

## 目次

## 1. はじめに

ドローンを用いたネットワークにおいて、オーバーリーチの問題を解決するために送信信号の届く中継局まで一度に中継する CTR (Cooperation Through Relay) 方式 [1] を提案している. 本稿では, 提案手法において干渉/誤りが生じた際のスループット特性を従来方式と比較し評価する.

表 1: Modulation and Coding Table

TR [Mbps]	Modulation	Coding	Rmin [dBm]
6	BPSK	1/2	-82
9	BPSK	3/4	-81
12	QPSK	1/2	-79
18	QPSK	3/4	-77
24	16QAM	1/2	-74
36	16QAM	3/4	-70
48	64QAM	2/3	-66
54	64QAM	3/4	-65

## 2. 従来方式の概要

図 1 に従来方式である概要を示す. 従来の中継伝送では 1 ホップずつ中継するが, 自由空間では, 伝搬損失が少ないため送信信号が中継先のドローン (図 1#3) より遠くのドローン (図 1#4) に到達することで干渉が生じる. そのため, 従来方式はオーバーリーチ干渉によってパケットの再送によってチャネルの利用効率が低下する. また, 従来方式で干渉が生じ, 再送を行う際には, フォールバック制御により伝送レートを下げることによって SNR (Signal to Noise Ratio) が低くてもパケットを受信できるようにしているが, 伝送レートの低下に伴って送信時間や再送によるオーバーヘッドが増加してしまう課題がある.

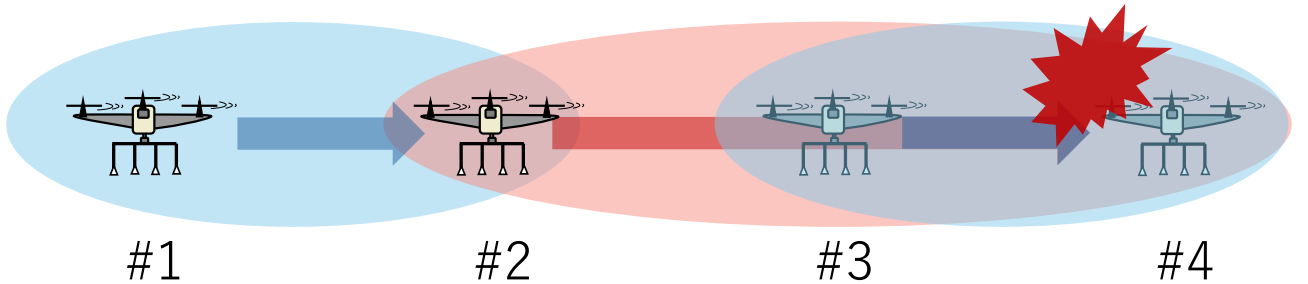


図 1: 従来方式の概要

## 3. CTR 方式の概要

オーバーリーチ干渉は送信信号が中継局のドローンを超えて他のドローンに干渉することで発生する. そこで CTR 方式では直線状に存在する中継局が協調することによってオーバーリーチ干渉の問題を解決する. 図 2 に示す CTR 方式は, 送信信号の届く範囲の最終中継局 (図 1#4) まで一度に信号を送信し, 通信経路の中継局 (図 1#3) も協調してパケットを受信する. 最終中継局がパケットを正常に受信した場合は, 以後, 同様の手順で中継する. 最終中継局がパケットの受信に失敗した場合は, 直線経路の中継局 #3 が #4 の代わりに次の中継局へパケットを中継する. そのため従来方式ではオーバーリーチ干渉が生じる環境でも CTR 方式ではオーバーリーチ干渉が減り中継ホップ数も減るので中継オーバーヘッドも削減することができる.

