

時空間ブロック符号化 AF 中継の実験評価

遠藤 力¹ 宮崎 寛之¹ 徳田 清仁² 安達 文幸³

^{1,3}東北大学大学院 工学研究科 通信工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

²東北大学電気通信研究機構 〒980-8577 仙台市青葉区片平2丁目1-1

E-mail: ¹{endo, miyazaki}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, ²tokuda_k@yiai.jp, ³adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 筆者らはこれまで、無人航空機（UA）を用いる無線中継システムのための時空間ブロック符号化非再生（STBC-AF）中継伝送を提案した。この STBC-AF 中継伝送では、中継局において必要な処理はブロック入れ替えと複素共役演算のみであるため、中継局の構成を簡易にできる。これまで、STBC-AF 中継伝送は従来の AF 中継伝送より高いスループットを達成できることを計算機シミュレーションにより明らかにした。本稿では、筆者らが試作した STBC-AF 中継実験装置の概要について述べる。次いで、電波暗室内で行った中継伝送実験の結果について述べる。

キーワード 時空間ブロック符号化, AF 中継伝送, 中継伝送実験

Experimental Evaluation of Space-Time Block Coded Amplify-and-Forward Relay

Chikara ENDO¹ Hiroyuki MIYAZAKI¹ Kiyohito TOKUDA² and Fumiayuki ADACHI³

^{1,3}Dept. of Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

6-6-05 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

Research Organization of Electrical Communication, Tohoku University

2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577 Japan

E-mail: ¹{endo, miyazaki}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, ²tokuda_k@yiai.jp, ³adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract We proposed a space-time block coded amplify-and-forward (STBC-AF) relay for unmanned aircraft (UA) wireless relay system. STBC-AF relay requires only the block exchange and conjugate operation at UA relay station and therefore, UA relay has a simple structure. In our previous study, we showed, by the computer simulation, that STBC-AF relay achieves higher throughput than AF relay. In this paper, we present an experimental STBC-AF relay and show results of STBC-AF relay experiment done in a radio anechoic chamber.

Keyword space-time block coding, amplify-and-forward relay, relay transmission experiment

1. まえがき

先の東日本大震災では、大規模な災害などによって通信ケーブルの切断や基地局の停電などが発生し、ネットワークから孤立してしまうという問題が起こった。そのような場合に、迅速にネットワークを構築する手段として無人航空機（UA）を用いる無線中継システム（UAS）が注目されている[1]。このシステムでは UA の高速旋回により地上—UA 間のリンクは周波数選択性フェージング、伝搬損失およびシャドウイング損失などによって通信品質が時々刻々と変動する不安定なリンクとなってしまう[2]。したがって、高品質かつ高安定な無線中継システムを構築するための優れた信号検出技術が必須となる。直交周波数分割多重（OFDM）伝送は周波数選択性フェージングを克服する有効な伝送技術として広く知られている[3]。また、複数の送受信アンテナを用いる時空間ブロック符号化（STBC）ダ

イバーシチ技術を用いれば、送信局の構成を簡易に保ちつつ、さらに伝送品質を改善できる[4-6]。

筆者らはこれまで STBC 符号化と非再生（AF）中継伝送を組み合わせた STBC-AF 中継伝送を提案した[7]。これまでの計算機シミュレーションでの検討により、STBC-AF 中継伝送は従来の AF 中継伝送[8,9]より高いスループットを達成できることを明らかにした。

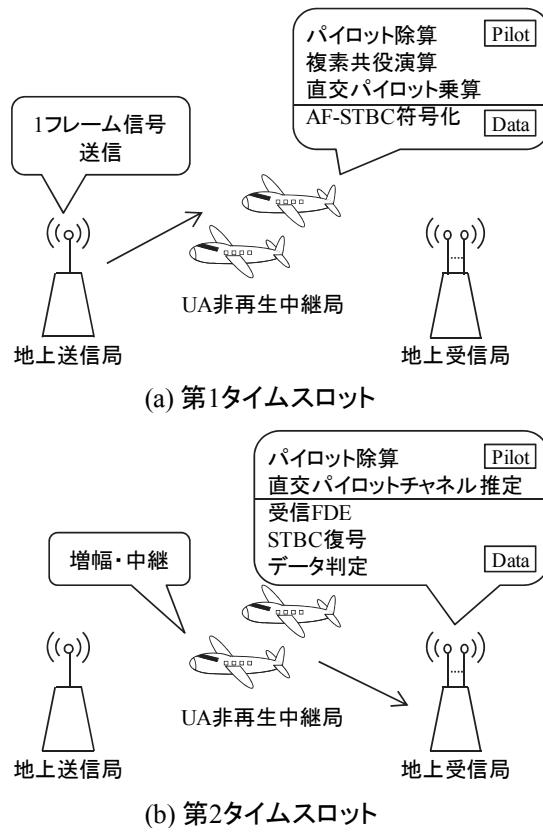
本稿では、筆者らが試作した STBC-AF 中継実験装置の概要および電波暗室内での中継伝送実験について紹介する。電波暗室内での中継伝送実験により、STBC-AF 中継伝送は従来の AF 中継伝送よりも高いスループットが得られることを確認した。

