

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月17日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06079

研究課題名(和文) MIMO伝送のためのエネルギー効率を改善する人工雑音・人工高速フェージング生成法

研究課題名(英文) Energy Efficient Artificial Noise And Artificial Fast Fading Generation Schemes for MIMO transmission Systems

研究代表者

佐波 孝彦 (SABA, Takahiko)

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：60293742

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：無線通信におけるデータの秘匿性を高めるために、電波伝搬などの物理特性を利用する物理層セキュリティを併用することが注目されている。本研究では、電波を発しない受動盗聴局にも対応可能で、かつ比較的容易に実現できる人工雑音や人工高速フェージングの2つの手法に着目し、近年の多くの無線通信規格で採用されている多入力多出力(MIMO)伝送時のエネルギー効率を改善する方法の開発を目的としている。伝送方式に応じて複数の手法を開発しており、それらのいずれもが、エネルギー効率を高めると同時に、高い秘匿性を実現できることを明らかにしている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後益々普及するであろうセンサデバイスやIoTデバイスでは、バイタルデータ等の個人情報や機密性の高いデータの通信がより頻繁に行われるようになる。それらの情報を保護するためには、データを秘匿する通信が必須である。本研究で扱う物理層セキュリティは、従来からあるデータの暗号化といった方式と併用することで、データの秘匿性を劇的に高める手法である。中でも人工雑音や人工高速フェージングは電波を発しない受動盗聴局にも対応可能であり、本研究により、これらの手法を用いた際のエネルギー効率の向上、さらに秘密レート向上の実現性が明らかになれば、データの秘匿が必要な通信にとって非常に有用である。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the secrecy of data in wireless communications, the use of physical layer security, which exploits the characteristics of physical radio channels has attracted attention. In this research, we focus on two methods: artificial noise and artificial fast fading, which can be implemented relatively easily and can deal with passive eavesdroppers. The purpose of this paper is to develop methods to improve energy efficiency in multiple-input multiple-output (MIMO) transmission, which is adopted in many recent wireless communications standards. Several methods have been developed in accordance with the transmission schemes, and it has been clarified that highly secure communications can be realized while improving the energy efficiency.

研究分野：移動体通信

キーワード：物理層セキュリティ 人工雑音 人工高速フェージング MIMO プリコーディング

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

無線通信では、電波が広範囲に伝播するため、対象とする受信機以外の通信機器が電波を受信することが可能である。通常、送信データには暗号化が施されているため、受信されたからといって必ずしもデータを読み取られるわけではないが、ストレージ容量の増大、計算処理の高速化に伴い、受信データを保存・解析して解読される可能性を将来にわたって否定することはできない。そこで、電波伝搬などの物理特性を利用する物理層セキュリティを併用することが注目され、この数年の間に急激な研究競争が始まっている。中でも、人工雑音（AN: artificial noise）や人工高速フェージング（AFF: artificial fast fading）は、電波を発しない受動盗聴局にも対応可能で、かつ比較的容易に実現できることから、現実的な手法として注目されている[1]-[4]。AN や AFF は、対象とする正規の受信局において、その影響が打ち消される人工的な雑音や高速フェージングの特性を送信信号に付加することで、盗聴局の受信信号を劣化させ、盗聴局における受信信号の復調そのものを困難にする手法であり、結果として秘密レートを向上させることができる。

### 2. 研究の目的

人工雑音（AN: artificial noise）や人工高速フェージング（AFF: artificial fast fading）は盗聴局の受信信号を劣化させることで秘密レートを向上させる実践的な手法である。しかし、これまでに提案されていた AN 生成法や AFF 生成法は、近年の多くの無線通信規格で採用されている多入力多出力（MIMO: multiple-input multiple-output）伝送の正規受信局においてエネルギー損失を引き起こす。本研究では、その事実を明らかにするとともに、MIMO 伝送におけるエネルギー効率を改善する AN 生成法および AFF 生成法の確立を目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) エネルギー効率を改善する AN 生成法

初めに MIMO 伝送を用いた直交周波数分割多重（OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing）システムにおいてエネルギー効率を改善する人工雑音（AN）生成法に関して検討を行った。一般に MIMO 伝送では、複数のデータストリームを各受信アンテナで干渉なく受信できるようにするために、送信機においてプリコーディング処理が行われる。このようなプリコーディング処理はエネルギー効率を劣化させることが知られているが、プリコーディングを用いる MIMO システムに従来の生成原理に基づく AN を使用した場合にも、エネルギー損失を引き起こし、秘密レートを劣化させてしまう。まずはこのことを明らかにした。

