

# 無線動画像伝送システムのモデルベース設計

研究代表者 黒崎 正行 九州工業大学大学院情報工学研究院 准教授  
共同研究者 田代 晃司 九州工業大学大学院情報工学府

## 1 はじめに

スマートフォンやタブレット型端末などのモバイル情報端末は、近年急速に普及し、我々の生活に必要な不可欠なものとなってきている。総務省の報告[1]に基づく、2017年におけるスマートフォンの世帯保有率は75.1%となっており、2010年と比較すると、65.4ポイント上昇している。加えて、タブレット型端末の普及も著しく、2017年におけるタブレット型端末の世帯保有率は2010年から29.2ポイント上昇している。一方、Cisco Systems, Inc. の報告[2]によると、2021年には、トラフィックは2016年のおよそ4倍になり、また、動画像のためのトラフィックはそのうち82%を占めると予測されている。これらの動画像のためのトラフィックの中でも、Full HD (High definition) や4K/8KのUHD (Ultra high definition)などの高精細動画像のトラフィックが著しく増加している。このように、高精細な動画像の無線伝送に対する需要が高まっている。

MIMO (Multi-input multi-output)システムは送受信機双方で複数のアンテナを有するシステムで、複数のアンテナで同時に情報を送信し、受信側でMIMO復号を行うことで、単一のアンテナでの伝送に比べて大容量に伝送できる技術であり、IEEE 802.11n以降に導入され[3]、動画像の無線伝送に利用されている。複数のユーザで同じ周波数を時間ごとに分割して利用するTDMA (time division multiple access) や複数のユーザで周波数帯域を分割して利用するFDMA (frequency division multiple access) に比べ、複数のユーザでMIMOシステムを利用するマルチユーザMIMOは高い周波数利用効率を得ることができるため、システム全体の無線伝送速度を向上させることができ、IEEE 802.11ac以降に導入されている。

一方、動画像の特徴と無線伝送技術とを組み合わせることで効率よく無線動画像伝送を行う仕組みは、情報源通信路統合符号化(JSCC: joint source-channel coding)として幅広く研究されている。JSCCに関する研究動向については、文献[4]に詳しい。動画像の特徴を利用したスケラブル符号化により重要度の異なる複数のレイヤに変換された動画像データに対して、画質に大きく寄与する下位のレイヤに対して大きな送信電力を割り当てる手法[5]や、重要度の高い下位のレイヤに対して強力な誤り訂正符号化を施す手法[6]などが提案されている。しかし、これらの手法は、低受信電力時に高画質を維持できないことが問題である。そこで我々は、チャネル状態情報に基づく固有ビームフォーミングを行い、空間ストリーム(アンテナ)・サブキャリアに対してレイヤを同時かつ最適に割り当てる手法を提案した[7]。提案手法[7]は、受信電力が約5dB低い環境においても、手法[5][6]と同程度の画質を維持することを可能とする。これは、通信距離に換算して約1.7倍の改善を意味する。

JSCCに関する研究の多くは、文献[5]-[7]を含めてソフトウェアシミュレーションにより評価される場合が多く、ハードウェアに実装した旨の報告は少ない。文献[8]では、移動体無線通信規格であるLTE (Long term evolution) を用いた無線動画像伝送システムをFPGAに実装し、画質の評価を行っている。しかし、文献[8]をはじめとする動画像伝送システムのハードウェア実装に関する文献の多くは、既存の無線通信規格(802.11, 3GPP)の物理層を利用しており、既存の無線通信規格を拡張した例は少ない。

そこで本研究では、提案している無線動画像伝送システム[7]をハードウェアで実装し、性能評価を行う。特に本無線動画像伝送システムの送受信機(物理層)をモデルベースでハードウェア設計することで、直接HDL (Hardware description language) 記述することなくハードウェアの設計が可能となる。