本稿の構成は以下のようになっている。第 2 章にて STBC-AF 中継伝送の概要を説明した後、第 3 章にて試作した STBC-AF 中継実験装置について述べる。第 4 章にて電波暗室内で行った中継伝送実験の結果を述べ

た後、第5章にてまとめることとする。

2. STBC-AF 中継伝送の概要

STBC-AF 中継伝送の概要図を図1に示す。まず、地上送信局がパイロットブロックとデータブロックで構成される1フレームの信号を第1タイムスロットにおいてUAに送信する。UAでは受信パイロットブロックにパイロット除算、複素共役演算および直交パイロット乗算処理を、受信データブロックに複素共役演算とブロック入れ替えからなるAF-STBC符号化[7]をそれぞれ適用する。そして、第2タイムスロットにおいてUAが受信局に向けて信号を増幅・中継する。受信局では受信パイロットブロックに対して、直交パイロットチャネル推定を適用して地上送信局—UA—地上受信局間リンクの等価チャネルおよび周波数オフセットに起因する定常位相回転(CPE)を推定する。そして、チャネル推定値およびCPE推定値を用いて、受信データブロックに対して受信等化およびSTBC復号を適用した後、データ復調を行う。本論文では、周波数オフセットに起因するCPEを推定するために、直交パイロットを用いて複数の等価チャネルおよびCPEを同時に推定する直交パイロットチャネル推定を用いている。



3. STBC-AF 中継実験装置

試作したSTBC-AF中継実験装置は、地上送信局実験装置、UA中継局実験装置および地上受信局実験装置から構成される。図2～図4にそれぞれの装置の外観を示す。

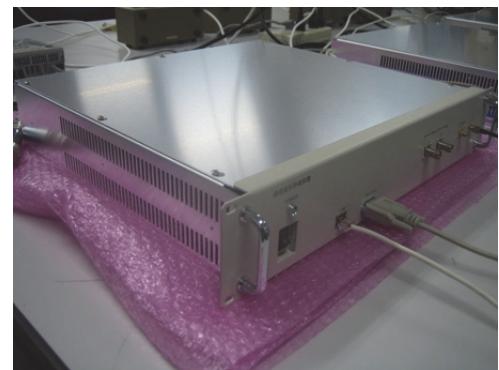


図2 地上送信局実験装置外観



図3 UA中継局実験装置外観



図4 地上受信局実験装置外観

3.1. 地上送信局実験装置

地上送信局実験装置は送信信号の生成および送信を行う。地上送信局実験装置の構成を図5に示す。はじめに、FPGAによる送信信号処理部にて送信フレームを生成する。その後、送信フレームに対してデジタル／アナログ変換(DAC)を行ってアナログ信号に変換した後、直交変調およびフィルタリングを行い、搬送波周波数130MHzの中間周波数(IF)信号を出力する。フレーム構成およびOFDMフォーマットは図6および表1に示すようにIEEE802.11規格[10]に基づくものとしている。またIF信号のスペクトルは図7に示すようなスペクトルマスクを満足するように設計されている。

3.2. UA中継局実験装置

UA中継局実験装置はAF-STBC符号化および増幅・中継を行う。UA中継局実験装置の構成を図8に示す。第1の入出力系統(①～②)が第0UAにおける処理、

第2の入出力系統(③～④)が第1UAにおける処理に相当する。まず、受信したIF信号に対して受信フィルタおよびアナログ/デジタル変換(ADC)を適用してデジタル信号に変換した後、FPGAによる信号処理部においてAF-STBC符号化を行う。その後AF-STBC符号化後のデジタル信号に対してDACを適用し、アナログ信号に変換した後、直交変調および送信フィルタを適用して送信する。第1の入出力系統内の遅延操作は、第1の入出力系統における出力および第2の入出力系統における出力を同期させるためのものである。