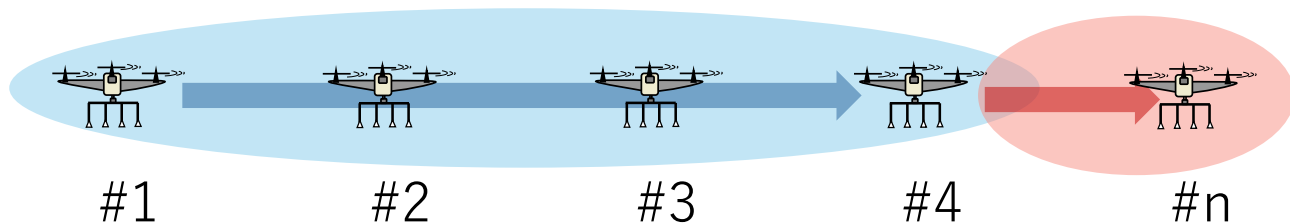


図 2: CTR 方式の概要

図 3 に CTR 方式の詳細なアクセス制御手順を示す。本方式では、最終中継局がパケットを受信できなかった場合でも中継を継続できる仕組みが導入されている。送信局がランダムなバックオフ時間の後、ACK (Acknowledgement) duration を記述したパケットを送信する。パケットを受信した中継局は、指定された ACK duration 後に送信局へ ACK を返信する。ACK duration はスロットタイムで区切られ、最終受信中継局が最短の ACK duration を持ち、送信局に近づくにつれてスロットタイムが 1 ずつ増加する設計となっている。これは送信電力の制御や、各端末の SNR (Signal-to-Noise Ratio) および受信電力閾値に基づく自律的な判断を行い信号が到達する最大範囲を推定することでスロットタイムが適切に設定される仕組みとなっている。具体的には、図 3#4 がパケットを受信した場合、スロットタイムは受信電力より#3,#2 の順番で増加し、送信局の #1 に ACK を返信すると、経路上の中継局である#2,#3 は ACK の送信待ちをキャンセルする。最終受信中継局 (図 3#4) がパケットの受信に失敗した場合は#3 が送信局の#1 に ACK を送信し、#4 の代わりとして中継を続行する。これにより、従来方式の再送でのオーバーヘッドの増加や、フォールバック制御による伝送レートを低下を防ぐことができる。

