電波空間フィルタによる電波空間パターンの 低域成分の除去と速さ計測[†]

小 林 一 行^{*}・小 森 敦^{*}・渡 辺 嘉二郎^{*}

Filtering of Spatial Low Frequency Components in the Pattern of Radio Wave Intensity and Speed Measurements by a Radio Wave Spatial Filter

Kazuyuki KOBAYASHI^{*}, Atsushi KOMORI^{*} and Kajiro WATANABE^{*}

This paper describes a new type of radio wave spatial filtering to measure the absolute speed of vehicles. The electric field intensity of radio waves generated and propagated from a broadcasting station demonstrate stochastically periodic and non-Gaussian spatial patterns due to the multi-pass fading phenomenon. We detect the patterns and apply the spatial filtering technique to the patterns to measure the absolute speed. Here we investigated the optimal conditions of the filtering via the study on the stochastic property of the patterns. We developed the optimal filtering system. Experiment carried out by the filter on real roads by real automobile demonstrated the validity of the proposed radio wave spatial filtering.

Key Words: spatial filter, radio wave, radio speedometer, optimal spatial filter

1. はじめに

放送局から発信され伝搬してきた電波は、大きな建造物、丘陵、谷などで反射し、陸橋などで回折しながら様々な経路を通して受信アンテナに到る。これらの電波は空間の各所で干渉を起し、空間には電波の電界強度の強弱のパターンを作る。このような現象はマルチパスフェージングと呼ばれ^{1),2)}、移動通信では雑音の原因になっている^{1),2)}。

電波の電界強度パターンは、巨大な建造物、地理的な形状により定まり、空間に安定に定在する。この電界強度パターンが絶対速さ計測の空間尺度となり得るか否かについての基礎的な研究と実環境での調査が筆者らによって行われてきている^{3),4)}。基礎研究により³⁾、

- (1) 電界強度パターンの空間相関関数は電波の波長の半波長を周期とする第0次のベッセル関数で近

似できる。

- (2) 電界強度パターンは少なくとも30分程度はほとんど変化しない。
 - (3) 小反射体の影響はほとんど受けない。
- が明らかにされた。実環境での調査⁴⁾により、
- (4) 様々な道路で電界強度パターンは速さ計測の空間パターンとして十分耐え得るものである。
 - (5) 電界強度パターンの一般道路で考えられる反射体の影響は速さ計測上問題にならない。
- が明らかにされ、相関法により速さが計算され、その再現性や線形性が確認されてきている。

本論では、この電界強度の空間パターンに空間フィルタ理論を適用した電波空間フィルタを提案し、空間フィルタ出力の波形から速さに比例する周波数のカウントミスを少なくするためのフィルタ条件を明らかにする。この条件のもとで実験を行い、電波空間フィルタの有効性を確認する。

2. 計測システムと問題の記述

2.1 電波空間フィルタ

放送局から発信され伝搬してきた電波は、Fig. 1(a)

[†] 第31回計測自動制御学会学術講演会で発表(1992・7)

^{*} 法政大学工学部 小金井市梶野町 3-7-2

^{*} Faculty of Engineering, Hosei University, Koganei
(Received August 7, 1992)
(Revised April 12, 1993)

(a) How the fading occurs

(b) Spatial filter

Fig. 1

に示すように建造物、丘陵、陸橋などで反射・回折し様々な経路を通過して移動体に到り、電波の干渉によりその電界強度は強弱のパターンをもつ。

間隔 L だけ離して移動体の前後に設置された 2 本のアンテナ F, R はこの空間的な電界強度パターンを検出し, Fig. 1(b) に示すように係数 W_F, W_R 倍し加算して出力信号を得る。この信号の周波数から移動体の速さを

読み取る。

2 本のアンテナはその場所の電界強度を正確に検出する必要がある。そのため、アンテナは正確にインピーダンスが整合し、到来した電波を吸収し反射してはならない。整合しなく反射が大きい場合、それぞれのアンテナは影響し合い、正確にアンテナ場所の電界強度を捉えない。

さらに、数多くのアンテナで空間フィルタを構成することもできる。この場合アンテナ群は八木アンテナの効果をもつ。これを避けるため、各アンテナは特に正確にインピーダンスを整合しなければならない。