3.3. 地上受信局実験装置

地上受信局実験装置はチャネル推定、受信等化およびSTBC復号を行う。地上受信局実験装置の構成を図9に示す。受信IF信号に対してフィルタおよびADCを適用してデジタル信号に変換した後、FPGAによる信号処理部においてチャネル推定およびCPEを推定する。なお本装置では直交パイラットチャネル推定により伝搬チャネルおよびCPEを推定する。ついで、チャネル推定値およびCPE推定値を用いて受信等化を行った後、STBC復号およびデータ復調を行う。

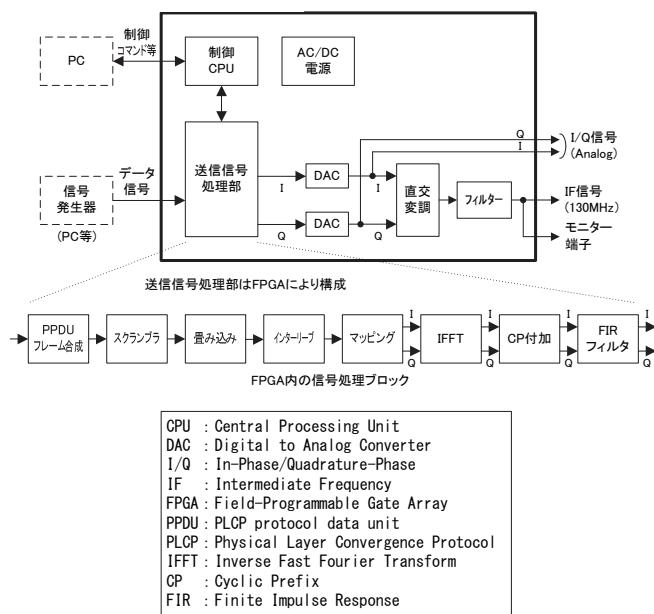


図5 地上送信局実験装置構成

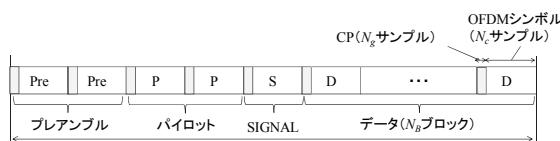


図6 フレーム構成

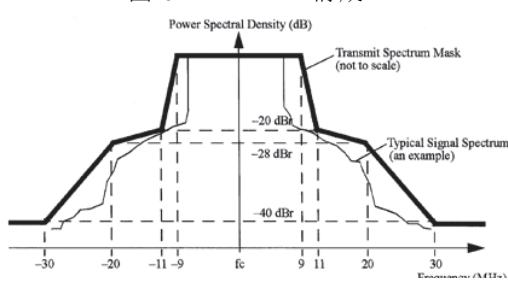


図7 送信スペクトルマスク

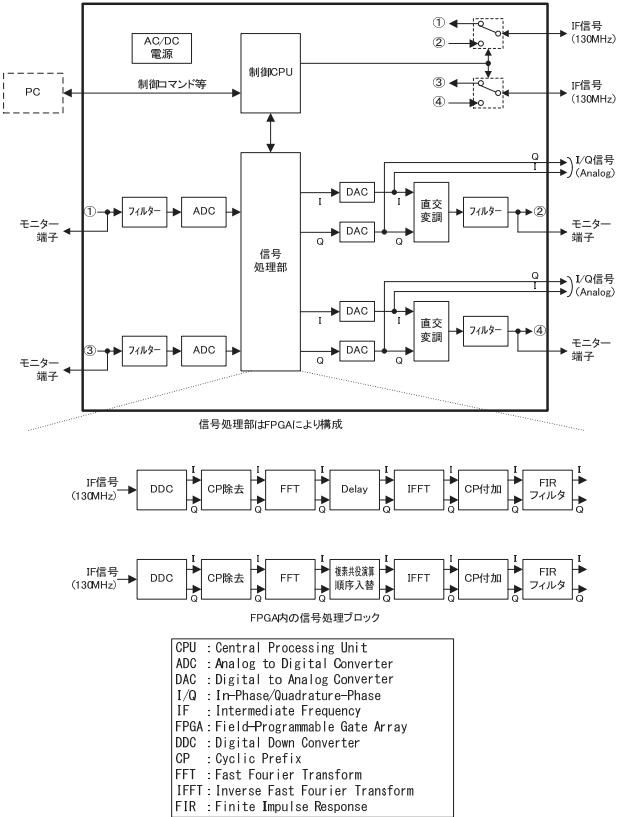


図8 UA中継局実験装置構成

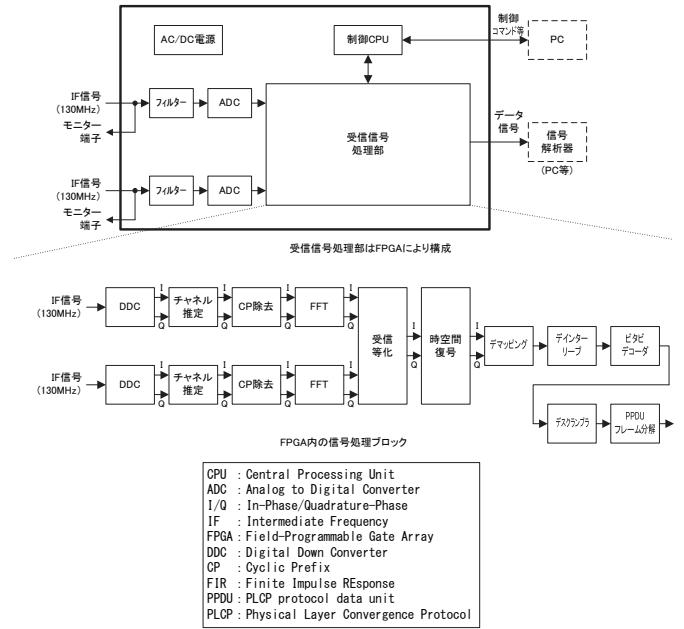


図9 地上受信局実験装置構成

表1 OFDM信号フォーマット

項目	仕様
サブキャリア間隔: ΔF	0.3125MHz (=20MHz/64)
データサブキャリア数: N_{SD}	48
パイラットサブキャリア数: N_{SP}	4
FFTポイント数: N_c	64
1次変調方式: B	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM

4. 中継伝送実験

4.1. 実験系

電波暗室（長さ 31.0m×幅 15.0m×高さ 15.0m）にて中継伝送実験を行った。本実験における各装置の写真および中継伝送実験系を図 10 および図 11 に示す。

