

無人航空機システムにおける MIMO 時空間符号化中継

MIMO STBC Relay in Unmanned Aircraft System

安達文幸 宮崎寛之 遠藤力
Fumiyuki ADACHI Hiroyuki MIYAZAKI Chikara ENDO

東北大学大学院 工学研究科 通信工学専攻

Department of Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

1. まえがき

無人航空機 (UA) を用いる無線中継システムは、大規模な災害時に通信手段を迅速に提供できると期待されている[1]。しかし、地上局-UA 間リンクは距離変動や他の無線通信システムからの干渉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になるため、これを安定化する技術の採用が不可欠である。そこで筆者らは、UA の中継器構成を簡易に保ちつつ高品質・高安定な無線中継システムを実現する時空間符号化 (STBC) 協調中継技術について検討している。本稿では STBC 協調中継の原理を紹介した後、計算機シミュレーションによりその有効性を明らかにしている。

2. STBC 協調中継

図 1 に無人航空機システムにおける STBC 協調中継の概念図を示す。STBC 協調中継では、孤立地域と非孤立地域の上空に滞空する複数の UA で単一周波数ネットワーク (SFN) を形成して中継を行う。各 UA が分散アンテナとして動作することで高い空間ダイバーシチ効果を獲得できる。また STBC を導入することで、UA の構成を簡易に保ちつつ、優れた伝送品質を実現できる。

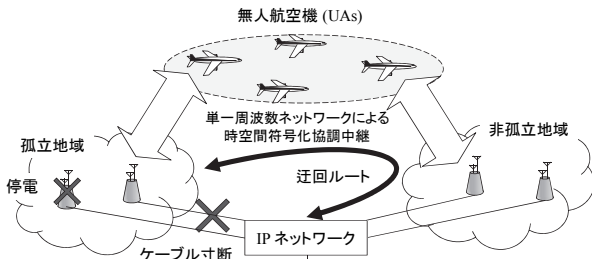


図 1 地上-UA 連携 STBC 協調中継

3. 中継方式

本論文では、STBC-再生転送 (DF) 協調中継および STBC-非再生転送 (AF) 協調中継について述べる。

(a) STBC-DF 協調中継

STBC-DF 協調中継の送受信機構成を図 2 に示す[4]。地上送信局および地上受信局はそれぞれ N_S 本および N_D 本のアンテナを、UA は 1 本のアンテナを搭載するものとし、 N_U 機の UA を用いて STBC-DF 協調中継を行うものとする (もちろん、 N_U 本のアンテナを搭載する 1 機の UA を用いても良い)。まず第 1 タイムスロットでは、地上送信局でデータ変調後の送信ブロックに、送信アンテナが N_U 本ときの STBC 符号化と $N_S \times N_U$ 送信等化とを行って、UA に向けて送信する。 N_U 機の UA では、UA 間で受信信号を共有して STBC 復号した後、データ復調する。そして再データ変調と送信アンテナが N_U 本ときの STBC 符号化とを行った後、第 2 タイムスロットにおいて、 N_U 機の UA が地上受信局に向けて同時送信する。地上受信局では、受信信号に受信等化と STBC 復号した後、データ復調する。こ

のように、地上送信局→UA 間リンクでは送信等化[2]を、UA→地上受信局リンク間では受信等化[3]をそれぞれ用いることにより、地上送信局→UA 間リンクと UA→地上受信局リンクの両方で最大比ダイバーシチ利得を得ることができる。また STBC 符号化率を低下させることなく、任意の本数の地上局アンテナを利用できる。しかし、UA 側で STBC 復号を行うために受信信号を共有する必要がある。