加えて、モバイル端末は配置スペースや消費電力の観点から受信用アンテナの設置数に制限がある。そこで、受信アンテナ数が送信アンテナ数よりも少ないMIMOシステムである過負荷MIMOシステムの利用が期待されている。本研究では、過負荷MIMOシステムをマルチユーザに拡張した過負荷マルチユーザMIMOシステムに対する無線動画像伝送システムの応用についても示す。

## 2 無線動画像伝送システムと過負荷マルチユーザ MIMO に向けた応用

### 2-1 無線動画像伝送システム

#### (1) スケーラブル符号化

本研究で対象とする無線動画像伝送システムは、情報源符号化と通信路符号化を融合した画像伝送システムである。まず、動画像を符号化する際の情報源符号化のひとつであるスケーラブル符号化について説明する。スケーラブル符号化とは階層的に動画像を符号化する技術であり、スケーラブル符号化された動画像の符号化列はいくつかの階層を含んだ符号化列となる。スケーラブル符号化には、時間スケーラブル符号化、空間スケーラブル符号化、SNR (Signal to noise ratio) スケーラブル符号化などがあり、状況に応じて使い分けられる [9]。本研究では、誤りのある無線通信路において高画質に動画像を伝送させる必要があることから、SNR スケーラビリティに着目する。SNR スケーラブル符号化は、画質の点においてスケーラブルな符号のことである。図 1 に SNR スケーラブル符号化列の構造を示す。レイヤ 1 から順番に画質の寄与度の高い順に並んでおり、番号の低いレイヤほど、動画像への重要度が高いことを示している。レイヤの低いほうから順に復号した例を図 2 に示す。図 2 より、レイヤ 1 でもある程度の画質を有した動画像を得ることができているが、レイヤ 1+2、レイヤ 1+2+3、レイヤ 1+2+3+4 とレイヤを増やして復号することで、より高画質な動画像を得ることが可能である。これらのスケーラブル符号化は、H. 264 SVC (Scalable video coding) や H. 265 SVC, JPEG 2000 などで使用でき、監視カメラなどの動画像伝送に利用されている。



図 1 スケーラブル符号化列 (4 レイヤに分割した例)



図 2 スケーラブル符号を低いレイヤから順に復号した例

#### (2) MIMO システム

MIMO システムは送受信機双方で複数のアンテナを有するシステムで、複数のアンテナで同時に情報を送信し、受信側で MIMO 復号を行うことで、単一のアンテナでの伝送に比べて大容量に伝送できる技術である。図 3 に MIMO システムのモデルを示す。図 3 に示すように  $N_{TX}$  本の送信アンテナから  $N_{RX}$  個の信号を送信するモデルを考える。受信アンテナ数を  $N_{RX}$  とすると、送信シンボルベクトル  $\mathbf{s}$  と受信信号ベクトル  $\mathbf{y}$ 、雑音ベクトル  $\mathbf{n}$  はそれぞれ式(1)-式(3)で表すことができる。

$$\mathbf{s} = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_{N_{TX}}]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_{N_{RX}}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{n} = [n_1 \ n_2 \ \dots \ n_{N_{RX}}]^T \quad (3)$$

式(1)-式(3)を用いると、 $\mathbf{y}$  はチャネル行列  $\mathbf{H}$  と電力割り当て行列  $\mathbf{P}$  を用いて式(4)-式(5)で表すことができる。

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{N_{RX}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_{TX}} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N_{TX}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_{RX}1} & h_{N_{RX}2} & \cdots & h_{N_{RX}N_{TX}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{p_1}s_1 \\ \sqrt{p_1}s_2 \\ \vdots \\ \sqrt{p_{N_{TX}}}s_{N_{TX}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{N_{RX}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{P}$  は  $\text{diag}(\sqrt{p_1}, \dots, \sqrt{p_{N_{TX}}})$  である。

