

# 複数アンテナでの周期定常性検出の低演算化

研究代表者 成 枝 秀 介 三重大学 准教授

## 1 はじめに

UHF 帯などの有用な無線周波数帯は各種無線アプリケーションに割り当てられているが、時空間的に使用されていない周波数帯（空き周波数帯）が多く存在することが知られている。この空き周波数帯を有効活用できる技術の一つにコグニティブ無線技術がある。コグニティブ無線ネットワークでは、一次利用者(primary user : PU) に割り当てられてはいるが時空間的に使用されていない空き周波数帯での二次利用者 (secondary user : SU) の通信を許可することで、無線周波数帯を有効活用する。このとき、SU は PU の通信を決して妨げてはならないことから、SU は自身の周囲の無線環境を正確に把握しなければならない。スペクトルセンシング技術はこれを実現できる技術の一つであり、これまでに様々なスペクトルセンシング技術が提案されている。これらスペクトルセンシング技術の中でも、信号の周期定常性検出に基づくスペクトルセンシングでは、無線信号を識別可能であり、かつ干渉信号に耐性のあるセンシング技術である。特に、直交周波数分割多重 (orthogonal frequency division multiplexing : OFDM) 信号は、自身のサイクリックプレフィクス (cyclic prefix : CP) に起因する周期定常性を持ち、周期自己相関関数 (cyclic autocorrelation function : CAF) を用いた信号の周期定常性検出に基づくスペクトルセンシング法でこれを検出できることが知られており、加えて複数受信アンテナを用いることで信号検出精度を向上できることが知られている。最大周期自己相関選択 (maximum cyclic autocorrelation selection : MCAS) を用いたスペクトルセンシング法では、複数のサイクリック周波数における CAF の計算が必要であるが、信号検出のためのしきい値を必要としないことから、雑音の分散の推定誤差によってスペクトルセンシング特性が劣化することはない。加えて、干渉信号 (SU 信号) 存在下のセンシングにおいても誤警報確率を正確に制御できることが知られている。一方で、スペクトルセンシングに要する演算量は決して少なくないことが知られており、低演算量な周期定常性検出法が望まれる。

これまでに申請者は、MCAS に基づくスペクトルセンシング法について、その更なる演算量削減手法や、複数受信アンテナを用いたときの演算量低減手法についていくつか報告してきた。MCAS では複数のサイクリック周波数でピークを有する/有さない CAF を計算し、これらを比較することでスペクトルセンシングを実現しているが、ピークを有さない CAF は確率密度関数の情報が既知である乱数で代用可能であることを示してきた。先の二つの手法は、これを利用したものである。前者の演算量低減手法 (Improved MCAS または改良最大周期自己相関選択) では、複数のサイクリック周波数における周期自己相関関数 (CAF) を計算しないことで演算量低減化を図っている。ここではピークを有さない CAF は計算せずただ一つのサイクリック周波数でのピークを有する CAF のみ計算し、確率密度関数の情報が既知である乱数はピークを有する CAF から生成する。後者では、複数受信アンテナから得られるすべての受信信号でピークを有さない CAF を計算せず、ただ一つの受信信号からこれを計算し全受信信号間で共有することで、演算量低減を図っている。

本報告では、これら二つの手法を組み合わせ、Improved MCAS を用いた複数受信アンテナでのスペクトルセンシング法を検討する。

## 2 システムモデル

### 2-1 OFDM 信号のスペクトルセンシング

コグニティブ無線端末 (SU 端末) で OFDM 信号 (PU 信号) を検出対象としたスペクトルセンシング法について検討する。OFDM 信号は、データ長、ガードインターバル長および一つの OFDM シンボル長がそれぞれ  $T_{FFT}$ 、 $T_{CP}$  および  $T_{OFDM}$  であり、かつ  $T_{OFDM} = T_{FFT} + T_{CP}$  であるとする。また、SU 端末は  $N_R$  本の受信アンテナを備えているとする。\$1\$番目の受信アンテナから得られる受信信号を  $r_1(n)$  とすると、PU が通信中 ( $r_1(n)$  が PU の OFDM 信号を含む) であるときおよび PU が通信中でない ( $r_1(n)$  が PU の OFDM 信号を含まない) ときの仮説をそれぞれ  $\mathcal{H}_0$  および  $\mathcal{H}_1$  とすると、 $r_1(n)$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\mathcal{H}_1: r_l(n) &= h_l s(n) + v_l(n) \\ \mathcal{H}_0: r_l(n) &= v_l(n)\end{aligned}\quad l = 1, \dots, N_R \quad (1)$$