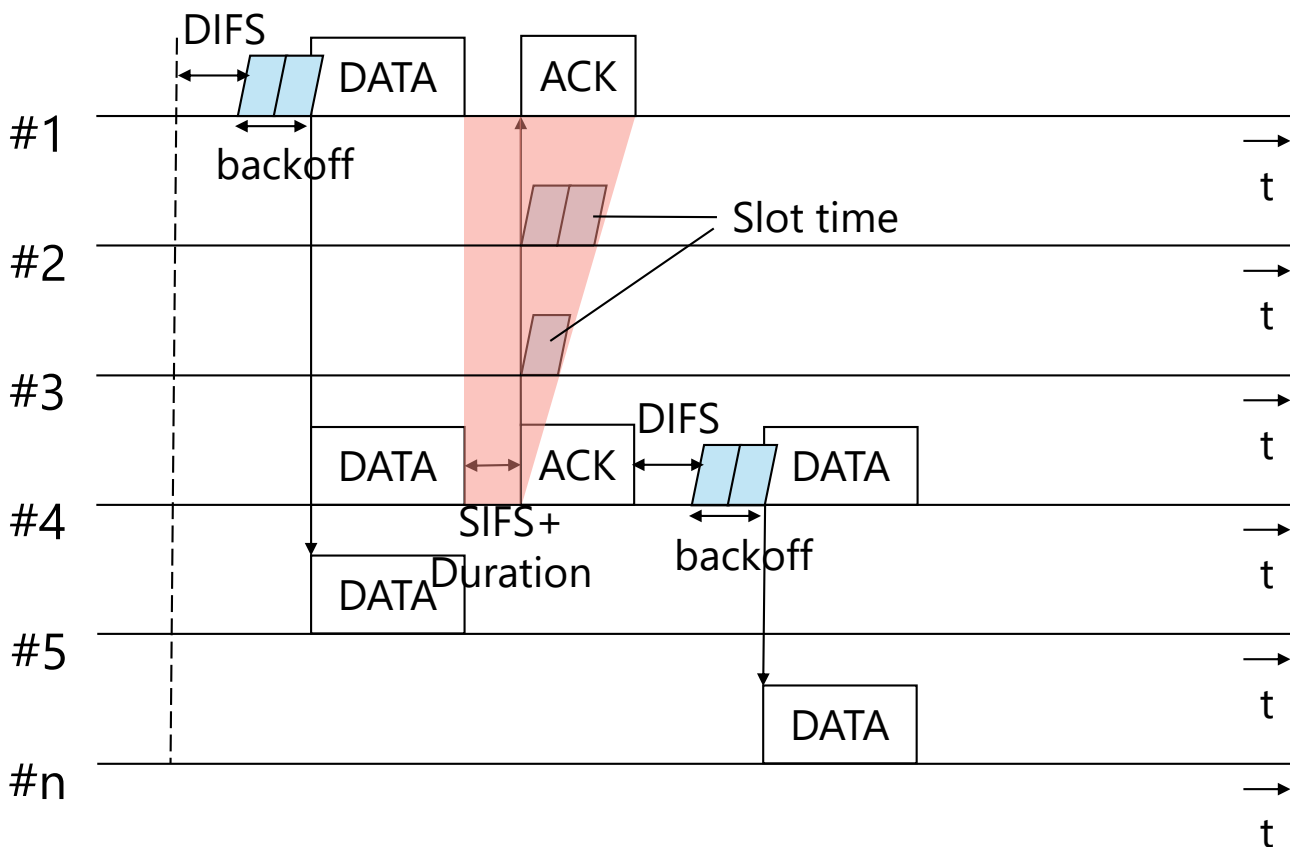


図 3: CTR 方式のアクセス制御

#### 4. CTR 方式の評価

##### 4.1. 誤りが無い条件での CTR 方式の評価

CTR 方式の特徴である中継局をスルーすることによるスループットの向上を以下の条件で従来方式と比較する。中継の総伝送距離は 1000m とし、50m 間隔で直線状に 20 台のドローンを配置した。アンテナの送受信利

得は 0dBi, 送信電力は 10dBm とした. 周波数は 2.4GHz, 伝送レートは IEEE 802.11a を参考にし, 伝搬損失は自由空間伝搬損失とした. 評価内容は従来の 1 ホップ中継 (54Mbps) と中継局を 2 台スルー (24Mbps) した場合, および中継局を 3 台スルー (18Mbps) した場合におけるスループット特性を確認する. 括弧内は使用可能な最も高い伝送レートである. これは受信電力より IEEE 802.11a の MCS (Modulation and Coding Scheme) index から選択する.

図 4 に CTR 方式のスループット特性を示す. 従来の 1 ホップ中継と比べて CTR 方式で中継局を 3 台スルーした条件では約 2 倍のスループットが得られた. ドローンをスルーする場合は, 通信距離が長くなり使用可能な伝送レートが低下するが, アクセス制御やプリアンプル等のオーバーヘッドとのトレードオフになる. その結果, ネットワーク全体の通信効率において, 中継局を 3 台スルーする条件が最も高くなることを確認した.