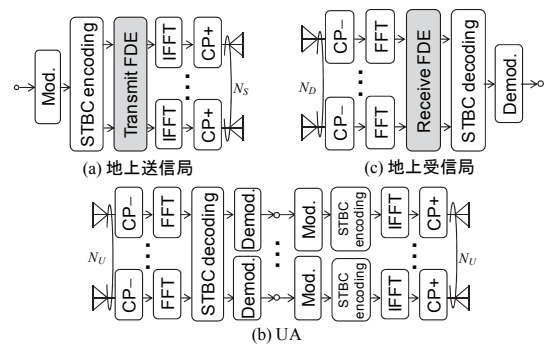


図 2 STBC-DF 協調中継

(b) STBC-AF 協調中継

STBC-AF 協調中継における送受信機構成を図 3 に示す。地上送信局および地上受信局はそれぞれ $N_S=1$ 本および N_D 本のアンテナを搭載するものとし、 $N_U=2$ 機の UA (または 2 本のアンテナを搭載する 1 機の UA) を用いて STBC-AF 協調中継を行うものとする。まず第 1 タイムスロットでは、地上送信局が 2 ブロックからなる送信信号を UA に向けて送信する。UA#0 では受信信号をそのまま増幅し、UA#1 では受信信号に複素共役演算およびブロック入れ替えを適用して増幅する[5]。これが 2×2 転置 STBC 符号化である。そして第 2 タイムスロットにおいて、UA#0 および UA#1 が地上受信局に向けて同時送信する。地上受信局では、受信等化と STBC 復号を行う。 2×2 転置 STBC 符号化行列は、良く知られた 2×2 STBC 符号化行列[3]を転置したものであり、極めて簡単である。

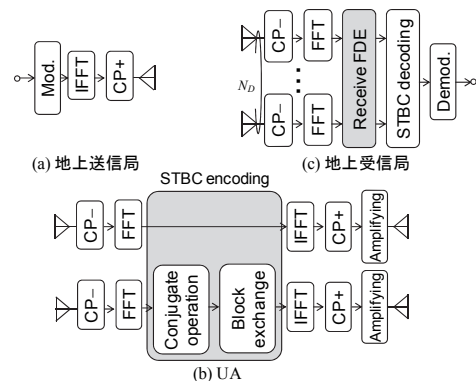


図 3 STBC-AF 協調中継

このような STBC-AF 協調中継の UA では、チャンネル情報 (CSI) ばかりでなく等化および復調処理も必要としないため、STBC-DF 協調中継に比べて UA の中継器構成をかなり簡易にできる。また、STBC-DF と同様に、STBC 符号化率を低下させずに任意の本数の地上受信局アンテナを用いることができる。STBC-DF 協調中継と STBC-AF 協調中継の特徴を表 1 にまとめる。STBC-AF 協調中継では、STBC-DF 協調中継より伝送品質が劣化するものの、UA の中継器構成をより簡易にできる。また STBC-DF 協調中継では送信等化および受信等化を行うために、地上送信局と地上受信局の両方で CSI を必要とする。一方、STBC-AF 協調中継では、地上受信局でのみ CSI を必要とする。さらに STBC-DF 協調中継では STBC 復号を行うために UA 間で信号の共有が必要（もちろん N_U 本のアンテナを搭載する 1 機の UA を用いる場合には問題はない）であるが、STBC-AF 協調中継では UA 間で信号の共有を必要としない。ただし、STBC-DF 協調中継では任意の本数の地上送信局アンテナを利用できるが、STBC-AF 協調中継では地上送信局アンテナ本数が 1 本に限られる。なお、STBC-DF 協調中継および STBC-AF 協調中継ともに、STBC 符号化率を低下させずに任意の本数の地上受信局アンテナを利用できる。

表 1 STBC-DF 協調中継と STBC-AF 協調中継の比較

方式名		STBC 符号化率を低下させずに利用できるアンテナ本数	CSI	UA 間の信号の共有
STBC-DF	地上送信局	任意	必要	必要
	UA	≤ 2	不要	
	地上受信局	任意	必要	
STBC-AF	地上送信局	1	不要	不要
	UA	≤ 2	不要	
	地上受信局	任意	必要	