ただし  $h_l$ ,  $s(n)$  および  $v_l(n)$  はそれぞれ送信アンテナ  $l$  番目の受信アンテナ間のチャネルゲイン, PU の OFDM 信号および平均零, 分散  $\sigma_v^2$  の加法的白色ガウス雑音 (Additive White Gaussian Noise : AWGN). コグニティブ無線端末では,  $r_l(n)$ ,  $\forall l$  を用いて検定統計量  $\mathcal{T}(r)$  を計算し,  $\mathcal{T}(r)$  がしきい値  $\gamma$  を超えているかどうか ( $\mathcal{T}(r) \geq \gamma$ ) で PU の OFDM 信号の有無を判定する. このとき信号検出確率  $P_D$  および誤警報確率  $P_{FA}$  は次式で与えられる.

$$P_D = P\{\mathcal{T}(r) \geq \gamma | \mathcal{H}_1\} \quad (2)$$

$$P_{FA} = P\{\mathcal{T}(r) \geq \gamma | \mathcal{H}_0\} \quad (3)$$

ただし  $P(\cdot | \cdot)$  は条件付き確率.

## 2-2 周期自己相関関数

受信信号  $r_l(n)$  は有限長かつ離散時間信号であることから, これを扱えるよう近似した CAF は次式で与えられる.

$$\widehat{R}_{r_l}^{\alpha, N}(n, \nu) = \frac{1}{N} \sum_{m=n}^{N-1} r_l(m) r_l^*(m + \nu) e^{-j2\pi \alpha m \Delta t}, \quad l = 1, \dots, N_R \quad (4)$$

ただし  $N$ ,  $\Delta t$ ,  $\nu$  および  $\widehat{R}_{r_l}^{\alpha, N}(n, \nu)$  はそれぞれ CAF 計算に要するサンプル数, サンプルング周期, ラグパラメータおよび時刻  $n$  における  $r_l(n)$  について  $N$  サンプルで計算した近似 CAF. ここで,  $\alpha_k$  と  $\beta_k$  をそれぞれ任意のサイクリック周波数とし, それぞれ  $\alpha_k = k/T_{\text{OFDM}}$  および  $\beta_k = (k + 0.5)/T_{\text{OFDM}}$  とする ( $k$  は任意の整数) と, OFDM 信号の CAF 値は  $\alpha = \alpha_k$  かつ  $\nu = T_{\text{FFT}}/\Delta t = N_{\text{FFT}}$  でピークを有し, また  $\alpha = \beta_k$  でピークを有さないことが知られている.

## 2-3 最大周期自己相関選択

MCAS を用いたスペクトルセンシングでは, サイクリック周波数  $\alpha_1$  と複数の  $\beta_k$  ( $k = 0, \dots, N_D - 1$ ) における CAF を信号検出のために用いる ( $N_D$  はサイクリック周波数  $\beta_k$  の数).  $N_R = 1$  と仮定すると, MCAS に基づくスペクトルセンシングでは, 次式のような信号検出を行う.

$$\widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N}(n, N_{\text{FFT}}) \geq \left| \sqrt{\frac{N'}{N}} \widehat{R}_{r_1}^{\beta_k, N}(n + kN', N_{\text{FFT}}) \right| \quad k = 0, \dots, N_D - 1 \quad (5)$$

