfloor N_{ZC}/N_{CS} \rfloor - 1, N_{CS} \neq 0 \\ 0 & N_{CS} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

である。

サイクリックシフト値によって出現するピーク位置が異なり, 複数の端末が送信するランダムアクセスを検知できる。

例として  $N_{ZC}=839, N_{CS}=119$  の時, 端末が決定する  $v$  の値は式(4)より 0~6 までの値となる。端末を同時に検出できる数である最大端末多重数は7台である。

図4は2台の端末が  $v=2$  と  $v=6$  で同時に送信したときの相関結果である。 $v$  で分けられた各区分は各々の端末の遅延プロファイルに相当する。 $v=2$  の端末はピークが2つ検出され, 遅延波があると推定される。

ZC シーケンスの相関結果はインデックスの初めと終わりにつながっており, サイクリックしている。

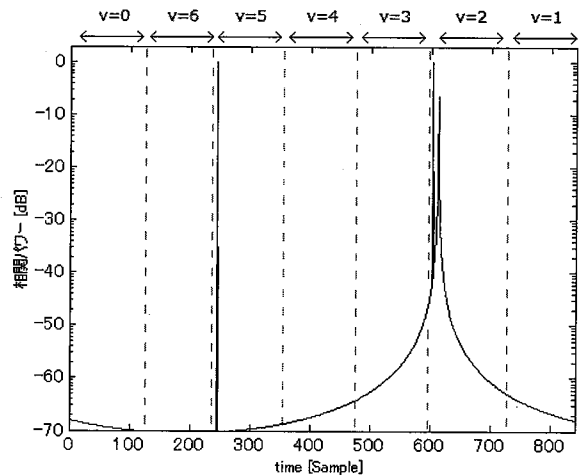


図4. サイクリックシフトによる複数端末の検出

### 1.3. ドップラーシフト

端末が高速に移動している等ドップラー周波数誤差  $fd$  がある場合, 受信 ZC シーケンス  $y(l,fd)$  と基地局側で生成した ZC シーケンス  $x(l)$  との相関結果は式(5)となる。[4]

$$\begin{aligned}
|R_u(l, fd)| &= |y(l, fd) * x(l)| \\
&= \frac{1}{N_{ZC}} \left| \sum_{n=0}^{N_{ZC}-1} \{y(n) \cdot x(l+n)^*\} \right| \\
&= \frac{1}{N_{ZC}} \left| \sum_{n=0}^{N_{ZC}-1} \left\{ e^{\frac{-j2\pi n}{N_{ZC}(fdT)}} \cdot e^{-j\frac{\pi n(n+1)}{N_{ZC}}} \cdot e^{j\frac{\pi n(l+n)(l+n+1)}{N_{ZC}}} \right\} \right| \\
&= \frac{1}{N_{ZC}} \left| \sum_{n=0}^{N_{ZC}-1} \left\{ e^{\frac{-j2\pi n}{N_{ZC}(fdT)}} \cdot e^{-j\pi n(n^2+n-l^2-2nl-l-n^2-n)} \right\} \right| \\
&= \frac{1}{N_{ZC}} \left| \sum_{n=0}^{N_{ZC}-1} \left\{ e^{\frac{-j2\pi n}{N_{ZC}(fdT)}} \cdot e^{-j\pi n(-l^2-2nl-l)} \right\} \right| \\
&= \frac{1}{N_{ZC}} \left| \sum_{n=0}^{N_{ZC}-1} \left\{ e^{\frac{-j2\pi n}{N_{ZC}(fdT)}} \cdot e^{j\pi n(l^2+l)} \right\} \right| \\
&= \frac{1}{N_{ZC}} \left| \sum_{n=0}^{N_{ZC}-1} \left\{ e^{\frac{-j2\pi n}{N_{ZC}(fdT-ul)}} \right\} \right| \tag{5}
\end{aligned}$$

ドップラーシフトが起こった場合の相関結果は図 5 に示すように本来のピーク以外にサイドピークが出現する。図は端末台数 1 台,  $u=5$ ,  $fd=400\text{Hz}$  の時の相関結果である。