4. 計算機シミュレーション

地上送信局、UA および地上受信局アンテナ本数 (N_S , N_U および N_D) を $N_S=N_U=N_D=2$ とし、STBC-AF 協調中継では、 N_S 本のアンテナのうち 1 本をランダムに選択した。データ変調が QPSK、サブキャリア数が 64 でサイクリックプレフィックス長が 16 シンボルの OFDM を用いた。1 時空間符号語内におけるチャンネルの時間変動は無視できる準静的周波数選択性仲上・ライスフェージングを仮定した。また、仲上・ライスフェージング K ファクタは $K=10$ とした。パス数 L は $L=8$ とし、減衰指数 $\beta=3\text{dB}$ の指数減衰電力遅延プロファイルを仮定した。また、地上送信局および地上受信局では、CSI が理想的に得られるものと仮定した。

STBC-DF/AF 協調中継を行った場合の UA および地上受信局における平均受信 SNR $\Gamma_{S,U}$, $\Gamma_{U,D}$ 対スループット特性を図 4 に示す。1 パケットが 1,536 ビットのパケットを送信し、パケット誤り率 PER を測定して、次式を用いてスループット $S(\text{bps/Hz})$ を求めた。

$$S = \frac{1}{2} (\log_2 M) (1 - PER) \frac{N_c}{N_c + N_g} \quad (1)$$

ここで、 M は変調多値数であり、QPSK 変調のとき $M=4$ である。また比較のため、協調中継を行わない従来の AF 中

継 ($N_S=N_U=N_D=1$) のときのスループットも図 4 に示した。図 4 より STBC-DF/AF 協調中継は従来の AF 中継より常に優れたスループットを達成できることが分かる。たとえば、所要スループットが 0.72bps/Hz のとき、STBC-DF (AF) 協調中継は、従来の AF 中継より、地上送信局の所要送信電力を約 6dB (2dB), UA 所要送信電力を約 6dB (5dB) 低減できる。

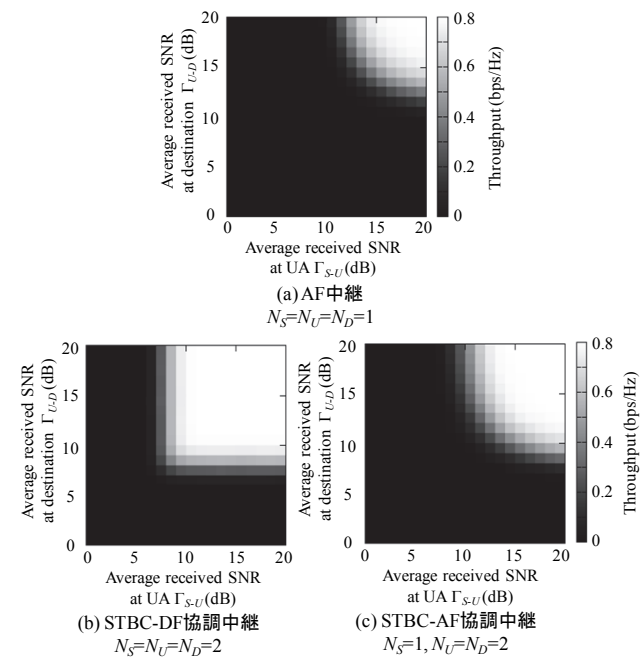


図 4 スループット特性

5. まとめ

本論文では、UA の中継器構成を簡易に保ちつつ高品質な無線中継の実現を目指した STBC-DF/AF 協調中継について述べた。計算機シミュレーションにより、STBC-DF および AF 協調中継は従来の AF 中継より地上および UA 送信局の所要送信電力を低減できることを示した。

謝辞

本論文は、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」によるものである。

参考文献

- [1] 三浦ら, 信学会総合大会, BI-2-6, 2013 年 3 月.
- [2] H. Tomeba et al., IEICE Trans. commun., vol. E90-B, No. 3, pp. 5597-606, Mar. 2007.
- [3] V. Tarokh et al., IEEE J Sel. Areas Commun., vol. 17, no. 3, pp. 451-460, Mar. 1999.
- [4] 宮崎ら, 信学会ソサイエティ大会, B-5-39, 2013 年 9 月
- [5] 遠藤ら, 信学技報, vol. 114, no. 8, RCS2014-11, pp. 55-60, 2014 年 4 月