ただし  $N'$  は  $\widehat{R}_{r_1}^{\beta_k, N}(n + kN', N_{\text{FFT}})$  を得るために必要なサンプル数であり, また  $N_D N' \leq N$ . これら二種類のサイクリック周波数における CAF である  $\widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N}(n, N_{\text{FFT}})$  および  $\widehat{R}_{r_1}^{\beta_k, N}(n + kN', N_{\text{FFT}})$  は, 仮説  $\mathcal{H}_0$  においては, それぞれ  $\mathcal{CN}(0, \sigma_v^4/N)$  および  $\mathcal{CN}(0, \sigma_v^4/N')$  に従う. また MCAS では, これら二種類の CAF である  $\widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N}(n, N_{\text{FFT}})$  および  $\widehat{R}_{r_1}^{\beta_k, N}(n + kN', N_{\text{FFT}})$  の分散を一致させるために, 定数  $\sqrt{N'/N}$  を用いている. このとき, 信号検出器での設計値となる誤警報確率  $\overline{P_{FA}}$  は,  $N_D$  を用いて次式で与えられる.

$$\overline{P_{FA}} = \frac{1}{N_D + 1} \quad (6)$$

## 2-4 改良最大周期自己相関選択

前節のように、説明のため  $N_R = 1$  と仮定する。MCAS を用いたスペクトルセンシングでは、信号検出のために、 $N$  サンプルの  $r_1(n)$  から得られる  $\widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N}(n, N_{FFT})$  および  $N'$  ( $N_D N' = N$ ) サンプルの  $r_1(n)$  から得られる  $N_D$  個の  $\widehat{R}_{r_1}^{\beta_k, N'}(n + kN', N_{FFT})$  といった二種類のサイクリック周波数における CAF の計算が必要であった。また前述のように  $\widehat{R}_{r_1}^{\beta_k, N'}(n + kN', N_{FFT})$  は、仮説  $\mathcal{H}_0$  の元  $R_{r_1}^{\beta_k, N'}(n + kN', N_{FFT}) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_v^4/N')$  であり、また仮説  $\mathcal{H}_1$  の元では平均零の複素ガウス過程に従う。これらより  $\widehat{R}_{r_1}^{\beta_k, N'}(n + kN', N_{FFT})$  は仮説  $\mathcal{H}_0$ 、 $\mathcal{H}_1$  に関わらず何らかの分散をもつ複素ガウス過程に従う確率変数であるといえる。さらに、統計的性質が既知である何らかの複素ガウス過程であれば、 $\widehat{R}_{r_1}^{\beta_k, N'}(n + kN', N_{FFT})$  の代替と成り得る、ともいえる。Improved MCAS では、初めに  $\widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N}(n, N_{FFT})$  を計算し、得られた  $\widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N}(n, N_{FFT})$  より  $\widehat{R}_{r_1}^{\beta_k, N'}(n + kN', N_{FFT})$  の代替  $\mathcal{D}_{\beta_k}(n)$  を次式のように作り出している。

$$\mathcal{D}_{\beta_k}(n) = \widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N}(n, N_{FFT}) - \widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N'}(n + kN', N_{FFT}), \forall k \quad (7)$$

上式中第一項と第二項は次式の関係があることに注意されたし。

$$\widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N}(n, N_{FFT}) = \frac{1}{N_D} \sum_{k=0}^{N_D-1} \widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N'}(n + kN', N_{FFT}), \forall k \quad (8)$$

式 (8) 中の  $\widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N}(n, N_{FFT})$  および  $\widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N'}(n + kN', N_{FFT})$  は、仮説  $\mathcal{H}_0$  の元、 $R_{r_1}^{\alpha_1, N'}(n + kN', N_{FFT}) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_v^4/N')$  および  $R_{r_1}^{\beta_k, N'}(n + kN', N_{FFT}) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_v^4/N')$  である。また仮説  $\mathcal{H}_0$  の元、 $\mathcal{D}_{\beta_k}(n) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_v^4(1/N' - 1/N))$  であることから、Improved MCAS での判定は次式のように行われる。

$$\left| \widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N}(n, N_{FFT}) \right| \geq \left| \sqrt{\frac{N'}{N - N'}} \mathcal{D}_{\beta_k}(n) \right|, k = 0, \dots, N_D - 1 \quad (9)$$