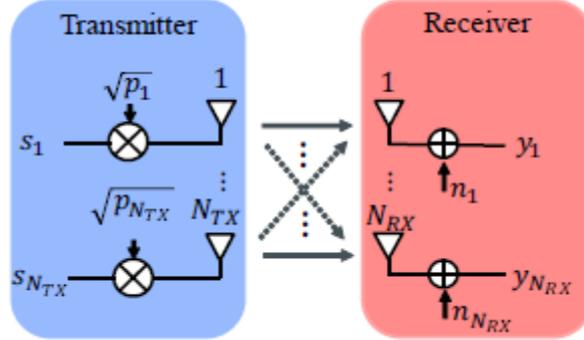


図 3 MIMO システム

### (3) 無線動画像伝送システム

本研究で提案している無線画像伝送システム[7]を図 4 に示す。スケーラブル符号化された画像を MIMO システムで無線伝送する。通信路のチャネル行列  $\mathbf{H}$  を式(6)のように分解し、送信側で前処理として分解後の行列  $\mathbf{V}$  を、受信側で後処理として行列  $\mathbf{U}^H$  を乗算することで、チャネル状態情報に基づく固有ビームフォーミング伝送を行うことができる。

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H \quad (6)$$

併せて、前処理として空間ストリーム(アンテナ)・サブキャリアに対してレイヤを同時かつ最適に割り当て各アンテナから送信する信号の電力の調整を行うことで、より高画質に画像を伝送することが可能となる。

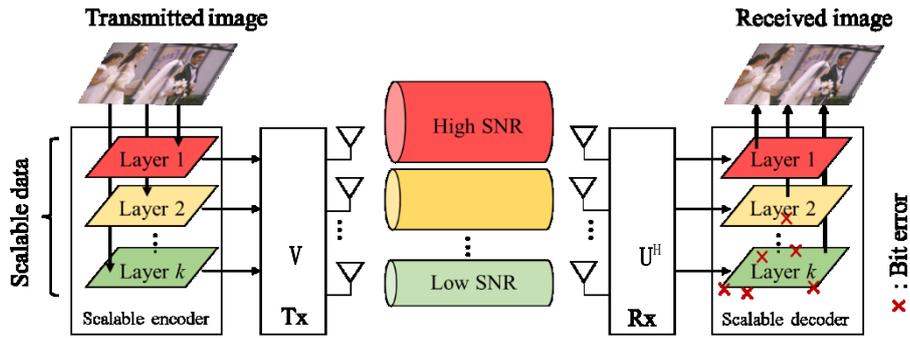


図 4 提案している無線画像伝送システム

### 2-2 過負荷マルチユーザ MIMO に向けた応用

モバイル端末は配置スペースや消費電力の観点から受信用アンテナの設置数に制限があるため、受信アンテナ数が送信アンテナ数よりも少ない MIMO システムである過負荷 MIMO システムに着目が集まっている。図 5 に提案している無線画像伝送システムの過負荷マルチユーザ MIMO に向けた応用例を示す。図 4 は行列  $\mathbf{V}$  を送信側で乗算し、受信側では行列  $\mathbf{U}^H$  を乗算することで、チャネル状態情報に基づく固有ビームフォーミング伝送を行っているが、通信路のチャネル行列  $\mathbf{H}$  に応じてスケーラブル符号化列の並び替えや送信信号の電力を調整するように変更することで、過負荷マルチユーザ MIMO に向けに応用可能である。