この事実を踏まえてエネルギー効率を改善するために、OFDM 信号が白色雑音と類似の性質を有することを利用し、送信機内で OFDM 信号の振幅を抑圧するような AN 生成法の検討を行った。同時に、この生成法では任意の電力をもった雑音を生成できないために、送信信号に任意の電力の AN を付加できるように電力を制御するパラメータについても検討を行った。

#### (2) エネルギー効率を改善する AFF 生成法

次に人工高速フェージング（AFF）に関して検討を行った。AFF では、アンテナ毎にランダム重みを順次生成し各アンテナの信号に乗算するが、一つのアンテナだけは正規受信局において他のアンテナで生成したランダム重みの影響が打ち消されるような重みを生成し乗算する。ランダム重みは正規分布に従うため、それを打ち消す重みの絶対値は大きくなりやすくエネルギー効率劣化の要因となる。そこで、AFF におけるエネルギー効率の劣化量と秘密レートへの影響を定量的に明らかにすると同時に、エネルギー効率改善のためには、各重みの絶対値を小さくする必要のあることを明らかにした。

次に、エネルギー効率に優れた AFF を生成するために、各重みの絶対値の大きさがなるべく小さくなるように、通信路利得の小さなアンテナの信号から順に重みを計算していくことに加えて、ランダム重みに位相制御を行い、それらを打ち消す重みの絶対値を最小にする手法、ランダム重みを打ち消すための重みを複数用意する手法、さらに、これら二つの手法を組み合わせた手法の検討を行った。

#### (3) マルチユーザ MIMO への拡張

最後にエネルギー効率を改善可能な AN や AFF のトレードオフについて明らかにするとともに、マルチユーザ環境に適用できるよう検討を行った。従来、AN と AFF のトレードオフについては信号対雑音電力比（SNR）の大きい領域では、AFF が優れるとされていたが、エネルギー効率を考慮した場合には、原理的に AFF の秘密レートが悪くなるケースが生じる。そこで、このことについて定量的に明らかにした。

さらに、マルチユーザ環境で使用できるようにするためには、プリコーディングを用いる MIMO 伝送で利用可能な AFF が必要となる。従来の AFF は単一データストリームを送信する多入力単出力（MISO: multiple-input single-output）伝送にのみ適用可能な手法であるため、これを MIMO 伝送で使えるようにするためには新たな AFF 生成法が必要になる。そこで、プリコーディングを用いる MIMO 伝送用の AFF 生成手法について検討すると同時に、仮想受信機と呼ぶ実際には存在しない受信機を仮定し、仮想受信機向けのランダム信号を送信信号に重畳することで、エネルギー損失を引き起こすことなく秘匿性を向上できる新たな方式について検討を行った。仮