## 3 検討手法

### 3-1 複数受信アンテナでの Improved MCAS に基づくスペクトルセンシング

本章では、複数受信アンテナを用いた Improved MCAS に基づくスペクトルセンシング法の検討を行う。Improved MCAS を空間ダイバーシチに適用すると、すべての受信アンテナから得られた受信信号から式 (7) を計算し、各 OFDM 信号の CAF と  $\mathcal{D}_{\beta_k}(n)$  を合成した後に式 (9) のような判定を行うことで実現できると思われる。ただ、ここで少しだけ検討を加えてみる。Improved MCAS や著者らがこれまでに提案してきた手法のように、MCAS に基づくスペクトルセンシングでは、OFDM 信号の周期定常性の情報をもつ CAF と平均、分散の情報が既知である乱数が必要となる。OFDM 信号の CAF はすべての受信アンテナから計算する必要があるが、 $\mathcal{D}_{\beta_k}(n)$  については確率密度関数などの統計量が既知である変数であるため、全受信アンテナから得られる信号のうちいずれか一つの信号でこれを計算すれば事足りる。ここで、 $\mathcal{D}_{\beta_k}^{(1)}(n)$  を1番目の受信アンテナから計算した生成複素乱数とすると、 $\mathcal{D}_{\beta_k}^{(1)}(n)$  は次式で与えられる。

$$\mathcal{D}_{\beta_k}^{(1)}(n) = \mathcal{J}_{N_{\mathcal{R}}}^N(n) - \widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N'}(n + kN', N_{FFT}), \forall k \quad (10)$$

ただし  $\mathcal{J}_{N_{\mathcal{R}}}^N(n)$  は OFDM 信号の情報を含む CAF の平均値であり、次式のように書ける。

$$\mathcal{J}_{N_R}^N(n) = \frac{1}{N_R} \sum_{l=1}^{N_R} \widehat{R}_{r_1}^{\alpha_1, N}(n, N_{FFT}) \quad (11)$$

ここで $\mathcal{J}_{N_R}^N(n)$ は $N_R N$ サンプルから計算されるCAFであることに注意されたし. これらより, ただ一つの $\mathcal{D}_{\beta_k(n)}^{(\ell)}$ を用いて, 検討手法での判定を以下のように行う.

$$|\mathcal{J}_{N_R}^N(n)| \geq \left| \sqrt{\frac{N'}{N - N'}} \mathcal{D}_{\beta_k(n)}^{(\ell)} \right|, \forall k \quad (12)$$

### 3-2 検討手法でのセンシングに要する演算量

本節では, 検討手法でのスペクトルセンシングに要する演算量について評価する. ここでは, 複素数の乗算回数を元に演算量を評価する. 検討手法での乗算回数は $N_R(8N + 4N_D + 4)$ である. また, 従来手法では,  $8NN_R + 4N'N_D + 2(N_D + 1)$ 回の乗算を必要とする. これらを解析的に比較するため, 双方の比 $C_R$ を取り, かつ $N \gg N_R$ および $N \gg N_D$ を導入すると次式のように書ける.

$$\begin{aligned} C_R &= \frac{N_R(8N + 4N_D + 4)}{8NN_R + 4N'N_D + 2(N_D + 1)} \\ &\approx \frac{2N_R + N_D N_R / N}{2N_R + N'N_D / N} \end{aligned} \quad (13)$$

上式より, 検討手法の演算量が従来手法のそれより低くなるためには,  $N_R < N'$ が必要となることがわかる.  $N'$ については,  $N \leq N'N_D$ を満たせばよいから,  $N_R > N'$ が成り立つ可能性が考えられる. しかしながら, Improved MCAS では,  $N'$ の値が小さすぎると信号検出確率が劣化することが報告されているため,  $N_R > N'$ は現実的でない, ことがわかる. これらより, 検討手法の演算量が従来法のそれより小さくなることがわかる. 図1に式(13)をプロットしたものを示す. 図1では,  $N = 2560$ ,  $N' = 134$ および67,  $N_D = 9$ および19 ( $\overline{P_{FA}} = 0.1$ および0.05)としている. 同図より,  $\overline{P_{FA}}$ の値が小さくなるにつれて検討手法の演算量が低減出来, かつ受信アンテナ数が少ないときに検討手法の演算量を低減出来ることがわかる.