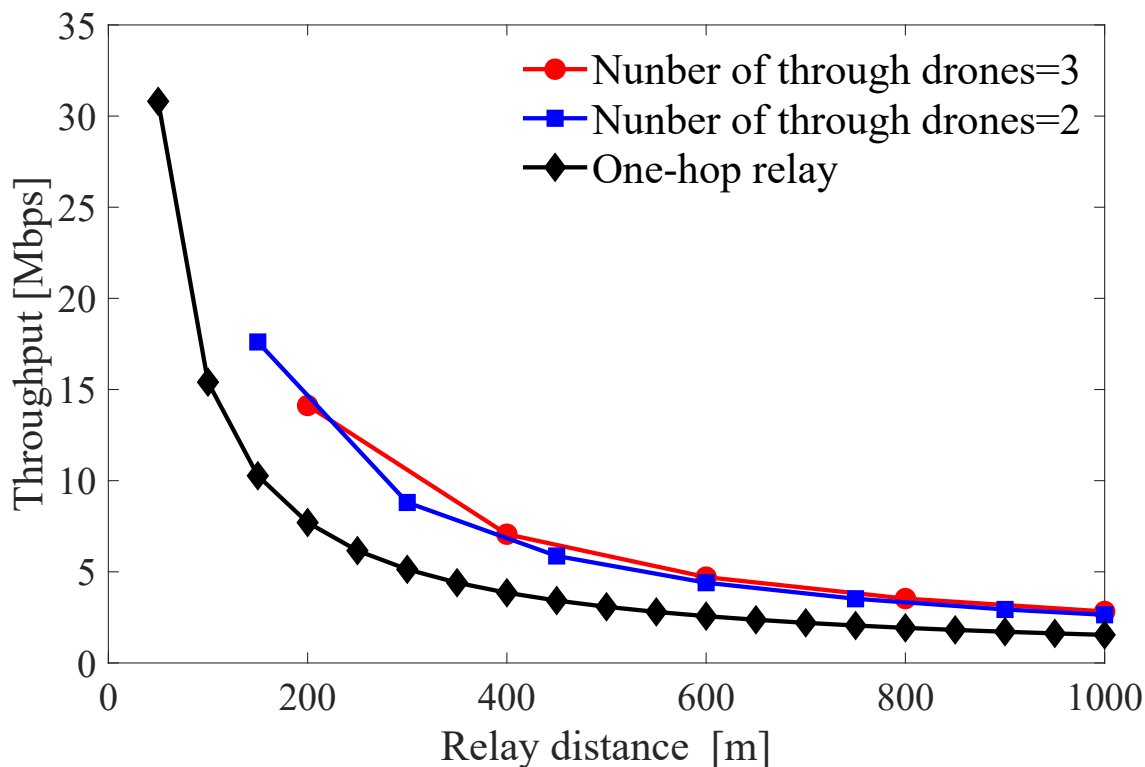


図 4: CTR 方式のスループット特性

#### 4.2. 誤りを生じる条件での CTR 方式の評価

CTR 方式のもう一つの特徴は, 中継時に誤りが発生した場合, 経路上の中継局が代替して中継を行うことにより, 従来方式と比較してスループットが向上する点である. この特性を, 4.1 の条件に基づいて従来方式と比較する. 伝送レートは 4.1 の評価結果に基づき, 18Mbps とする. 誤りが生じた際, 従来方式ではフォールバック制御により伝送レートを 1 つ下の 12Mbps に変更し, その後の再送信は必ず成功するとする. これに対して, CTR 方式では, 誤りが生じた際, 正しく受信できなかった中継局の 1 つ手前の中継局が必ず代替して中継できるとする. この時パケットの誤り率を 0% から 100% まで変化させたときの従来方式と CTR 方式の 1000m 地点での最終的なスループット特性を比較した.

図 5 に誤り率が変化するときスループットを示す. この結果から, 誤り率が増加するほど従来方式よりスループットが高くなっているため, 従来方式よりも CTR 方式は干渉等によって局所的に誤り率が上がる条件 (受信局) でも高効率に中継伝送が可能なことを確認した. また, 誤り率が増加するにつれて従来方式と CTR 方式のスループットは減少しているが, CTR 方式では誤り率によってスループットが緩やかに減少する部分がある. これはパケットの送信回数に関係していると考えられる. 図 6 には誤り率に対しての平均送信回数を示す. 図 6 より従来方式の送信回数は誤り率に対して線形的に変化しているが, CTR 方式の送信回数は線形的には変化していない. これは, CTR 方式で誤りが生じた際に, 一つ前の中継局が通信を代替するからで, その結果, パケットの誤り率が増加しても送信回数の増加は緩やかに抑えられる. この送信回数の抑制により CTR 方式のスループットは従来方式と比較して減少が緩やかになる部分があると考えた.

