

無線中継局と干渉除去における ブロードキャスト通信に関する考察

西田 昇平¹ 山崎 景太² 猿渡 俊介² 渡辺 尚¹

概要：無線通信を使用する端末が増加傾向にあることから無線資源の利用効率を高めることが求められている。これに向けて、2つの端末に対する異なる2つの信号を1つの信号に重畳して送信することができる重畳符号化や、2つの端末から送信される異なる2つの信号を1度に受信することができる逐次干渉除去による無線通信のスループット向上が期待されている。本稿では、重畳符号化および逐次干渉除去をマルチホップ通信と組み合わせることにより、基地局が宛先端末まで直接通信するよりも高速に通信できる通信方式について述べる。評価では、計算機シミュレーションを用いて直接送信する場合よりも高速な通信を実現することを示す。

1. はじめに

無線通信を利用する電子機器の数は今後も増加し続けると予想されている。フィーチャーフォンに取って代わり高い普及率を達成しているスマートフォンだけでなく、タブレット端末なども利用者を増やし続けている。総務省が公開している平成25年度版情報通信白書[1]でも無線通信を利用する電子機器の数は上昇傾向にあることが示されている。一方で、無線通信が利用できる電波資源は有限であるため、無線通信を利用する電子機器の数が増えるほど、利用できる電波資源が減少していく。この電子機器の増加に対応するために、限られた電波資源を高効率に利用することが求められている。

これに向けて、電波資源の利用効率を上げるための技術が数多く提案されている。著者らは電波資源の利用効率を上げる手法の中でも干渉除去技術に着目している。干渉除去技術は、異なる2つの信号が重なってできた信号を両方復調する技術である。この干渉除去技術を受信側の端末で用いることで、異なる2つの端末から送られる信号が衝突しても2つの信号の両方を受信する逐次干渉除去[2,3]が提案されている。また、異なる2つの端末宛ての信号を重畳して送信することで同時に2つの端末宛てに信号を送信する重畳符号化[4-11]などが研究されている。

重畳符号化や逐次干渉除去は1度の通信で2つの端末に対して同時に送信、または2つの端末から同時に受信することができる。干渉除去技術で使用する2つの通信路にお

ける伝搬損失差が大きければ大きいほど得られる利得が大きくなる特徴がある。しかしながら、2つの通信路における伝搬損失の差が小さいときや、宛先となる端末が1つしか存在しない場合は逐次干渉除去や重畳符号化による利得が得られない。

このような観点から、本稿では、伝搬損失の差を大きくするために中継局を用いて干渉除去技術を活かすことで、干渉除去技術では考えられていなかった1対1の通信速度の向上を達成するTaiji Castを提案する。Taiji Castはまず、1回目の通信で基地局が重畳符号化を用いて宛先端末と、基地局と宛先端末の間にある中継局にフレームを送信する。次に、2回目の通信で基地局と中継局が同時にフレーム送信して、宛先端末で逐次干渉除去を用いて2つのフレームを受信する。中継局を用いた通信によって干渉除去技術による利得を大きくすることでスループットの向上を達成する。シャノン＝ハートレーの定理に基づいた評価では基地局と宛先端末の中央に中継局を配置した場合、基地局から宛先端末まで直接フレームを送信する場合と比較して高いスループットを達成することが分かった。Taiji Castの物理層で使用することを前提としている重畳符号の計算機シミュレータ上で評価した結果、基地局から宛先端末まで直接送信するよりも高いスループットを達成する場合が存在することが分かった。

本稿の構成は以下の通りである。2節では、関連研究として逐次干渉除去、重畳符号化について述べる。3節では、提案手法であるTaiji Castの動作について述べる。4節では、提案手法であるTaiji Castと基地局から宛先端末まで直接送信する方式と比較する。最後に5節でまとめとする。

¹ 大阪大学情報科学研究科

² 静岡大学情報科学研究科

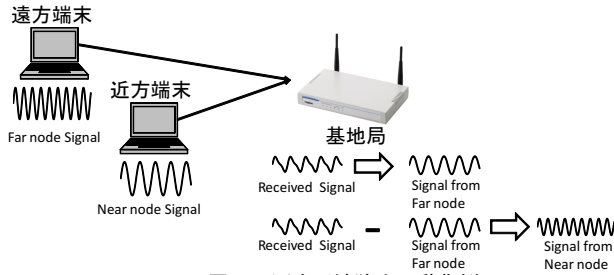


図 1 逐次干渉除去の動作例

2. 関連研究

本研究では、逐次干渉除去や重畳符号化を有効利用することで通信速度を向上させることを目標としている。逐次干渉除去とは、2つの端末から送信された信号を各端末と基地局の間に発生する伝搬損失の差を利用することで、2つの信号を両方とも復調する技術である [2, 3]。