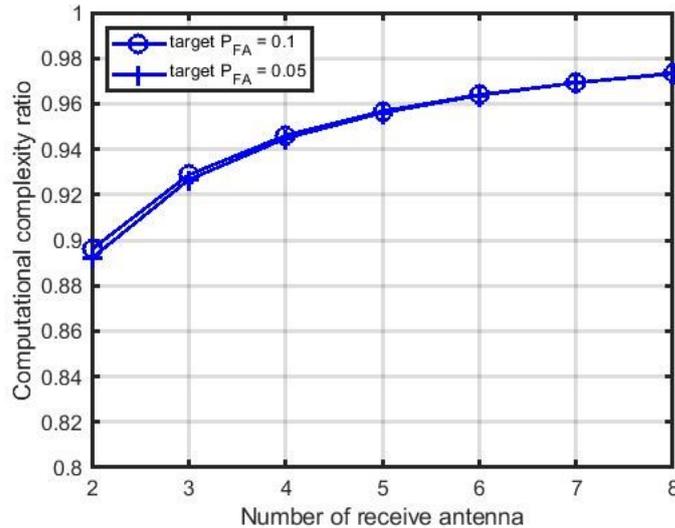


図1 : 検討手法と従来手法の乗算回数比較.  $N = 2560$ ,  $N' = 134$ および67,  $N_D = 9$ および19 ( $\overline{P_{FA}} = 0.1$ および0.05).

## 4 数値例

検討手法の有効性を検証するために、信号検出確率の比較を行ったのでその結果を示す。PU からの OFDM 信号は  $T_{FFT} = 64 \Delta t$ ,  $T_{CP} = 16 \Delta t$  および  $T_{OFDM} = 80 \Delta t$  とした。スペクトルセンシングに関するパラメータとして、 $N = 2560$ ,  $N' = 134$ ,  $N_D = 9$  ( $\overline{P_{FA}} = 0.1$ ) とし、伝送路をレイリーフェージング伝送路とした。これら諸元のもと、検討手法を従来手法と比較した。図 2 に検討手法と従来手法の信号検出確率の比較を示す。図では、 $N_R = 2, 4$  および  $8$  のときの信号検出確率を示している。図 2 より、従来手法とほぼ同等の信号検出確率特性が得られていることがわかる。先に示した演算量比較の図と併せてみると、検討手法の演算量が従来手法のそれより低いにもかかわらず、検討手法と従来手法の信号検出確率特性がほぼ同等であることから、検討手法の有効性が確認できる。

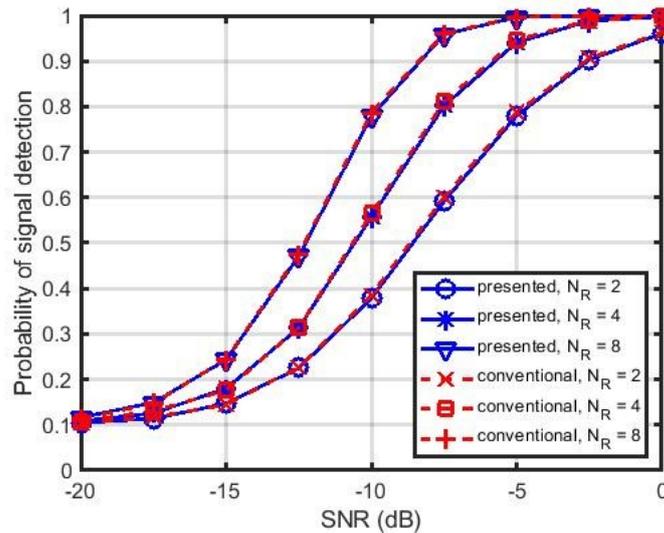


図 2 : 検討手法と従来手法の信号検出確率特性の比較.  $N = 2560$ ,  $N' = 134$ ,  $N_D = 9$  ( $\overline{P_{FA}} = 0.1$ ).