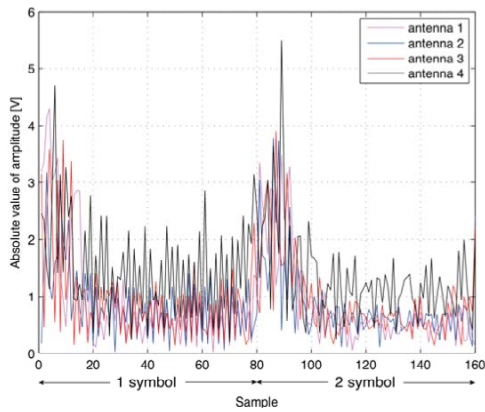


図 1: 従来の AN 生成法による送信信号波形の絶対値

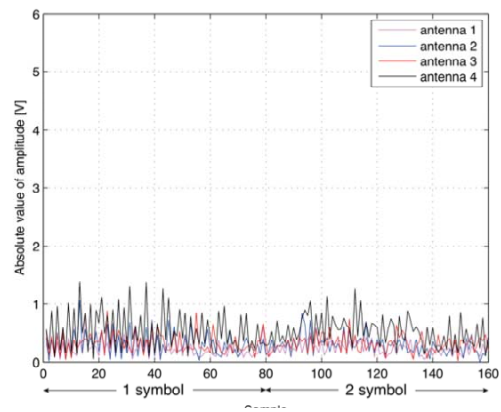


図 2: 提案する AN 生成法による送信信号波形の絶対値

想受信機向けのランダム信号は正規受信局では打ち消されるが、盗聴局はその信号を分離できないため、秘匿性を向上できる。

#### 4. 研究成果

##### (1) エネルギー効率を改善する AN 生成法の性能

図 1 と図 2 に従来の AN 生成法による送信信号波形の絶対値と提案する AN 生成法の送信信号波形の絶対値を示す。図 1 をみると、受信機で除去操作が行われる OFDM 信号のサイクリックプレフィクス付近に信号のエネルギーが集中してしまっていることが分かる。図 1 の信号と図 2 の信号を同じ電力で送信する場合には、図 1 では必然的に OFDM 信号のデータ部分の振幅が小さくならざるをえず、AN の効果が低下してしまう。図 2 では、OFDM 信号を打ち消すような信号を付加している。OFDM 信号は白色雑音と類似の性質を有する信号であるため、OFDM 信号を打ち消す信号も雑音と同様な波形になることを利用している。さらに、この方式は OFDM 信号で問題となるピーク対平均電力比 (PAPR) を低減するのにも有効である。実際に秘密レートを比較すると、図 3 のとおり提案する AN 生成法は、どの SNR 領域においても高い秘密レートを達成できることを明らかにした。

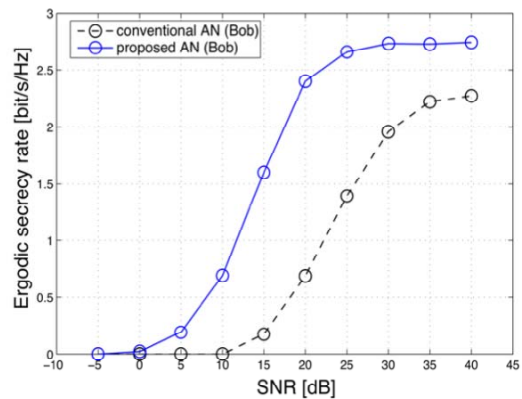


図 3: AN 生成法における秘密レートの比較

##### (2) エネルギー効率を改善する AFF 生成法の性能

AFF は、アンテナ毎にランダム重みを順次生成し各アンテナの信号に乗算することで人工的な高速フェージングの影響を与える方式であるが、複数ある送信アンテナのうち、一つのアンテナだけは正規受信局において他のアンテナで生成したランダム重みの影響が打ち消されるような重みを生成して乗算しなければならない。ランダム重みは正規分布に従うため、それを打ち消す重みの絶対値は大きくなりやすくエネルギー効率劣化の要因となっていた。そこで、各重みの絶対値の大きさがなるべく小さくなるように、通信路利得の小さなアンテナの信号から順に重みを計算していくことに加えて、1. ランダム重みに位相制御を行い、それらを打ち消す重みの絶対値を最小にする手法、2. ランダム重みを打ち消すための重み (非ランダム重み) を複数用意する手法、3. これら 2 つの手法を組み合わせた手法を検討した。それぞれの方式を用いた際の正規受信局における相互情報量を図 4 に示す。図における  $N_{\text{rnd}}$  は、非ランダム重みの数を表す。図より、提案した 3 種類の方法は、いずれも従来の AFF 生成法に比べて高い相互情報量を得られていることが分かる。中でも、2 つの手法を組み合わせた手法は、ランダム性を活かしながらも高い相互情報量を得られており、有効な手法であることを明らかにした。

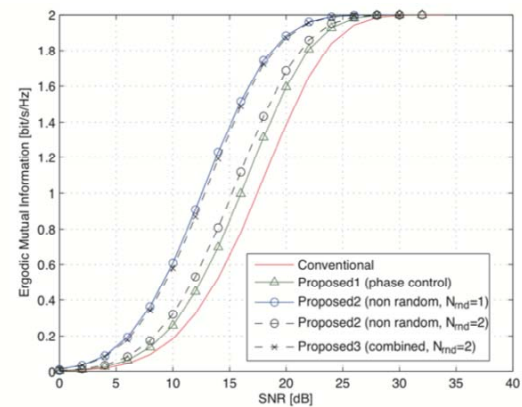


図 4: AFF 生成法による相互情報量の比較

### (3) MIMO における AFF 生成法

従来の AFF は単一データストリームを送信する多入力単出力 (MISO: multiple-input single-output) 伝送にのみ適用可能な手法であったため、これを MIMO 伝送で使えるようにするためには新たな AFF 生成法が必要となる。そこで、プリコーディングを用いる MIMO 伝送用の AFF 生成手法についても検討を行った。これを実現するためには、図 5 のように送信データストリーム数と送信アンテナ数を異なる値にする必要があり、それぞれ  $N_R$ ,  $N_T$  として考える。このとき、AFF を生成するための送信重み  $\Omega_l$  は、AFF のためのランダム重みと通信路の等化するための等化重みとに分けて (1) 式のように構成する。

$$\Omega_l = \begin{bmatrix} \omega_l^{(1,1)} & \omega_l^{(1,2)} & \dots & \omega_l^{(1,N_R)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_l^{(N_T-N_R,1)} & \omega_l^{(N_T-N_R,2)} & \dots & \omega_l^{(N_T-N_R,N_R)} \\ \omega_l^{(N_T-N_R+1,1)} & \omega_l^{(N_T-N_R+1,2)} & \dots & \omega_l^{(N_T-N_R+1,N_R)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_l^{(N_T,1)} & \omega_l^{(N_T,2)} & \dots & \omega_l^{(N_T,N_R)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\Omega_l^{\text{rand}}$  (random weights) (1)  
 $\Omega_l^{\text{eqiz}}$  (equalizing weights)