図 1 に逐次干渉除去の動作例を示す。図 1 では、遠方端末と近方端末が基地局に対して異なるフレームを同時に送信している。近方端末は遠方端末よりも基地局に近い位置にあることを想定している。近方端末から基地局までの通信路は遠方端末から基地局までの通信路よりも伝搬損失が低い。同時に送信された信号は、信号同士が重なった状態で基地局に届く。基地局ではまず、信号の電力の減衰が小さい近方端末からの信号を復調する。近方端末からの信号の復調では遠方端末からの信号をノイズとして扱う。基地局で近方端末からの信号を復調してフレームを取得した後、取得したフレームを再び変調することで近方端末からの信号を作成する。作成した近方端末からの信号を受信信号から減算することで遠方端末からの信号だけが残るため、残った信号を復調することで遠方端末からのフレームを取得する。

重畳符号化とは、2つの信号を分離できる逐次干渉除去の技術によって、2つの信号を重ね合わせて2つの端末に同時に異なるフレームを送信する技術である。

図 2 に重畳符号化の動作例を示す。図 2 では、基地局が重畳符号化を用いて遠方端末と近方端末に対して異なる2つのフレームを同時に送信している。近方端末は遠方端末よりも基地局に近い位置にあることを想定している。近方端末から基地局までの通信路は遠方端末から基地局までの通信路よりも伝搬損失が低い。基地局は、伝搬損失の低い通信路を通る近方端末宛ての信号に低い電力を割り当て、伝搬損失の高い通信路を通る遠方端末宛ての信号に高い電力を割り当てる。電力を割り当てた2つの信号を重ねて1つの重畳信号を作成する。基地局から送信された重畳信号は遠方端末と近方端末に到達後、各端末によって復調される。まず、遠方端末での復調について説明する。遠方端末では重畳信号のうち、低い電力を割り当てられた近方端末

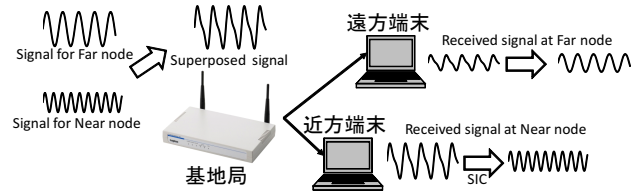


図 2 重畳符号化の動作例

宛ての信号をノイズとして扱い、重畳信号を復調することで遠方端末宛てのフレームを取得する。次に、近方端末での復調について説明する。近方端末では逐次干渉除去を実行する。近方端末では遠方端末と同様に重畳信号を復調して遠方端末宛てのフレームを取得する。取得した遠方端末のフレームを変調して遠方端末宛ての信号を復元する。復元した遠方端末宛ての信号を受信した重畳信号から減算することで近方端末宛ての信号を取り出す。最後に近方端末宛ての信号を復調することで近方端末宛てのフレームを取得する。

重畳符号化はブロードキャスト通信路容量を達成できることで知られている。 P_{far} [mW] を遠方端末宛て信号に割り当てる送信電力、 P_{near} [mW] を近方端末宛て信号に割り当てる送信電力、 h_{far} を基地局と遠方端末間のチャネル、 h_{near} を基地局と近方端末間のチャネル、 N [mW] をノイズとする。シャノン＝ハートレーの定理 [12] より、基地局から遠方端末までの通信路容量 C_{far} は、チャネル h_{far} を通過する遠方端末宛ての信号に同じチャネル h_{far} を通過する近方端末宛ての信号がノイズとなるため、次の式で表わされる。

$$C_{far} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{far}|h_{far}|^2}{N + P_{near}|h_{far}|^2} \right) \text{ [bits/s/Hz]}$$

基地局から近方端末までの通信路容量 C_{near} は、遠方端末宛ての信号を完全に除去できたと仮定すると、次の式で表わされる。

$$C_{near} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{near}|h_{near}|^2}{N} \right) \text{ [bits/s/Hz]}$$