まず、地上送信局実験装置から出力された IF 送信信号は増幅器で増幅され、信号発生器およびミキサにより中心周波数 2.412GHz の高周波数 (RF) 信号に変換される。そして増幅および表面弾性波 (SAW) フィルタによるスペクトル整形を行った後、2.4GHz 帯のアンテナによって送信される。2 本のアンテナで受信された RF 信号はそれぞれ 3 台の縦列接続された増幅器によって増幅された後、信号発生器およびミキサによって IF 信号に変換される。その後、増幅器および減衰器によって受信電力の調整を行い、UA 中継局実験装置に入力される。UA 中継局実験装置出力は、増幅器で増幅された後、信号発生器およびミキサによって中心周波数 2.462GHz の RF 信号に変換される。そして増幅および SAW フィルタによるスペクトル整形を行った後、2 本のアンテナから送信される。2×2MIMO チャンネルを伝搬して 2 本のアンテナで受信された RF 受信信号は、3 台縦列接続された増幅器によって増幅された後、信号発生器およびミキサによって IF 信号に変換される。そして増幅器および減衰器により受信電力の調整を行った後、地上受信局実験装置に入力される。

なお本伝送実験系では、送信局一中継局間リンクと中継局一受信局間リンクの干渉を防ぐためそれぞれ異なるチャネルを割り当てた。また送信局アンテナー中継局アンテナ間距離および中継局アンテナー受信局アンテナ間距離は波長の 60 倍に相当する 7.5m に設定した。そして中継局アンテナおよび受信局アンテナの近傍に雑音発生用アンテナを設置し、UA 中継局実験装置入力および地上受信局実験装置入力における受信 SNR が目標値となるように、可変減衰器によって雑音電力を変化させて実験を行った。本伝送系における各装置の配置図および実際の実験環境の写真を図 12 および図 13 に示す。