この電波空間フィルタ系の諸量を以下に定義する。

【一般物理量】

- t : 時間
- f : 周波数
- τ : シフト時間
- χ : シフト変位

【移動物体に関する量】

- v : 移動体の速さ

【電波に関する量】

- λ : 電波の波長
- l_k : 第 k 経路の電波経路長
- E_k : 第 k 経路の電界強度
- ϕ_k : 第 k 経路の位相差
- θ_k : 第 k 経路の電波の入射角

【電界強度に関する量】

- $E(vt)$: 速さ v の移動体が観測する電界強度変化
- $E_T(vt), E_R(vt)$: アンテナ F, R が検出する電界強度変化
- $\rho(\tau)$: 電界強度の時間自己相関関数
- f_d : $E(vt)$ のパワースペクトラムが最大となる周波数
- f_s : 空間フィルタの出力が最大となる周波数

$E_T(vt)$: 電界強度の係数和

$|E_T(i2\pi f)|^2$: $E_T(vt)$ のパワースペクトラム

【アンテナ系に関する量】

- L : アンテナ間隔
- W_F, W_R : 空間フィルタ係数

2.2 仮定と問題の記述

いま、電波空間フィルタについて詳細に検討するためにつぎの仮定を設ける。

- (A 1) 移動体は発信局からの電波を受信する。
- (A 2) 発信局からの電波は反射・回折して全方向から均一にアンテナに到る。
- (A 3) 移動体は、アンテナ F と R が同じ軌跡を通過するように移動する。

電波が受信できない環境はトンネル内などの特別な環境であり、仮定(A 1)はほとんどの場合満たされる。仮定(A 2)は必ずしも必要としないが、理論展開を容易にするための仮定である。また、Fig. 1 に示すように移動体上部に水平にアンテナを設置するとほとんどの移動体走行で(A 3)の仮定は満たされる。いまこの仮定のもとで電波空間フィルタの最適構成について考える。

空間フィルタによる速度計測法は、環境側に依存する広い空間周波数成分の中から、空間フィルタによって特定の空間周波数成分を選択して速度計測に利用する方法である。これに対して、本論では空間尺度として利用する電波の電界強度パターンは、周期性の強い成分を含む。この特性をうまく利用すると最も単純でしかも精度の高い速さ計測系が構築できるはずである。そのために、

(P 1) 電波の電界強度分布の周期性

(P 2) 最適なアンテナ間隔 L

(P 3) 電界強度の結合係数 W_F, W_R の最適値

について理論的に検討し、最適な電波空間フィルタを構築して実際の自動車の速さを計測することでこの方式の妥当性を検討する。

3. 空間フィルタの設計

3.1 電波の電界強度空間パターンの統計的性質

Fig. 2 に示すように、移動体で受信する U/VHF 帯の電波の電界強度は発信局と移動体の①距離に伴う変化(距離変動)、②数十 m の区間にわたる緩慢な変化(中央値変動)、および③数 m での区間での急激な変動(瞬時値変動)の合成である。本論では、多重波伝搬路を経由して到来する多数の電波の干渉により発生する瞬時値変動を空間パターンとして速さを計測する。この際、距離変動および中央値変動は長周期で変化するドリフト雑音に対応するものである。

仮定(A 1)より、移動体に設置された各アンテナ F, R には発信局からの電波が到来している。反射・回折により、様々な方向から到来し、アンテナで受ける電波の電界強度の総和は、

Fig. 2 Fading phenomena of radio wave

$$E(vt) = \sum_{k=0}^{\infty} E_k \exp\left(-2\pi i \frac{L_k - vt \cos \theta_k}{\lambda} + i\phi_k\right) \quad (1)$$

で与えられる。仮定(A 2)より、電波は全方向から均一に入射するので、この自己相関関数は

$$\rho(\tau) = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} E_k^2 \exp\left(2\pi i \frac{v\tau \cos \theta_k}{\lambda}\right)}{\sum_{k=0}^{\infty} E_k^2} = J_0\left(\frac{4\pi v\tau}{\lambda}\right) \quad (2)$$