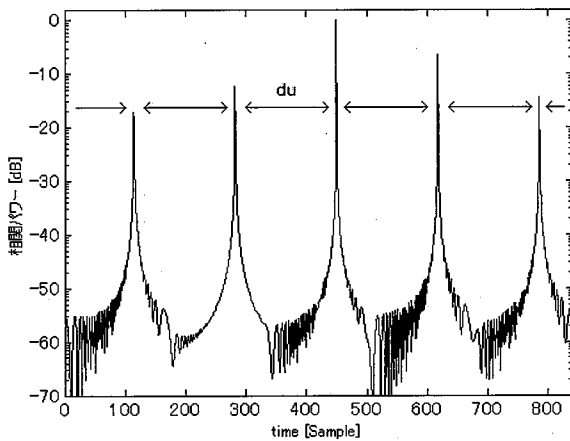


図 5. ドップラー周波数誤差 400Hz 時の相関結果

本来のピーク位置は図 3 と同様, 中央付近 1 本となるはずが, ドップラー周波数誤差によりサイドピークが発生する。サイドピーク出現間隔  $du$  はシーケンス番号  $u$  などの値に決まっており, 式(6)で表される。[5]

$$u \times du \bmod N_{ZC} = \pm 1 \tag{6}$$

ドップラー周波数誤差の強さはサイドピークの高さと比例するが, サイドピーク位置にはまったく関係なく,  $u$  の値のみによって決まる。

図 4 と図 5 を見比べるとわかるが, あるしきい値以上の相関ピークを端末からのランダムアクセスと判断するとき, 複数端末からのランダムアクセスと, ドップラーシフトにより発生したサイドピークとの区別がつかない。つまりサイドピークを他端末のランダムアクセスと勘違いしてしまう可能性がある。

これにより, 基地局の応答による周波数利用効率の低下や消費電力・処理量の増加, 端末の通信確立の遅れにつながってしまう。

本稿ではドップラー環境下において発生するサイドピークを本来のピークと合成することによって, 端末検知率の向上を行った。

## 2. 提案手法

以下の 2 ステップを行う。

1. 相関結果並び替え, サイドピークを集める
2. フィルタを通し, 本来のピークを取り出す

### 2.1. Cyclic Interval Sort

$u$  の値によってサイドピークが発生する間隔は決まっているので, その間隔ごとに相関結果の並び替えを行う。相関結果はインデックスの初めと終わりにつながっており, サイクリックしているので, 右端まで, インデックスをとったら, 先頭へ戻ってくる。

相関結果をソートした結果  $CIS$  は式(7)となる。

$$CIS(n) = R_u(du \times n \bmod N_{ZC}), 0 \leq n \leq N_{ZC} - 1 \tag{7}$$

また, この操作を図示すると図 6 となる。

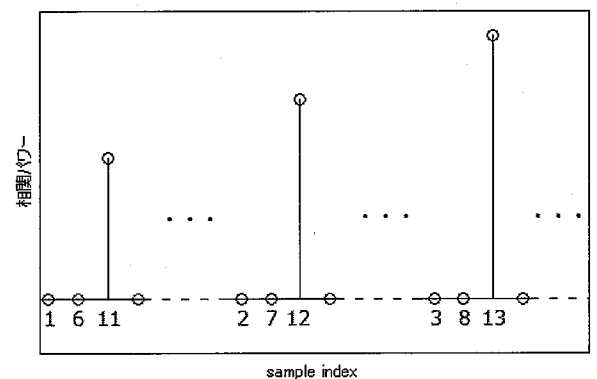


図 6. Cyclic Interval Sort の図解

$du$  区間ごとに並び替えることでピークを順に取っていることと同様になる。サイドピークと本来のピークを集めた形となる。

この手法により図 5 をソートした結果を図 7 に示す。この時,  $x$  軸が時間を表さないことに注意する。ソートによりピークが一つになっているように見える。

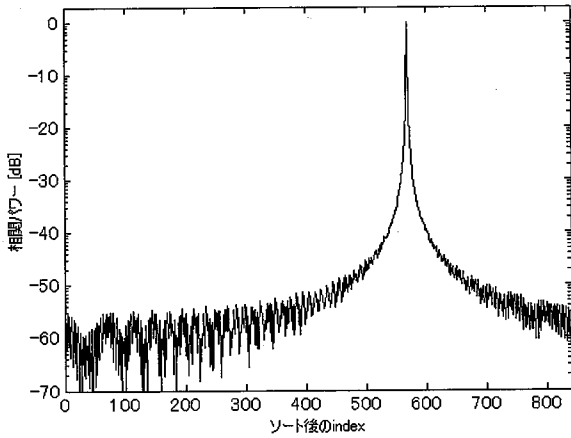


図 7. 相関結果をソートした図

## 2.2. Emphasis Filter

ソートによってサイドピークが消えピークが一つになったように見えるが、広がっていたピークを集めただけなので、実際には高いパワーのピーク束を検出してしまふ。よって、ピーク強調フィルタを適用し、広がっているピークを一本化する。