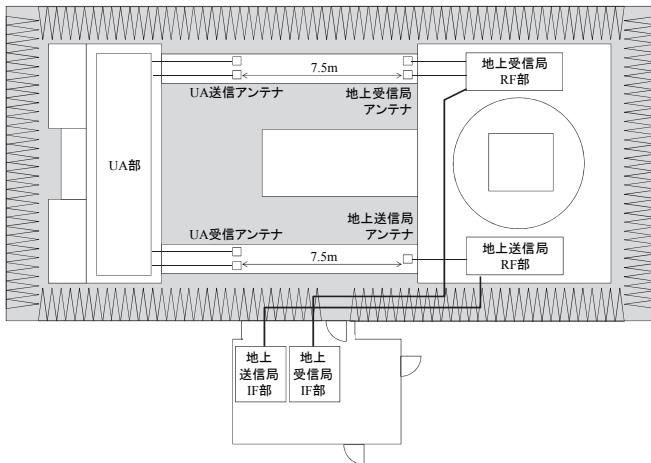


図 10 実験系配置図

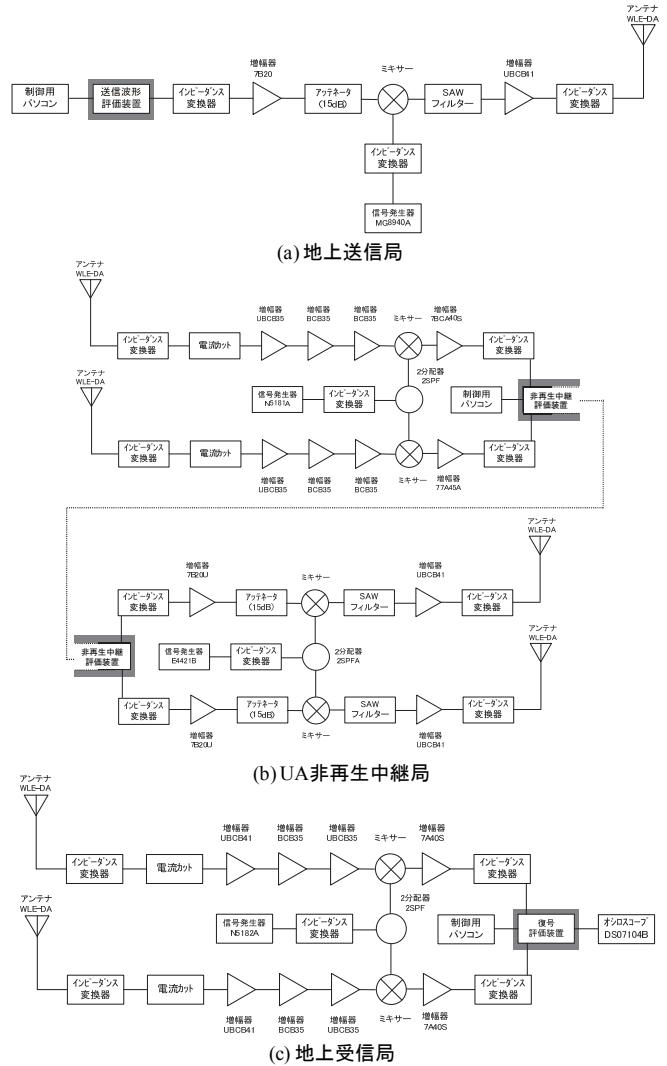


図 11 中継伝送実験系

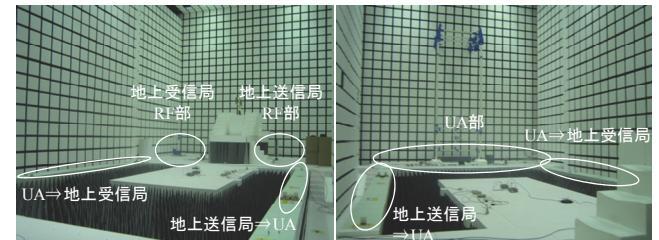


図 12 実験系外観（全体）

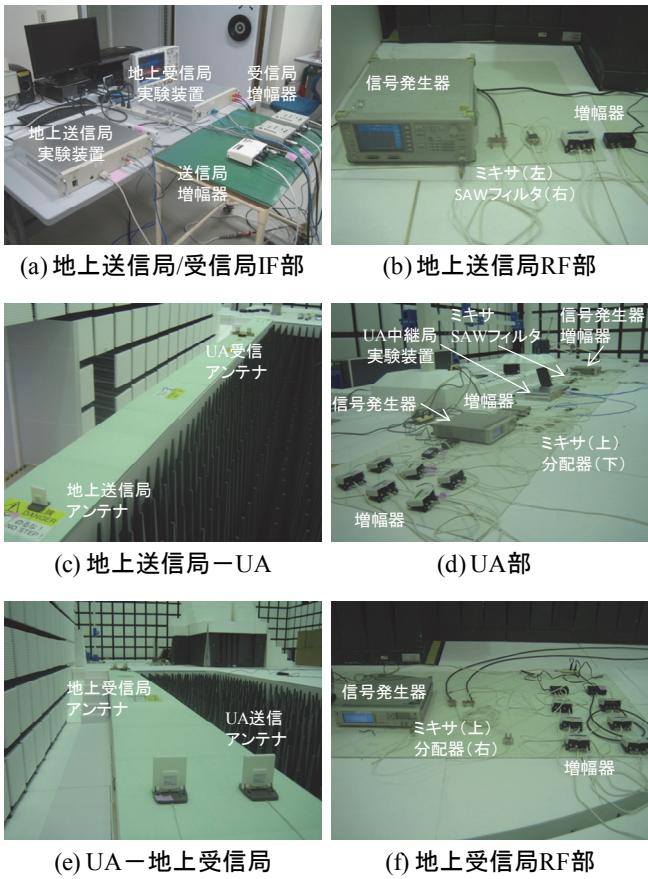


図 13 実験系外観（詳細）

4.2. 実験結果

STBC 復号後のコンスタレーションの一例と受信 SNR 対 PER 特性を測定した。1 パケットは 1440 ビットで構成され、QPSK データ変調を用いた。

図 14 に STBC-AF 中継を行った場合における STBC 復号後のコンスタレーションの一例を示す。UA 中継局、地上受信局における受信 SNR はそれぞれ 19dB とした。比較のため、協調中継を行わない場合のコンスタレーションも同様に図 14 に示す。図 15 より、STBC-AF 中継を用いて協調中継を行うことによってコンスタレーションの乱れを抑圧できていることが分かる。これは AF-STBC 符号化を行うことによってより大きな受信 SNR が得られたためであると考えられる。

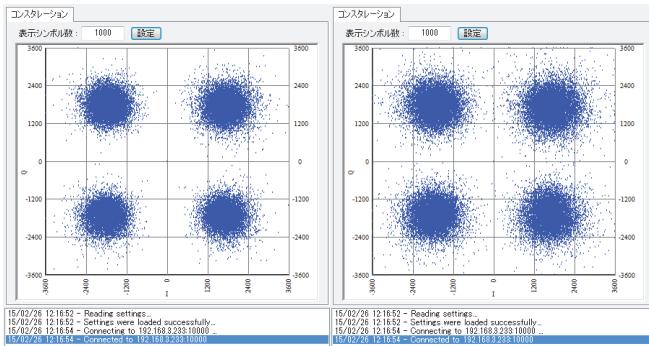


図 14 STBC 復号後のコンスタレーションの一例

図 15 に STBC-AF 中継を行った場合における地上受信局受信 SNR 対スループット特性を示す。UA 中継局受信 SNR は地上受信局受信 SNR と等しくなるようにした。また、比較のため協調中継を行わない場合のスループット特性も同様に図 15 に示す。また、それの場合におけるスループットの理論特性も同様に図 15 に示す。本稿では、パケット誤り率 (PER) を求め、次式を用いてスループット S を算出した。

$$S = \frac{1}{2} R (\log_2 Z) (1 - PER) \left(\frac{M}{N_c + N_g} \right) \left(\frac{N_b}{N_b + (\log_2 Z) M N_p} \right) \quad (1)$$

ただし、 $R=1$ は誤り訂正符号の符号化率であり、 $Z=4$ は変調多値数である。 $M=48$ は有効サブキャリア数であり、 $N_c=64$ および $N_g=16$ はそれぞれ FFT ブロックサイズおよび CP 長である。 $N_b=1440$ はパケットサイズ (bits) であり、 $N_p=2$ は 1 パケットあたりの (プリアンブル+パイロット+SIGNAL) ブロック数である。