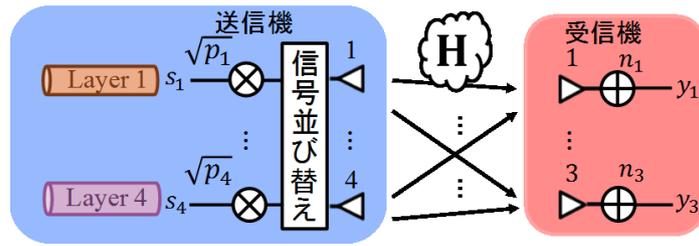


図5 過負荷マルチユーザ MIMO に向けた無線画像伝送システムの応用例

### 3 無線動画伝送システムの設計

#### 3-1 モデルをベースとした設計

図6にハードウェア設計の流れを示す。本件旧では、設計にはモデルをベースとした設計を用いる。モデルをベースとした設計を用いることにより、システムのブロック線図をそのまま利用して設計することが可能となる。そのため、モデルの仕様にあわせたブロック線図ベースのシミュレーションモデルを作成することにより、シミュレーションからハードウェアまでを一気通貫で作成することが可能である。特に、本設計環境では、固定小数点シミュレーション以降の処理において、ハードウェア記述言語 (HDL) を直接触ることなく、ハードウェアを作成することができるため、手作業でシミュレーションモデルからハードウェア記述言語に変換する際に発生する誤りを低減することが可能となり、ハードウェアでの実証までの時間を短縮することが可能となる。

本研究では、MATLAB/SIMULINK R2014b, および Synphony MC 2015.09 を用いて設計を行う。

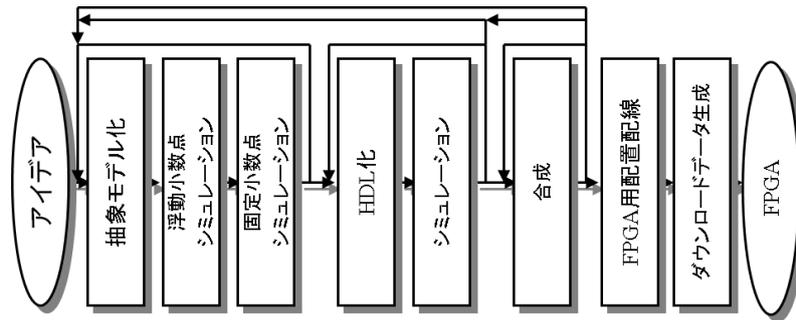


図6 ハードウェア設計の流れ

#### 3-2 無線動画伝送システムの設計

本研究で提案している無線動画伝送システムのモデルを図7に、設計した送信機モデルを図8に受信機モデルを図9に示す。ブロック線図にあわせてブロックを作成して配置し、結線することで、画像伝送システムを設計することが可能である。また、ブロック線図ベースでのシミュレーションを行い、そのシステムの入出力信号の結果を図10に示す。図10より送受信が行われていることが確認できる。併せて、スクランブラの平行設計例を図11に示す。このように、様々なブロックにおいて処理速度を上げるために、平行設計を行っている。

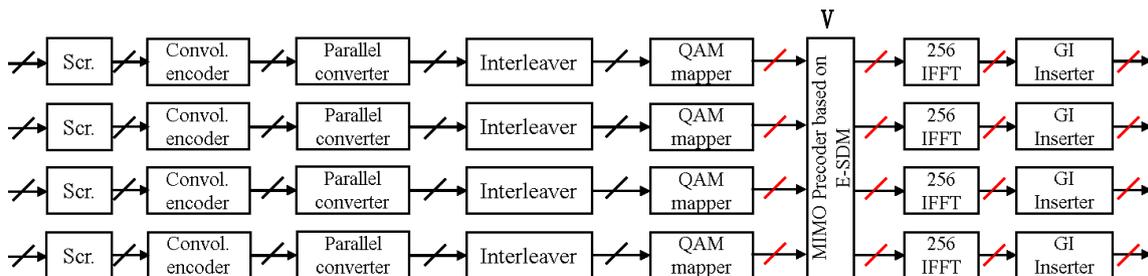


図7 提案する無線画像伝送システム(送信機, 4ストリーム)