このようにすることで、MIMO への拡張が可能となる。

このとき盗聴局のアンテナ数を 8 とした場合の秘密レート特性を図 6 に示す。図 6 より送信アンテナ数および送信ストリーム数を増やすほど秘密レートが向上することを明らかにした。

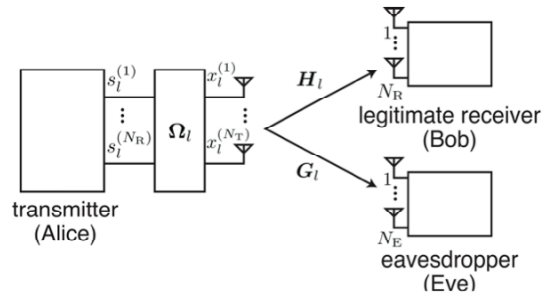


図 5: MIMO 伝送における AFF 重み

### (4) マルチユーザ MIMO への拡張

マルチユーザ環境では、複数のデータストリームを各受信機の受信アンテナで干渉なく受信できるようにするために、送信機におけるプリコーディング処理が必須となる。そこで、プリコーディングを用いる MIMO 伝送に対応可能な AFF が必要となる。ここで本研究では、仮想受信機と呼ぶ実際には存在しない受信機を考える (図 7)。

仮想受信機への通信路  $H_l^l$  は送信機がランダムに生成し、その通信路を含んだ状態でプリコーディング重みを計算するため、盗聴局は仮想受信機の通信路を知ることができない。そのため、たとえ正規受信局への通信路情報を何らかの形で知ることができたとしても、送信時のプリコーディング重みを推定することができず、結果として AFF の影響を強く受けることになる。本研究ではさらに送信時のプリコーディング重みとして非線形プリコーディングである Tomlinson-Harashima プリコーディングを採用する。

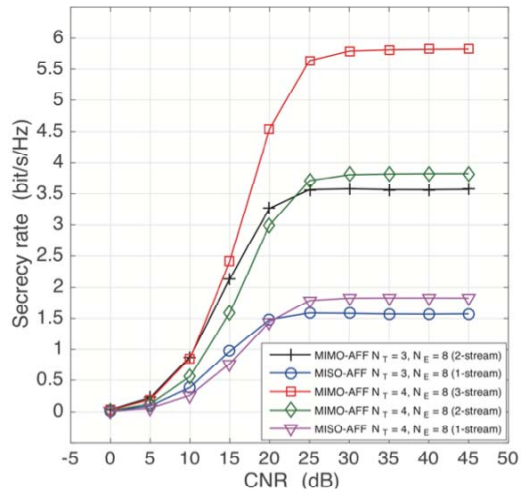


図 6: MIMO 伝送時の秘密レート

Tomlinson-Harashima プリコーディングは、フィードバックフィルタ  $B$ 、フィードフォワードフィルタ  $F$ 、およびスケールリングフィルタ  $W$  の 3 つのフィルタによって実現される。このとき、フィルタの順序を入れ替えることで 2 種類の AFF 生成重みを実現できる。本研究ではそれぞれ dTHP, cTHP と呼ぶこととする (図 8)。このときの秘密レートの結果を図 9 に示す。図 9 には (3) で提案した 3 つのタイプの方式も比較として掲載している。図より、SNR の低い領域では、dTHP が、SNR の高い領域では、cTHP が優れており、高い秘密レートを達成でき