2つの通信路のチャネル h_{far} , h_{near} に差がある場合、遠方端末と近方端末に時分割で通信したときの通信路容量よりも重畳符号化を用いて同時に通信したときの通信路容量のほうが大きくなることが示されている [3]。

このような重畳符号化の同時通信の特性を用いて通信品質を改善するための研究がなされている。重畳符号化の MAC プロトコルを考案する研究 [8–10] では、様々な制御フレームにより重畳符号化のもつブロードキャスト通信路容量を活かして、通信品質を改善している。他にも、重畳符号化をネットワークコーディングと組み合わせることで通信品質を改善する研究 [7]、重畳符号化をレートレス符号化と組み合わせることで通信品質を改善する研究 [13, 14] などが挙げられる。

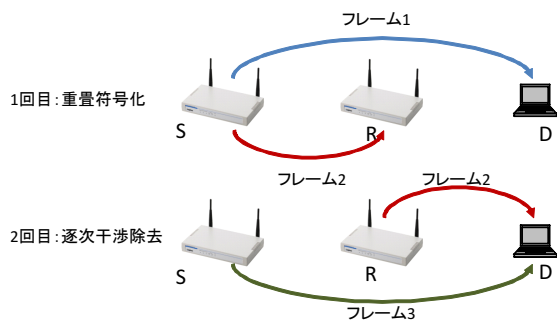


図 3 Taiji Cast の全体像

通信品質を改善する技術である重畳符号化を用いた通信には解決しなければならない問題が3つ存在する．1つ目は、実際に2つの信号を分離しようとした際に、従来の変調方式では2つの信号の分離が難しいため、ブロードキャスト通信路容量に近い通信路容量を達成することが困難であるという問題である．信号の規則性から、近方端末宛ての信号が遠方端末宛ての信号の復調に影響を与えるからである [4, 5]．これに向けて、ランダムな信号点を作成する符号化と組み合わせることで重畳信号を分離しやすくする重畳 Spinal 符号 [15] が提案されている．重畳 Spinal 符号の復号では、重畳符号化の2つの通信路でシャノン限界に近い伝送レートを達成している．2つ目は遠方端末への伝送レートと近方端末への伝送レートが異なるため、伝送時間が余計にかかる場合が存在する問題である．重畳符号化を固定電力で割り当てたとき、伝送レートが固定される．遠方端末までの伝搬損失や近方端末までの伝搬損失や各端末へのデータ量によっては、重畳信号の復調にかかる時間が時分割で送信した場合よりも大きくなる．これに向けて、各端末へのデータ量に応じて電力を割り当てることで、伝送にかかる時間を短縮する Traffic-aware Superposition Coding Media Access Control (TSPC-MAC) [11] が提案されている．重畳符号化を用いる場合よりも直接送信した方が高いスループットとなることが予想された場合、直接送信する方式に切り替える操作を組み入れる工夫などが実装されていて、高い性能向上が確認されている．3つ目は2つの通信路に伝搬損失に差がない場合や、宛先端末が1つしか存在しない場合に重畳符号化通信による利得が得られない問題である．これまでの重畳符号化に関する研究では、基地局と2つの端末の間の伝搬損失に差がある2つの端末を対象として重畳符号化を用いる場合を想定している．1対1による通信でも重畳符号化の利得を得ることができれば、重畳符号化を用いた通信プロトコルに更なる効率向上をもたらすことができる．

3. Taiji Cast

2節で述べたように、干渉除去技術を1対1の通信にお

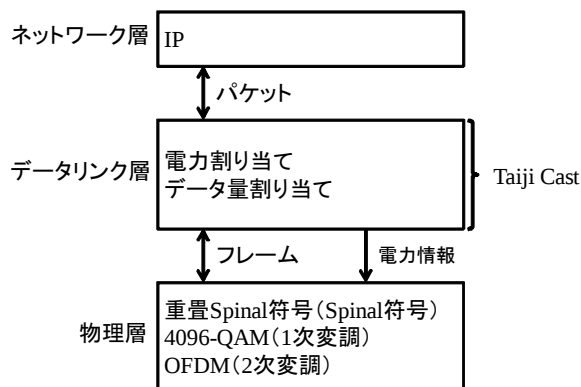


図 4 Taiji Cast の位置づけ

いて使用しても利得が得られない．これに対して、本稿では Taiji Cast を提案した．Taiji Cast とは基地局と端末の間にある中継局を利用して、意図的に基地局から中継局までの通信路と基地局から宛先端末までの通信路の2つの通信路に伝搬損失差を作成して、利得を大きくした逐次干渉除去と重畳符号化を利用する通信方式である．