## 送信機

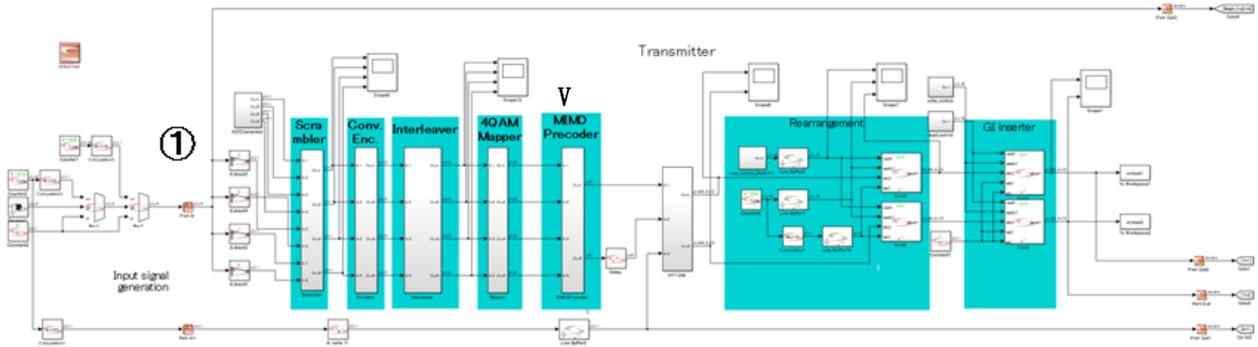
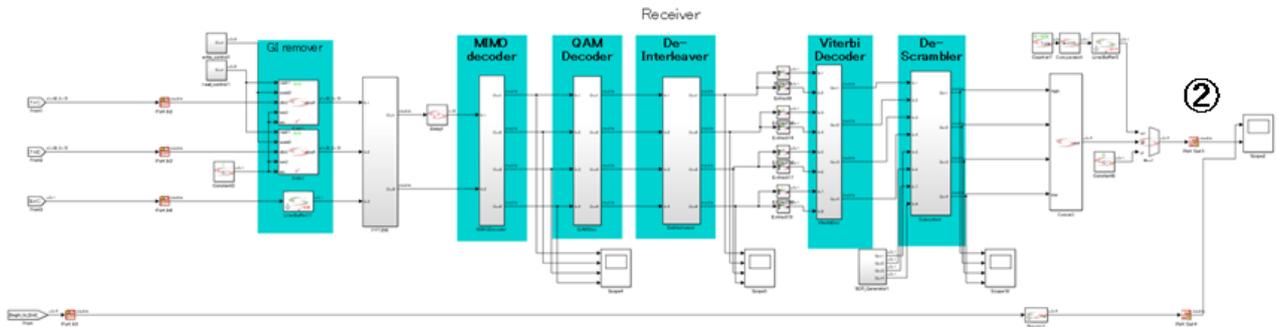


図 8 設計した無線画像伝送システム(送信機, 1 ストリーム分を抽出)