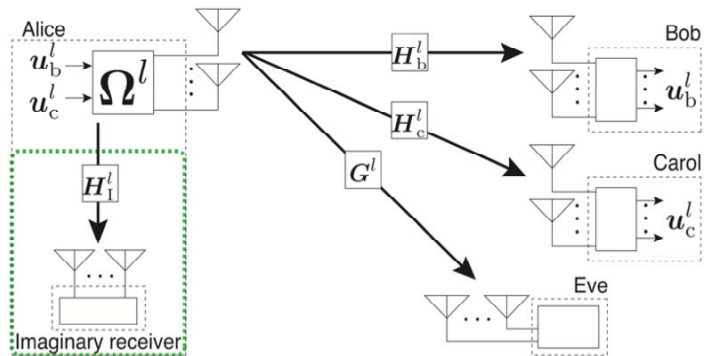


図 7: 仮想受信機を考慮したマルチユーザ MIMO システムにおける AFF



ることを明らかにした。

(5) まとめ

以上、本研究では、エネルギー効率を改善可能な AN 生成法および AFF 生成法の確立を目指し、MIMO 伝送、マルチユーザ MIMO 伝送それぞれについて、高い秘密レートを達成可能な方式を各種提案した。現在急速に普及しつつある IoT デバイスでは、バイタルデータ等の個人情報や機密性の高いデータの通信がより頻繁に行われるようになる。それらの情報を保護するためにもデータを秘匿する通信は必須の技術である。本研究はそのような通信にとって大変有効であると考えられる。

<引用文献>

[1] S. Goel and R. Negi, "Guaranteeing secrecy using artificial noise," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 7, no. 6, pp. 2180-2189, June 2008.

[2] H. Qin, Y. Sun, T. H. Chang, X. Chen, C. Y. Chi, M. Zhao, and J. Wang, "Power allocation and time-domain artificial noise design for wiretap OFDM with discrete inputs," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 6, pp. 2717-2729, June 2013.

[3] Q. Li, H. Song and K. Huang "Achieving secure transmission with equivalent multiplicative noise in MISO wiretap channels," IEEE Commun. Lett., vol. 17, no. 5, pp. 892-895, May 2013.

[4] Tomoki Akitaya, Shunta Asano, and Takahiko Saba, "Time-domain artificial noise generation technique using time-domain and frequency-domain processing for physical layer security in MIMO-OFDM systems," IEEE International Conference on Communications (ICC 2014) Workshop on Wireless Physical Layer Security, pp.807-812, June 2014. DOI: 10.1109/ICCW.2014.6881299

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

[1] Satoru Nakajima and Takahiko Saba, "Tomlinson-Harashima precoding for physical layer security in MIMO-OFDM systems," Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2017), Dec. 2017. DOI: 10.23919/APCC.2017.8304053

[2] Yuki Tanigawa, Yu Kozai, and Takahiko Saba, "A physical layer security scheme employing imaginary receiver for multiuser MIMO-OFDM systems," IEEE International Conference on Communications (ICC 2017), May 2017. DOI: 10.1109/ICC.2017.7997486

[3] Yu Kozai and Takahiko Saba, "An artificial fast fading generation scheme for physical layer security of MIMO-OFDM systems," International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS 2015), Dec. 2015. DOI: 10.1109/ICSPCS.2015.7391734

[4] Tomoki Akitaya and Takahiko Saba, "Energy efficient artificial fast fading for MISO-OFDM systems," IEEE 2015 Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2015), Dec. 2015. DOI: 10.1109/GLOCOM.2015.7417411

[5] Yudai Hosaka and Takahiko Saba, "Energy-efficient artificial noise generation scheme for secure multiuser MIMO-OFDM communications," 12th IEEE Asia Pacific Wireless Communication Symposium (APWCS 2015), Aug. 2015.

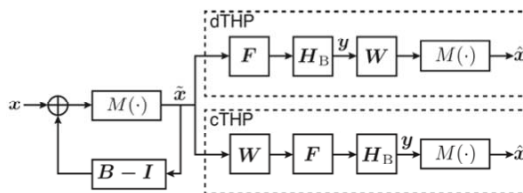


図 8: 2 種類の THP 構成法

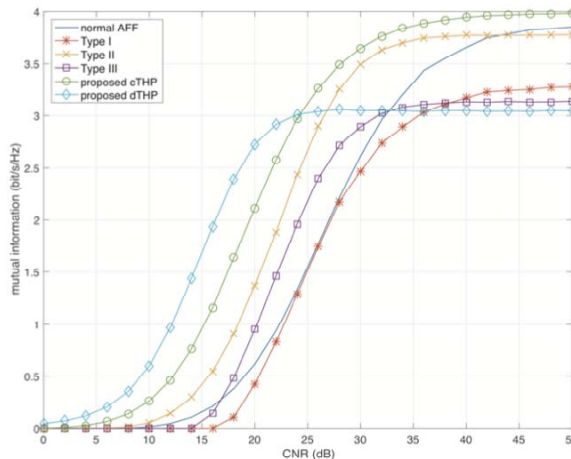


図 9: マルチユーザ MIMO における秘密レート

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。