フィルタの手法は様々あるが、今回はドップラー周波数誤差 400Hz 時のピーク・サイドピークの値を参考にし、その逆行列を作ることによってフィルタ  $EF$  を生成した。式(8)にフィルタの一例を示す。

$$EF = \begin{bmatrix} -0.07 & -0.2 & 1.1 & -0.2 & -0.07 \end{bmatrix} \quad (8)$$

ソートを行った結果とフィルタの畳み込みを行うことにより、式(9)の  $R_p$  を得る。図 8 に結果を示す。

$$R_p(n) = CIS(n) * EF, 0 \leq n \leq N_{zc} - 1 \quad (9)$$

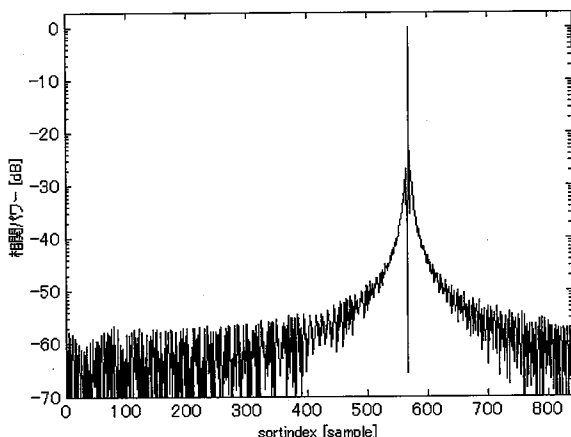


図 8. ソート後にフィルタを通した図

## 2.3. ソート後の $v$ 値推定

ソートを行うと  $v$  の順番通りにピークがでない。

$v$  の値を求めるために式(9), 式(10)の計算を行う。

$$estPeakIndex = du \times SortPeakIndex \bmod N_{zc} \quad (9)$$

$$estv = \lceil (N_{zc} - estPeakIndex) \rceil / N_{cs} \quad (10)$$

## 3. シミュレーション

計算機シミュレーションにより検知率の性能を評価する。検知率は、端末が選択した  $v$  値を正しく検知できたら成功、選択していない  $v$  値を検知したら失敗とする。例えば端末が選択した  $v$  値が 1 つ見つかり、サイドピークによって本来送信されていない  $v$  値をさらに 4 つ検知してしまった場合の検知率は 0.2 となる。

表 1 にシミュレーション諸元を表 2 に各シミュレーションで用いるチャンネルの状態を載せる。

表 1. シミュレーション諸元

	CNR vs 検知率	ドップラー vs 検知率	レイリー vs 検知率
プリアンブル フォーマット	0		
u	5		
Nzc	839		
Ncs	13		
最大端末多重数	64		
端末台数	1 台	2 台	
CNR	-10 ~ -25dB	10dB	
v	ランダム(0~63)		
fd	0Hz,300Hz	0~700Hz	
利用周波数帯域	2.5GHz 帯		

表 2. チャンネルの状態

	CNR vs 検知率	ドップラー vs 検知率	レイリー vs 検知率
端末 1 チャンネル 主波パワー	1 波静的 0dB	1 波ドップラ 0dB	1 波レイリー 0dB
端末 2 チャンネル 主波パワー 遅延波パワー 遅延時間	端末なし	2 波ドップラ 0dB -6dB 5.5 $\mu$ s	2 波レイリー 0dB -6dB 5.5 $\mu$ s

## 3.1. CNR シミュレーション

図 9 はノイズの方がプリアンブル信号より 10dB ~ 25dB 高い時の検知率を示す。ランダムアクセスは元々 CNR がかなり悪い場所でも信号をキャッチできる。提案手法により周波数誤差なしの場合 CNR=-18dB 付近で最大 50% の検知率が向上している。フィルタにより