## 受信機

図 9 設計した無線画像伝送システムのシミュレーション結果

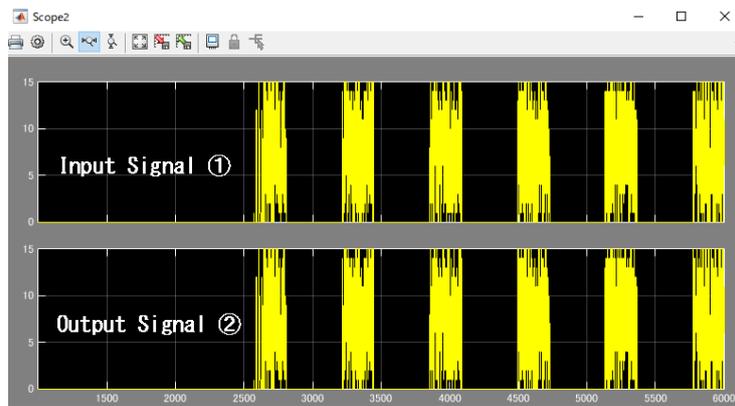


図 10 設計した無線画像伝送システムの入出力

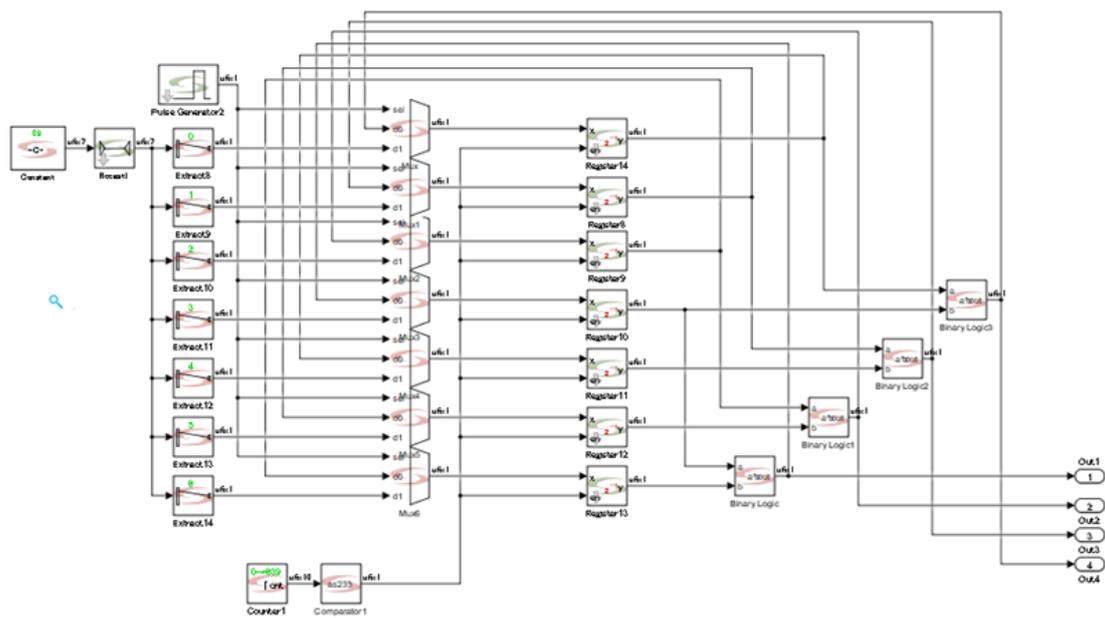


図 11 設計した無線画像伝送システムのスクランブラ(4 パラレルで設計)

## 4 過負荷マルチユーザ MIMO に向けた検討

### 4-1 シミュレーション諸元

本章では、提案している無線画像伝送システムを基本として、送信アンテナ数よりも受信アンテナ数が少ない過負荷 MIMO をマルチユーザで利用を想定した高画質化に関する検討を行う。電力調整及び送信号並び替えを併用した過負荷マルチユーザ MIMO による動画像伝送手法を提案手法として、計算機シミュレーションを行う。

表 1 に動画像に関するパラメータを示す。本シミュレーションでは、Full HD (解像度 1920x1080) の動画像を 100 フレーム送信する。各フレームは JPEG 2000 によりスケーラブル符号化され、4 つのレイヤを有する。なお、Kakadu Software [10]を用いて JPEG 2000 の符号化、及び復号を行う。表 2 に無線伝送に関するパラメータを示す。アンテナを 8 本有した送信機が 1 台、ユーザ数は 2 とし、ユーザー一人当たりの受信アンテナ数を 3 とする。ユーザー一人当たりの空間ストリーム数は 4 とし、レイヤ数も空間ストリーム数と等しく 4 とする。それぞれのユーザには異なる動画像を送信し、動画像はパケット単位で送受信される。1 パケットのペイロードを 8000 ビットとし、各パケットにおいて 4-QAM で変調し、FEC エンコーダとして符号化率 2/3 のパンクチャド畳み込み符号、FEC デコーダとして Viterbi 復号を用いる。チャンネルはユーザ間において独立なレイリーフェージングチャンネルとする。雑音は複素ガウス分布に従い、MIMO の復号としては、最尤復号を用いる。