図 15 より STBC-AF 中継を行うことで、協調中継を行わない場合と比較してスループット特性を改善できることがわかる。例えば、STBC-AF 中継は協調中継を行わない場合と比較して、ピークスループットの 90% 値 (0.48bps/Hz) を達成するための所要受信 SNR を約 3dB 低減できる。また、実験値と理論値を比較した場合、受信 SNR が大きくなるにつれて誤差が大きくなっていることがわかる。これは実験値における受信 SNR の測定誤差や、実験系の接続によるロスなどに起因するものと考えられる。しかしながら、理論値においても STBC-AF 中継伝送を用いた場合、協調中継を行わない場合と比較してスループット 0.48bps/Hz を達成するための所要受信 SNR を約 2dB 低減でき、実験値と理論値とでほぼ同等の SNR 低減量が得られている。

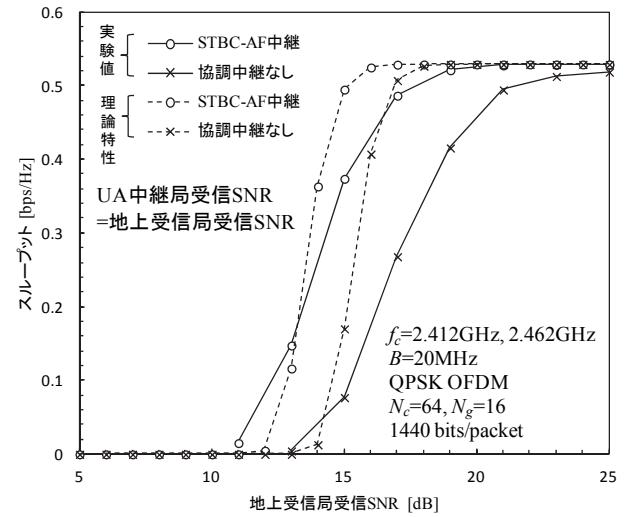


図 15 地上受信局受信 SNR 対スループット特性

5. むすび

本稿では、STBC-AF 中継実験装置を用いた中継伝送実験結果について述べた。この実験により、STBC-AF 中継を用いれば従来の AF 中継より高いスループットが得られることを確認した。また、ピークスループットの 90% 値 (0.48bps/Hz) を達成するための UA および地

上受信局における所要受信 SNR を約 3dB 低減できることを明らかにした。

謝　　辞

本稿は、総務省委託研究開発「無人航空機を活用した無線中継システムと地上ネットワークとの連携および共用技術の研究開発」による委託を受けて実施した研究開発による成果である。なお、中継伝送実験はマスプロ電工（株）の電波暗室を利用した。

文　　献

- [1] 三浦龍, 鈴木幹雄, 滝沢賢一, 小野文枝, 辻宏之, 井上真杉, 大和田泰伯, 浜口清, “小型無人航空機を用いた災害時無線中継システムの開発,” 信学会総合大会, BI-2-6, 2013年3月.
- [2] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital communications*, 5th ed., McGraw-Hill, 2008.
- [3] R. Van Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communication*, Artech House, 2000.
- [4] S. M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 16, No. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [5] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, “Space-time block coding for wireless communications: Performance results,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 17, No. 3, pp. 451-460, March 1999.
- [6] K. Takeda, T. Itagaki, and F. Adachi, “Applization of space-time transmit diversity to single carrier transmissionwith frequency-domain equalization and receive antenna diversity in a frequency-selective fading channel,” *IEE Proc. -Commun.*, Vol. 151, No. 6, pp. 627-632, Dec. 2004.
- [7] 遠藤力, 宮崎寛之, 安達文幸, ”中継局でチャネル情報を必要としない時空間ブロック符号化協調 AF 中継伝送,” *信学技報*, vol.114, no.8, RCS2014-11, pp.55-60, 2014年4月.
- [8] J. N. Laneman, G. W. Wornell, “Distributed Space-Time-Coded Protocols for Exploiting Cooperative Diversity in Wireless Networks,” *IEEE Trans. Inform Theory*, Vol. 49, No. 10, Oct. 2003.
- [9] J. N. Laneman, D.N.C Tse, and G. W. Wornell, “Cooperative Diversity In Wireless Networks: Efficient Protocols And Outage Behavior,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.50, No.12, pp.3062-3080, Dec.2004.
- [10] 守倉正博, 久保田周治, 802.11 高速無線 LAN 教科書, インプレスネットビジネスカンパニー, 2004.