

次世代移動通信システムにおける鉄道のサービスエリアに関する研究

Research on railroad service area in the next generation mobile communication system

徐晨涛¹⁾

指導教員 前山利幸¹⁾

1) 拓殖大学 大学院工学研究科 機械・電子システム工学専攻 前山研究室

キーワード：ドップラーシフト, 高速列車, 周波数

1. はじめに

第 6 世代移動通信システムでは、これまでのセルラーシステムでは利用されていないミリ波やテラヘルツ波の利用について検討が進んでおり、この周波数帯特有の電波の直進性や伝搬損失が大きな課題となっている。さらにリニア新幹線が実用化されるとこれまでの新幹線と異なり移動速度が劇的に向上し、高速列車地上通信は、大きなドップラーシフト、地域をまたぐ頻繁なスイッチング、高い伝送リアルタイム要件、多様なサービスを伝送する必要性などの技術的問題に直面している。^[1]

2. 時速 500km で移動する高速列車のドップラーシフトについて

2.1 ドップラーシフト とは

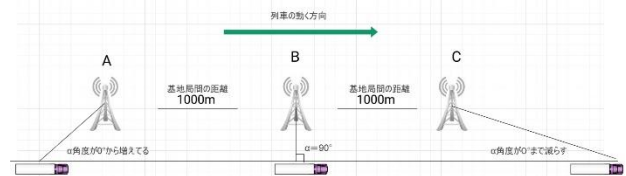
ドップラーシフトとは、携帯端末と基地局の相対的な移動によって、受信信号の周波数が変化する現象のこと。例えば、車で移動しているときや歩いているとき、携帯端末と基地局との距離は常に変化しているため、受信信号の周波数が変化する、この変化がドップラーシフトです。OFDM システムでは、ドップラーシフトによって異なるサブキャリア間で周波数が変動し、システムの性能に影響を与えます。^[2]

2.1.1 基地局と運行中の高速鉄道の位置関係

α は、電磁波の入射方向と列車の運行方向がなす角度を表す。

① 角度 α は、列車が地上基地局に近づくと 0 から大きくなる。

- ② 列車が地上基地局に近づいたときの角度 $\alpha = 90$
- ③ 列車が地上基地局から遠ざかるにつれて、角度 α は小さくなり始め、最終的には 0 と見なすことができる。



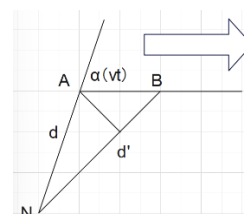
地上基地局が 1000m 離れていて、列車が時速 500km で走っていると仮定すると、ドップラー周波数偏差の計算式によれば、列車が地上基地局から遠く離れているとき、このときのドップラー周波数偏差は最大値になる：

$C = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 実験通信には Ka 帯を選択

$$F_d = \frac{v \times f_c}{c} \times \cos \alpha = \frac{1000 \text{km/h} \times 38 \text{GHz}}{3 \times 10^8 \text{m/s}} \cos \alpha = 35.2 \text{kHz}$$

2.1.2 信号のドップラーシフトは信号源と観測者の運動を区別

観測者の参照系では、信号源 N は距離 (vt) ($vt \rightarrow 0$) だけ移動して B に到達し、その時点で E に対する B 位置ベクトル \mathbf{d}' は 0 となる。



この信号の最初の部分が E に達する瞬間： $t_1 = \frac{d}{c}$

この信号の最後の部分が E に到達する瞬間：

$$t_2 = t + \frac{d'}{c}$$

ベクトル r と r' の間の角度は非常に小さいので：

$$t_2 = \frac{d+vt\cos\alpha}{c}$$

観測者 E がこの信号を受信するまでの時間：

$$T = t_2 - t_1 = t \frac{c + v\cos\alpha}{c}$$

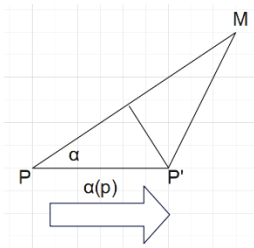
観測者が受信した信号の周波数：

$$f = \frac{1}{T} = \frac{c}{c + v\cos\alpha} \frac{1}{t} = f_0 \frac{\sqrt{c^2 - v^2}}{c + v\cos\alpha}$$

まとめると、信号と速度 v で相対運動する観測者が

受信する波の周波数は： $f = f_0 \frac{\sqrt{c^2 - v^2}}{c + v\cos\alpha}$

観測者と一直線上に移動していない信号源のドップラーシフト：



1. $a_M = 0, a_P \neq 0$ でのドップラーシフト

信号源 M は静止しており、観測者は図のように静止状態から加速度 a_R で移動する。時刻 0 に信号源 S から放射された最初の信号は、時刻 $\frac{PM}{v_0}$ に R_1 の観測者によって受信される。時刻 Δt_1 で信号源 S が放出した最後の波は、 R_2 の観測者によって受信され、これは $\Delta t_1 + \frac{P'M}{v_0}$ である。

観測者がすべての信号を受信するのにかかった時間

$$\text{は：} \Delta t_2 = \Delta t_1 + \frac{P'M}{v_0} - \frac{PM}{v_0}$$

$PM > P'P'$, すなわち ”高周波 ” の条件下で：

$$|P'M - PM| \approx P'P' \cos\alpha$$

図の場合と同様に、 R_1 における $\Delta t_2 = \Delta t_1 - \frac{P'P' \cos\alpha}{v_0}$ 観

測者の速度は $a_R \Delta t_1$ であり、 Δt_2 時間後の変位は

$$P'P' = a_R \Delta t_1 \Delta t_2 + \frac{1}{2} a_P \Delta t_2^2 \text{ である。}$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 - \frac{a_P \Delta t_1 \Delta t_2 + \frac{1}{2} a_P \Delta t_2^2}{v_0} \cos\alpha$$

3. 評価方法

観測者が受信した周波数と音源の周波数の関係は、信号源と観測者の相対位置の変化を分析することによって決定される。

4. 評価結果

信号源は動かず、観測者は一様に加速された直線運動をする。両者は一直線上になく、観測者が受信する周波数と波の周波数が一致する。観測者が受信する周波数と波源の周波数の関係は、式中の α は観測者の運動の方向と観測者と信号源の方向である。

5. まとめ

今後の課題では、既存システムにおけるエリア構築方法について調査を進め、既存システムの課題を検討する。特に、リニア新幹線では 500km/h を超える速度で移動することを考えたエリア構築方法について検討するが、まずは既存の手法により実現した場合を仮定しそのときに生じるドップラーシフトの問題をシミュレーションにより明らかとする。リニア新幹線におけるドップラーシフトの発生を抑圧したエリア構築方法についてさらなる研究を深める。電波伝搬の観点の議論に加え、複数基地局連携による超高速ハンドオーバーの方法など通信制御の点からも改善方法についての研究を進める。

参考文献

[1] Donghang Li. Research on Optimization Technology of High-speed Railway Wireless Communication Handoff Based on Machine Learning, 2020, 10;27-30.
 [2] 周梓博, 于行健, 蒋海林, 赵红礼, 彭良勇. 高速磁悬浮列车车地无线通信技术的探讨. 太赫兹科学与电子信息学报. 2022 : 20-8