表 1 動画像に関するパラメータ

フレーム数	100
符号化方式	JPEG 2000
解像度	1920x1080
レイヤ数	4

表 2 無線通信に関する提案手法と従来手法において共通のパラメータ

送信機の数	1
送信アンテナ数	8
ユーザ数	2
ユーザ 1 人当たりの空間ストリーム数	4
変調方式	4QAM
チャンネルモデル	レイリーフェージングチャンネル
雑音	複素ガウス分布
MIMO デコーダ	最尤復号
誤り訂正符号	パルクチャド畳み込み符号
誤り訂正符号の復号	ビタビ復号
符号化率	2/3
ペイロードサイズ	8000 ビット
チャンネル推定	理想

従来手法, 提案手法のいずれにおいても各ユーザに割り当てる電力は等しくする. すなわち, ユーザ $k$ に割り当てる電力を $P^{(k)}$ とすると, 式(7), 式(8) が成り立つように電力割り当てる.

$$P^{(1)} + P^{(2)} = 1:1 \quad (7)$$

$$P^{(1)} + P^{(2)} = P_{total} \quad (8)$$

また, ユーザ $k$ における第 $i$ レイヤに割り当てる電力を $p_i^{(k)}$ とすると, 提案手法と従来手法における電力割り当てを式(9) のように定める.

$$p_1^{(k)} : p_2^{(k)} : p_3^{(k)} : p_4^{(k)} = \begin{cases} 1:1:1:1 & (\text{従来法, 提案手法 1}) \\ 2^3:2^2:2^1:2^0 & (\text{提案手法 2}) \end{cases} \quad (9)$$

なお, 画質の評価には, 式(10)の PSNR(peak signal-to-noise ratio)を用いる.

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE} \quad (10)$$

#### 4-2 シミュレーション結果

送信信号の並び替えを用いず, 電力を均一に割り当てた場合を「従来手法」, 送信信号の並び替えを用いて, 電力を均一に割り当てた場合を「提案手法(1)」, 送信信号の並び替えと不均一に電力配分する手法を組み合わせた場合を「提案手法(2)」とする. 図 12 に SNR に対する受信画像の平均 PSNR 特性を示す. PSNR 値が 40 dB 以上で高画質であり, これを達成する SNR は提案手法(2) においては 16 dB であり, 従来手法に比べ 2 dB 向上している. すなわち, 約 0.6 倍の電力で従来手法と同じ画質を達成することが確認できている. また, 図 13 に SNR 16 dB における受信画像を示す.

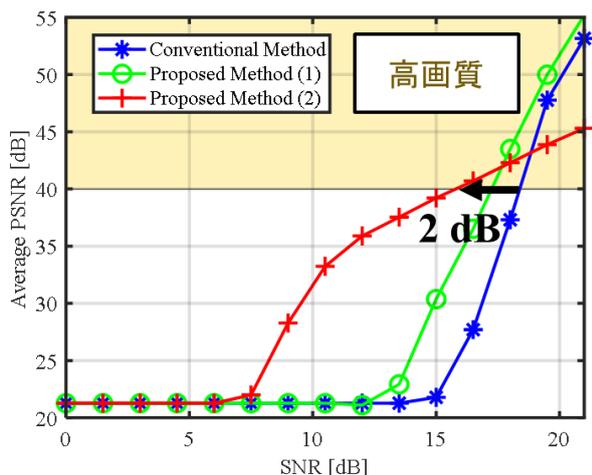


図 12 SNR に対する受信画像の平均 PSNR 特性 (QPSK, レイリーフェージングチャネル, 畳み込み符号, 符号化率 2/3).