なる第 0 次のベッセル関数で与えられる³⁾。

いま、シフト変位 $\chi = v\tau$ を(2)式に代入すると、空間自己相関関数 $J_0(4\pi\chi/\lambda)$ が求められる。第 0 次のベッセル関数の周期はほぼ 2π であるから、空間自己相関は、電波の半波長の周期をもつ。

(2)式の時間自己相関関数をフーリエ変換してパワースペクトラムを求めると、

$$F[J_0(4\pi v\tau/\lambda)] = \begin{cases} \frac{2}{\{(4\pi v/\lambda)^2 - (2\pi f)^2\}^{1/2}} & (|2\pi f| < 4\pi v/\lambda) \\ 0 & (|2\pi f| > 4\pi v/\lambda) \end{cases} \quad (3)$$

となり、速さに比例した周波数

$$f = \frac{2v}{\lambda} \equiv f_d \quad (4)$$

において大きなパワーをもつ。

(3)式のパワースペクトラムは無限時区間でのフーリエ変換の結果であり、 $f = f_d$ において無限のパワーをもつ。実際には有限時間のフーリエ変換になり、 $f = f_d$ で有限のパワーをもつことになる。

また、電界強度はレーリー分布に従う²⁾。

3.2 空間フィルタの周波数特性

電波空間フィルタのアンテナ F で検出する電波の電界強度を $E(vt)$ とすると、仮定(A 3)より、アンテナ R も F と同じ軌跡を通過するから、アンテナ R で検出する電界強度は同じ関数 $E(\cdot)$ を用いて $E(vt - L)$ で与えられる。

したがって F, R での電界強度の係数和は

$$\begin{aligned} E_T(vt) &= W_F E_F(vt) + W_R E_R(vt) \\ &= W_F E(vt) + W_R E(vt - L) \end{aligned} \quad (5)$$

となり、このフーリエ変換は

$$F[E_T(vt)] = \frac{W_F + W_R \exp(-i2\pi fL/v)}{v} E(i2\pi f) \quad (6)$$

となり、空間フィルタ部分の周波数特性を

$$|S(i2\pi f)|^2 = W_F^2 + W_R^2 + 2W_F W_R \cos\left(\frac{2\pi fL}{v}\right) \quad (7)$$

とすると, $E(vt)$ のパワースペクトラムは

$$|E_T(i2\pi f)|^2 = \frac{1}{v^2} \left| E \left(\frac{i2\pi f}{v} \right) \right|^2 \cdot |S(i2\pi f)|^2 \quad (8)$$

となる。(8)式の右辺の $|E(i2\pi f/v)|^2$ は, 電界強度パターン
のパワースペクトラムであり(3)式で与えられる。こ
のとき周波数 $f = f_d$ において最大パワーをもつ。

また $|S(i2\pi f)|^2$ は係数 W_R, W_F が異符号の場合

$$f = \frac{v}{2L} \equiv f_s \quad (9)$$

の速さに比例する周波数で極大値をもつ。

3.3 最適なアンテナ間隔と空間フィルタ係数

【アンテナ間隔 L 】

電波空間フィルタは $E_T(vt)$ の出力波形を卓越するパ
ワーをもつ振動成分の周波数から速さを推定する。(4)
式, (9)式の周波数 f_d, f_s が

$$f_d = f_s \left(\frac{v}{2L} = \frac{2v}{\lambda} \right) \quad (10)$$

のとき, すなわち, アンテナの間隔 L が

$$L = \frac{\lambda}{4} \quad (11)$$

のとき, (8)式は最大のパワーをもつ。Fig. 3(a), (b)
にこの様子を示す。Fig. 3(a)のように $f_s < f_d$ の場合, パ
ワースペクトラムは二つのピークをもつ。Fig. 3(b)の