3.1 全体像

図3に Taiji Cast の全体像を示す．Taiji Cast では基地局 S と宛先端末 D の間に存在する中継局 R を利用して、干渉除去技術に重要な伝搬損失差を作成する．作成した伝搬損失差を利用して、基地局 S は重畳符号化を用いて中継局 R と宛先端末 D にフレームを送信する1回目の通信と、基地局 S と中継局 R から送られるフレームを宛先端末 D が逐次干渉除去を用いて同時に2つのフレームを受信する2回目の通信を用いる．この動作を用いて、Taiji Cast は基地局 S から宛先端末 D まで直接送信する手法よりも高速に通信する．

図4に Taiji Cast の OSI 参照モデルにおける位置づけを示す．ネットワーク層から送られてくるパケットに対して、データリンク層の MAC では図3で示した2回の通信に分けて送信する動作とは別に電力・データ量割り当てを行う．割り当てたデータ量に分割したフレームと割り当てた電力を物理層に送る．物理層では、データリンク層から送られたフレームを電力割り当ての情報にしたがって重畳 Spinal 符号または Spinal 符号を用いて符号化することを前提としている．作成した符号語を 4096-QAM を用いて1次変調、OFDM を用いて2次変調して送信する．

本稿では、Taiji Cast の詳細について述べる．3.2節で送信手順について述べる．3.3節で request to send (RTS) と clear to send (CTS) の詳細について述べ、最後に3.4節で各フレームのデータ量と電力の割り当て方法について述べる．

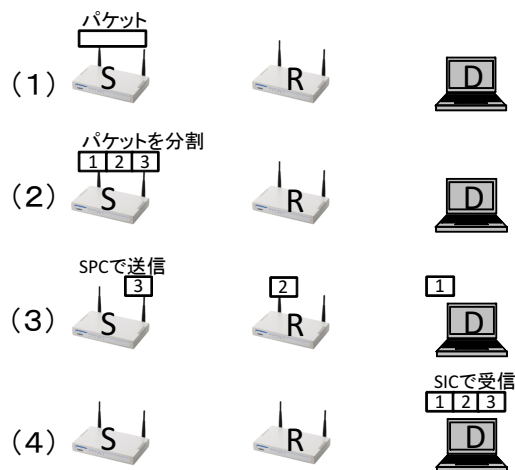


図 5 送信手順

3.2 送信手順

Taiji Cast の送信手順について述べる。Taiji Cast の送信処理は (1) RTS/CTS, (2) 電力・データ量割り当て, (3) 1 回目の重畳符号化を用いた通信, (4) 2 回目の逐次干渉除去を用いた通信の流れで動作する。

図 5 に Taiji Cast の送信手順を, 図 6 にタイムシーケンスチャートを示す。

(1) 初期状態では, 基地局 S が宛先端末 D に送信するパケットを保持している。基地局 S は, パケット送信前にキャリアセンスを行う。キャリアセンスの結果, チャンネルがアイドル状態と判断された場合, 基地局 S は RTS を送信する。RTS を送信することで, 中継局 R と宛先端末 D と他の周辺端末に, 基地局 S が宛先端末 D 宛てに信号を送信することを伝える。RTS を受信した宛先端末 D は CTS を送信する。CTS を送信することで基地局 S と中継局 R に信号を受信準備が完了したことを伝える。CTS を受信した宛先端末 D の周辺にある端末は Network Allocation Vector (NAV) を設定する。次に, 基地局 S からの RTS と宛先端末 D からの CTS を受信した中継局 R は宛先端末と同様にして, Relay's CTS を送信する。Relay's CTS を送信することで基地局 S に中継局 R の受信準備が完了したことを伝える。中継局 R の周辺にある他の端末にも NAV を設定する。

(2) 中継局 R から Relay's CTS を受信した後, 基地局 S では RTS と CTS と Relay's CTS を用いて取得した伝搬損失を用いて, 中継局 R を使用した場合の最適な電力割り当てとデータ量割り当てを実行する。RTC と CTS と Relay's CTS から伝搬損失の情報を取得する方法は 3.3 節で述べる。基地局 S はパケットを 3 つのフレームに分割する。3 分割されたフレームをそれぞれフレーム 1, フレーム 2, フレーム 3 とする。分割する際の各フレームのサイズは電力・データ量割り当てで算出した値を使用する。各