## 5 おわりに

本稿では、Improved MCAS に基づくスペクトルセンシング法を空間ダイバーシチ方式を用いて実現した。検討手法は、MCAS に基づくスペクトルセンシングが OFDM 信号の情報をもつ CAF と確率密度関数の情報が既知である生成複素乱数からも成り立つことを利用したものである。数値実験の結果、検討手法の演算量が従来手法のそれより低いにもかかわらず、検討手法と従来手法の信号検出確率特性がほぼ同等であることから、検討手法の有効性を確認した。

### 【参考文献】

- [1] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201--220, Feb. 2005.
- [2] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 4, pp. 32--39, Apr. 2008.
- [3] S. Haykin, D. J. Thomson and J. H. Reed, "Spectrum sensing for cognitive radio," *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 849--877, May 2009.
- [4] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 11, no. 1, pp. 116--130, Mar. 2009.
- [5] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals," *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 523--531, Apr. 1967.

- [6] A. Mariani, A. Giorgetti and M. Chiani, "Effects of noise power estimation on energy detection for cognitive radio applications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 12, pp. 3410-3420, Dec. 2011.
- [7] M. Oner and F. Jondral, "Air interface recognition for a software radio system exploiting cyclostationarity," in *Proc. IEEE PIMRC 2004*, pp. 1947-1951, Sep. 2004.
- [8] Z. Tian, Y. Tafesse and B. M. Sadler, "Cyclic feature detection with sub-Nyquist sampling for wideband spectrum sensing," *IEEE J. Sel. Signal Process.*, vol. 6, no. 1, pp. 58-69, Jan. 2012.
- [9] J. Lunden, V. Koivunen, A. Huttunen and H. V. Poor, "Spectrum sensing in cognitive radios based on multiple cyclic frequencies," in *Proc. CrownCom 2007*, pp. 37-43, Jul. 2007.
- [10] L. P. Goh, Z. Lei and F. Chin, "Feature detector for DVB-T signal in multipath fading channel," in *Proc. CrownCom 2007*, pp. 234-240, Aug. 2007.
- [11] G. Huang and J. K. Tugnait, "On cyclostationarity based spectrum sensing under uncertain gaussian noise," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 8, pp. 2042-2054, Apr. 2013.
- [12] K. Muraoka, M. Ariyoshi and T. Fujii, "A robust spectrum sensing method based on maximum cyclic autocorrelation selection for dynamic spectrum access," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E92-B, no. 12, pp. 3635-3644, Dec. 2009.
- [13] S. Narieda, "Improved MCAS based spectrum sensing in cognitive radio," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E101-B, no. 3, pp. 915-923, Mar. 2018.
- [14] D. Cho, S. Narieda and K. Umabayashi, "Low computational complexity spectrum sensing based on cyclostationarity for multiple receive antennas," *IEICE Commun. Express*, vol. 7, no. 2, pp. 54-59, Feb. 2018.
- [15] A. V. Dandawate and G. B. Giannakis, "Statistical tests for presence of cyclostationarity," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 42, no. 9, pp. 2355-2369, Sep. 1994.
- [16] Y. Zeng and Y.-C. Liang, "Eigenvalue-based spectrum sensing algorithms for cognitive radio," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 6, pp. 1784-1793, Jun. 2009.

### 〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Weight Computation Techniques for Spectrum Sensing Based on Test Statistics Shared CAF Diversity Combining	IEEE ICAIC 2019, pp.1-6	2019年2月
空間ダイバーシチ方式を用いた周期定常性検出の低演算化の一検討	電子情報通信学会研究会技術報告 (スマート無線研究会), vol. 118, no. 421, pp. 1-4	2019年1月