(a) 従来手法 (PSNR 26.1 dB)



(b) 提案手法 (PSNR 42.2 dB)

図 13 SNR 16dB における受信画像.

## 5 まとめ

本研究では、情報源符号化と通信路符号化を融合した情報源通信路統合符号化を基本とする無線動画伝送システムを設計した。併せて、その応用としての過負荷マルチユーザ MIMO システムを用いた画像伝送の高画質化についての検討を行った。無線画像伝送システムの設計では、モデルベースで設計することで、仕様から設計、ハードウェアまでをひとつの設計パスで設計することができるようになり、容易にハードウェアを設計することが可能となった。設計したシステムでは、簡単に前処理を変更することが可能となるため、設計変更を少なく様々な画像伝送システムとして動作させることが可能である。加えて、応用のひとつとして、過負荷マルチユーザ MIMO に向けた無線動画伝送システムの提案も行い、前処理として通信路状態に合わせて送信信号を並び替え、かつアンテナごとの送信電力の割り当てを不均一にすることで、前処理を行わずに電力も均等に割り当てられる一般的な MIMO の無線通信システムに比べ、高画質に伝送することが可能であることが確認できた。

本無線動画伝送システムは、前処理部分を変更することで、様々なシステムを実現可能である。今後は、前処理を動的に変更させることで、通信路に応じた最適な無線動画伝送が可能なシステムを構築していく。

## 【参考文献】

- [1] 総務省, “総務省 | 平成 30 年版情報通信白書 | 情報通信機器の保有状況,” <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/html/nd252110.html>, Feb. 2019.
- [2] Cisco Systems, Inc., “ゼタバイト時代: トレンドと分析,” [https://www.cisco.com/c/ja\\_jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html](https://www.cisco.com/c/ja_jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html), Feb. 2019.
- [3] S. Banerji and R.S. Chowdhury, “On IEEE 802.11: wireless LAN technology,” International Journal on Mobile Network Communication and Telematics, vol.3, July 2013.
- [4] B. Gururaj and G Sadashivappa, “Insights on error-resilient image transmission schemes on wireless network,” International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol.8, no.1, pp.31-40, 2017.

- [5] M.F. Sabir, A.C. Bovik, and R.W. Heath, "Unequal power allocation for JPEG transmission over MIMO systems," IEEE Transactions on Image Processing, vol.19, no.2, pp.410-421, Feb. 2010.
- [6] R. Colda, C. Perrine, J. Cancas, R. Vauzelle and T. Palade, "Content-based image unequal error protection strategies for an open loop MIMO system," International Journal of Communications, Network and System Sciences, vol.5, no.1, pp.72-80, 2012.
- [7] K. Tashiro, L. Lanante, M. Kurosaki, and H. Ochi, "Joint transmission and coding scheme for high-resolution video streams over multiuser MIMO-OFDM Systems," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E100.A, no.11, pp.2304-2313, Nov. 2017.
- [8] Y. Lu, Q. Zhang, and A. Tang, "FPGA implementation of video transmission system based on LTE," MATEC Web of Conferences, vol.22, 2015. International Conference on Engineering Technology and Application, 2015.
- [9] 木本崇博, "H.264/スケーラブルビデオ符号化(SVC)," 映像情報メディア学会誌, vol.61, no.4, pp.422-425, Apr. 2004.
- [10] Kakadu Software, "The world's leading JPEG2000 software development toolkit," <http://kakadusoftware.com/>, Feb. 2019.

#### 〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
過負荷マルチユーザ MIMO システムを用いた無線動画伝送	電子情報通信学会九州支部学生講演会	2018年9月
Greedy Power Allocation for Wireless Video Streaming with Overloaded MIMO Systems	2018 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems	2018年11月
過負荷マルチユーザ MIMO システムにおける動画伝送の高画質化のための一検討	電子情報通信学会総合大会	2019年3月