(a) Power spectrum detected by a spatial filter when $L \neq \lambda/4$

(b) Power spectrum detected by a spatial filter when $L = \lambda/4$

Fig. 3

ように $f_s = f_d$ の場合, 一つのピークになり, その大きさ
も強調される。

これよりアンテナ間隔を受信電波の $1/4$ 波長に選ぶと
最適で $E_T(vt)$ から周波数 f_s が精度良く読み取れる。こ
の場合, 速さはつぎのように求められる。

$$v = \frac{f_s}{2\lambda} \quad (12)$$

【空間フィルタ係数】

空間フィルタ周波数 f_s を精度良く計測するためには
長周期でしかも大きく変動する距離変動, 中央値変動の
ドリフト雑音を取り除く必要がある。そのために, (8)
式の $|S(i2\pi f)|^2$ の空間フィルタのゲインが低周波領域
($f=0$) で最小になるように空間フィルタ係数を調整す
ればよい。(7)式で $|S(i2\pi 0)|^2$ とし, これを最小にする
フィルタ係数は

$$W_F = -W_R \quad (13)$$

となり, $E_T(vt)$ はアンテナ F と R で検出された電界強
度の差から求められる。これは通常の空間フィルタと同
じ係数である。

アンテナ間隔, 空間フィルタ係数についての以上の結
果はアンテナが多数の場合にもそのまま適用できる。

4. 空間フィルタによる速さ計測

4.1 実験システム

Photo. 1 に自動車に搭載した電波空間フィルタを示
す。F, R のアンテナは半波長ダイポールアンテナを利用
した。電波は, NHK TV 3 Ch の音声(中心周波数 107.75
MHz の FM 変調)を使用した。アンテナは様々は周波数
の電波を受信するが, チューナでこの周波数のみを捉え
ている。この波長は 2.78 m であり, アンテナ間隔は $L =$
 $\lambda/4 = 0.695$ m とした。アンテナの高さは地面より 1.385
m であった。実速さはキャリブレーションした車輪速か
ら求めた。

使用した電界強度計の仕様は **Table 1** に示す。電界強

Photo. 1 Two antennas and automobile used in experiments

度はレーリー分布に従い、その変化範囲は大きい。そのため、大きなダイナミックレンジをもつ電界強度計になっている。また、アンテナ F, R での電界強度検出の感度を同じにするために、1 台の電界強度計を $50.0 \mu\text{s}$ でタイムシェアリング使用した。

4.2 電界強度パターンと空間フィルタ出力

Fig. 4(a) に市街地を自動車で時速 30 km/h で走行してアンテナ F で検出した電界強度 $E_F(vt)$ を示す。周期的に電界強度が変化している。これは干渉による電界強度の変化である。また長周期な中央値変動も観察される。

Fig. 4(b) に前後アンテナ F, R で検出した電界強度の差 $E_R(vt)$ を示す。長周期の中央値変動が消え、平均値

Table 1 Specification of 2 channel electric field intensity meter

Received Frequency Band	90~110 MHz
IF Band	1 MHz
Dynamic Range	>60 dB
Minimum Sensitivity	<-100 dBm
Input Isolation	>50 dB
Output Isolation	>50 dB
Maximum Sampling Frequency	20 kHz

(a) Electric field intensity measured when the speed of the vehicle was 30 km/hr

(b) Pulse of $E_R(X) - E_F(X)$

Fig. 4

0 の周期的な波形が観測できる。この周期的な波形をカウンタ回路に入力することで容易に正確な周波数を読み取り、その周波数を(12)式に代入して速さを推定する。

4.3 実速さ計測

10 km/h~60 km/h の速さを一般道で計測した。この一般道では実験車のすぐそばをバスなどの大型の車両が通過していた。70 km/h~100 km/h の速さは高速自動車道で計測した。10 km/h~60 km/h では計測時間を 8 s, 70 km/h~100 km/h では 2 s のデータの周波数の平均値から速さを推定した。Fig. 5 に実速さに対する推定速さを示す。Fig. 5 より実速さと推定速さには線形性が確認される。また実験は 2 日間に渡って様々な道路で実施されたが、どのような道路でも再現性良く速さが推定された。

20 km/h~60 km/h の低速領域では 5 km/h 程度低めに推定されている。この速度範囲は市街地の一般道路での実験であり、急激な中央値変動が発生し、周波数カウンタのカウンタミスが発生したためである。