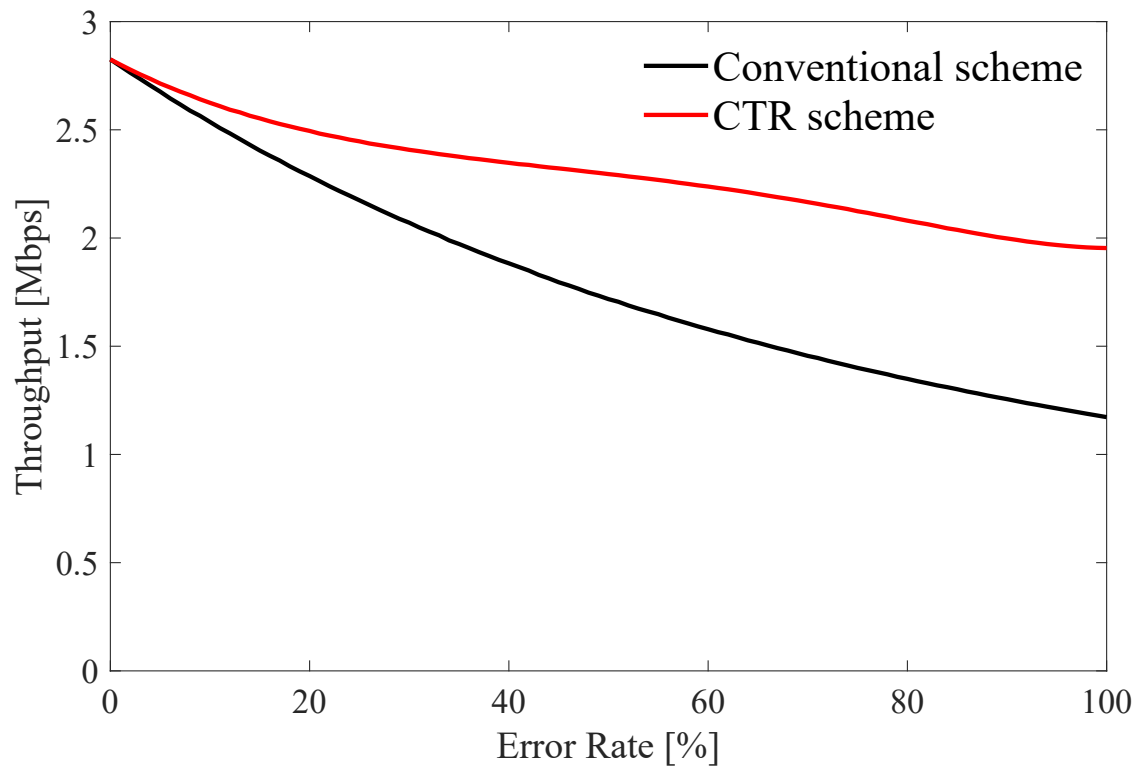


図 5: 誤り率に対するスループット特性

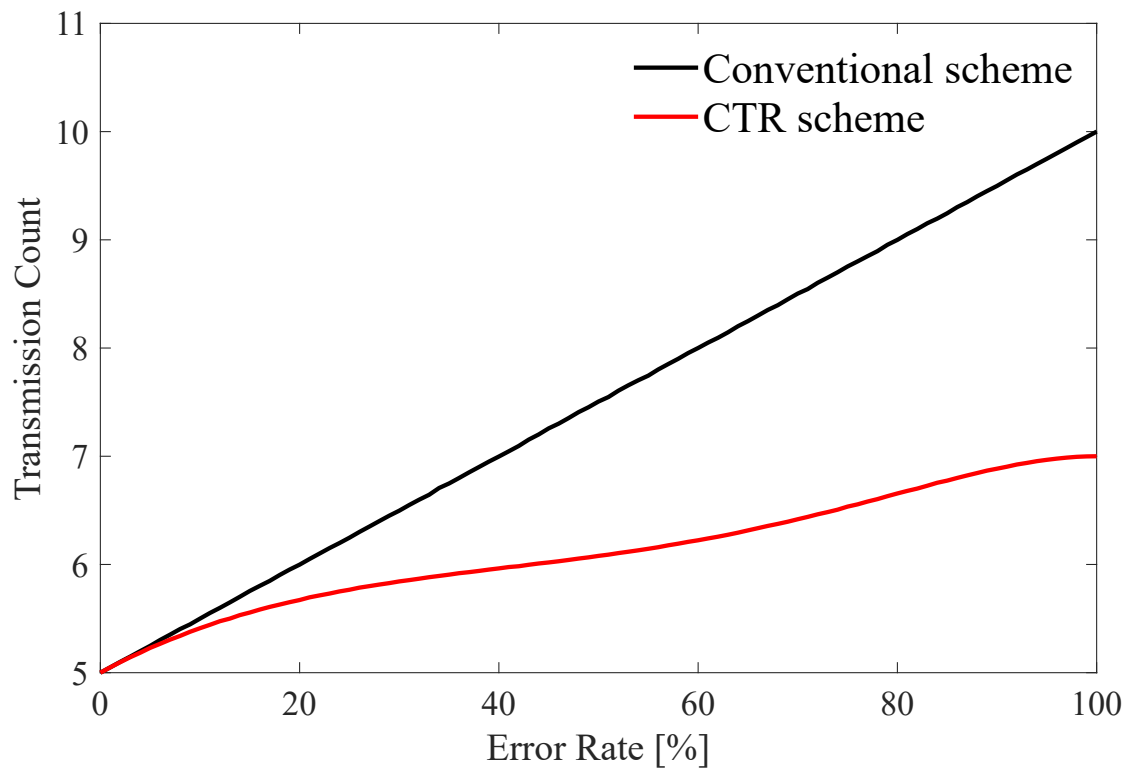


図 6: 誤り率に対しての平均送信回数の変化

## 5. まとめ

本稿では, 直線に配置されたドローン中継伝送におけるオーバリーチ干渉の影響を解決するために, 送信信号の届く中継局まで一回で中継する CTR 方式を検討した. CTR 方式と従来の方式で誤りが生じた場合と生じない場合のスループット特性を計算し比較した. この結果からいずれの条件でも CTR 方式はスループットが従来方式より高いことがわかった. CTR 方式では誤りが発生した場合においても再送信時にフォールバック制御による伝送レートの低下や中継時間の増加を防ぐことができるため, 高効率な中継伝送が可能である.