周波数誤差がない時も検知率が改善している。

300Hz の周波数誤差がある場合 CNR=-16dB 付近で最大 40%ほど検知率が向上している。

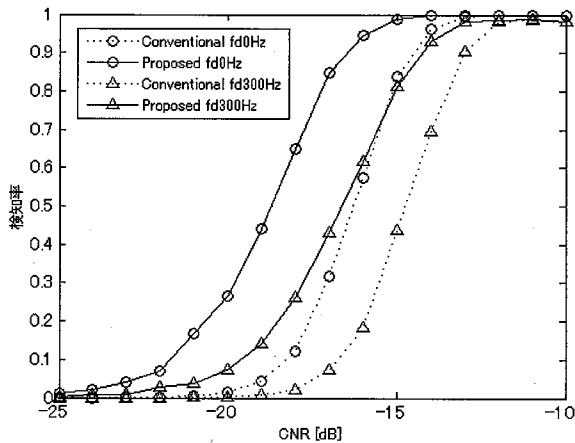


図 9. CNR vs. 検知率

### 3.2. ドップラー周波数誤差シミュレーション

図 10 はドップラー周波数誤差 0~700Hz の時の検知率を示す。ちなみに周波数誤差 700Hz は周波数帯域 2.5GHz 帯で時速約 300km で移動したときに起こる。

周波数誤差が 0Hz の時も検知率が 1 よりわずかに低いのは、2 台の端末が同じ  $\nu$  値を選択した時、検知失敗となるからである。従来手法で周波数誤差 300Hz を超すと急激に検知率が落ちているのは、周波数誤差が上がるにつれて大きくなるサイドピークを検知してしまったためである。

また、周波数誤差 625Hz を超えると提案手法が従来手法の性能を下回っている。これは、625Hz で本来のピークよりサイドピークのほうが大きくなってしまったためである。よってピークを強調する提案手法ではより早く検知率が低下してしまう。しかしそれまでは提案手法が同等かそれ以上の検知率を得ている。

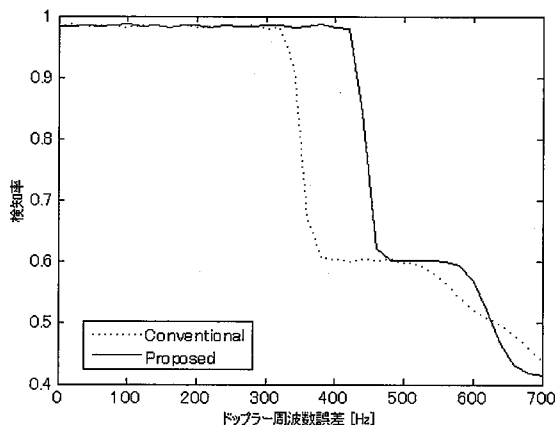


図 10. ドップラー周波数誤差 vs. 検知率

### 3.3. レイリーフェージングシミュレーション

図 11 はレイリーフェージング環境時最大ドップラー周波数誤差 0~700Hz の検知率を示す。

レイリーフェージング環境では、主波や遅延波の強さが時間ごとに変わり、ドップラー周波数誤差も最大値は決まっているが一定ではなく変動する。

どの周波数誤差でも提案手法の方が良い検知率をだしている。500Hz 付近で最大 20%の検知率向上がみられる。

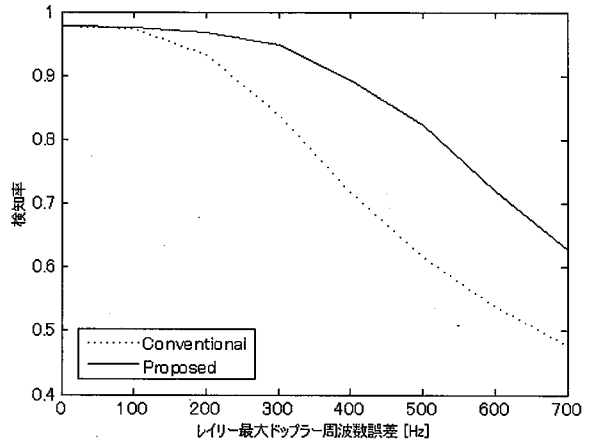


図 11. レイリードップラー vs. 検知率

### 4. まとめ

本稿では、LTE のランダムアクセスに着目し、提案手法との性能比較を行った。提案した Cyclic Interval Sort と Emphasis Filter により、ドップラー環境下におけるサイドピークを合成し検知率を向上させることに成功した。

今回は 625Hz よりさらに強いドップラー周波数誤差の時、検知率が従来手法より下がっているの、サイドピークの方が大きくなる現象を改善したい。

### 文 献

- [1] 3GPP  
<http://www.3gpp.org/>
- [2] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld, Per Beming, “3G Evolution のすべて LTE モバイルブロード方式技術”, pp.463-488
- [3] 3GPP TS 36.211 “Physical channels and modulation”, p.31
- [4] 村瀬太一, “プリアンブル信号検出装置及び検出方法”
- [5] Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker, “LTE, The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice” p.442