70 km/h~100 km/h の速さの実験では高速自動車道で実施され、境界条件が均一で大きな中央値変動は頻発しない。そのため実速さに近い速さが推定されている。

アンテナ間隔を最適な間隔 $L = \lambda/4 = 0.695 \text{ m}$ から +20% 広げたり、-20% 狭めたりした場合で(12)に基づいて速さを計測した。この範囲では速さ計測にほとんど影響を及ぼさない。しかし、40% 以上アンテナ間隔を最適値から変えると推定値に影響が現れる。

4.4 アンテナの数を増した場合の検討

アンテナ間の結合に配慮し等価的に $\lambda/4$ ごとに多数のアンテナを配置する空間フィルタについて検討する。電波の状況は場所によって速い中央値変動が発生する場合があり、アンテナを増すことで空間フィルタの選択特性を急峻にし周波数カウンタミスを減らす方法が考えられる。ここでは一つのアンテナにより電界強度の空間パターンを計測しこのデータを用いてシミュレーションを

Fig. 5 Real speed vs. Estimated speed

Fig. 6 Comparison of spatial filter's outputs with different numbers of antennae
(a) 2 antennae (b) 6 antennae (c) 10 antennae

行った。

アンテナ間隔を $\lambda/4$ にして 2 本、6 本、10 本のアンテナでそれぞれの空間フィルタを構成する。空間フィルタ出力を Fig. 6 に示す。2 本アンテナの場合電界強度の瞬時値変動が小さい領域でカウントミスが発生し合計 5 回となる。6 本の場合カウントミスは 2 回に減り 10 本の場合はなくなる。これより明らかにアンテナの数を増すことでカウントミスが減る。

しかし現実にはアンテナを増す場合高い周波数の電波を用いないと空間フィルタの構造が長くなってしまふ。

5. む す び

放送局から発信された電波の電界強度パターンを空間尺度として利用した電波空間フィルタを提案した。はじめに、電界強度の空間パターンの統計的な性質を理論的に調べ、最適な空間フィルタ構成について明らかにした。つぎの結果を得た。

- (1) 電波空間フィルタの電界強度検出のアンテナ間隔は電波の $1/4$ 波長が最適である。
- (2) 電界強度の長周期変動(中央値変動)の影響を最小にするためには空間フィルタ係数を通常の場合と同様に異符号で同じ大きさの値にすればよい。

最適な空間フィルタ構成で 10 km/h~100 km/h の範囲の速さで実験を行った。実用化できる程度の再現性と線形性が得られた。

実験では市街地を走行した 20 km/h~60 km/h の範囲で若干の低めの誤差が現れた。これは周波数カウンタのカウントミスによるものである。空間フィルタ出力波形 $E_r(vt)$ に適正なバンドパスフィルタ、AGC 回路を利用することで、カウントミスを低減できる。さらにアンテナ数を増すことも周波数カウントミスの低減する方法になる。

参 考 文 献

- 1) 奥村, 大森, 河野, 福田: 陸上移動無線における伝搬特性の実験的研究, 研究実用化報告, **16-9**, 1750/1764 (1967)
- 2) 奥村, 進士: 移動通信の基礎, 電子情報通信学会, **59/77** (1986)
- 3) 渡辺, 家入, 小林: 電波のフェーディングによる電界強度の空間パターンを利用する移動体の絶対速さ計測, 計測自動制御学会論文集, **26-11**, 1223/1229 (1990)
- 4) 小林, 渡辺, 大川, 松本: 電波による絶対速さ計測法の自動車への応用の検討, 計測自動制御学会論文集, **28-3**, 306/312 (1992)
- 5) 小林 彬: 空間フィルタとその応用(I), 計測と制御, **19-4**, 43/51 (1980)
- 6) 小林 彬: 空間フィルタとその応用(II), 計測と制御, **19-6**, 35/44 (1980)

[著 者 紹 介]

小 林 一 行 (学生会員)
(Vol. 29, No. 1 参照)

小 森 敦 (学生会員)

法政大学大学院工学研究科システム工学専攻修士課程在学中。システムの故障診断の研究に従事。

渡 辺 嘉二郎 (正会員)
(Vol. 29, No. 1 参照)