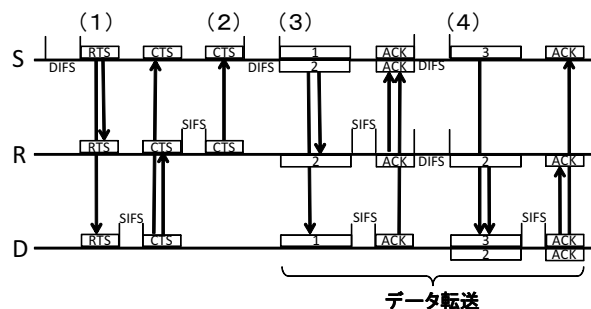


図 6 シーケンスチャート

RTS	2 byte		2 byte		6 byte		6 byte		4 byte			
	FC	Duration	Destination Address			Source Address			FCS			
CTS	2 byte		2 byte		6 byte		4 byte					
	FC	Duration	Destination Address			FCS						
Relay's CTS	2 byte		2 byte		6 byte		6 byte		4 byte		4 byte	
	FC	Duration	Destination Address			Relay Address		R-D PathLoss		FCS		

図 7 RTS・CTS・Relay's CTS のフレーム構成

フレームのデータ量の算出は 3.4 節で述べる。フレーム 1 とフレーム 3 は宛先端末 D へ直接送信するフレームである。フレーム 2 は中継局 R を経由して送信するフレームである。

(3) 基地局 S はフレーム 1 を宛先端末 D 宛てフレーム, フレーム 2 を中継局 R 宛てフレームとして各フレームを足し合わせて作成した重畳信号を送信する。このとき, 宛先端末 D 宛て信号には電力 P_{far} [mW] を, 中継局 R 宛て信号には電力 P_{near} [mW] を割り当てる。 P_{far} と P_{near} の算出方法は 3.4 節で述べる。重畳信号を受信した中継局 R は逐次干渉除去を用いてフレーム 2 を取得する。宛先端末 D ではフレーム 2 の信号をノイズとして扱って復調することで, フレーム 1 を取得する。フレームを取得した中継局 R と宛先端末 D は基地局 S 宛てに ACK を送信する。基地局 S は逐次干渉除去によって 2 つの ACK を同時に受信する。

(4) 基地局 S はフレーム 3 を, 中継局 R は (3) で受信したフレーム 2 を同時に宛先端末 D に送信する。宛先端末 D では, 基地局 S から宛先端末 D までの伝搬損失と, 中継局 R から宛先端末 D までの伝搬損失の差を利用した逐次干渉除去を実行してフレーム 3 とフレーム 2 を同時に受信する。宛先端末 D が逐次干渉除去を利用して基地局 S, 中継局 R のそれぞれからフレームの受信に成功した場合, 基地局 S, 中継局 R に ACK を送信する。

3.3 RTS と CTS と Relay's CTS

3.2 節に示したように, Taiji Cast では各フレームのサイズと電力を割り当てるために各通信路における伝搬損失を求める必要がある。本節では, 伝搬損失を求めるために使用する RTS・CTS・Relay's CTS について述べる。

図 7 に Taiji Cast で使用する RTS と CTS と中継局が送信する Relay's CTS のフレームの構成を示す。Taiji Cast では RTS と CTS と Relay's CTS を利用して基地局 S と各端末との伝搬損失を基地局 S に伝える。Taiji cast で基地局 S が知らなければならない伝搬損失の情報は基地局 S と宛先端末 D 間の伝搬損失 L_{sd} ・基地局 S と中継局 R 間の伝搬損失 L_{sr} ・中継局 R と宛先端末 D 間の伝搬損失 L_{rd} の 3 つである。

伝搬損失 L_{sd} は、基地局 S が宛先端末 D から CTS を受信する際に、宛先端末 D から受信した CTS の電力と基地局 S 自身の送信電力 P [mW] から算出する。伝搬損失 L_{rd} は、中継局 R が宛先端末 D から受信した CTS の電力と中継局 R 自身の送信電力 P から L_{rd} を算出する。伝搬損失 L_{sr} は、基地局 S が中継局 R から Relay's CTS を受信する際に、中継局 R から受信した Relay's CTS と基地局 S 自身の送信電力 P から算出する。基地局 S は中継局 R と宛先端末 D 間の伝搬損失 L_{rd} を知る必要があるため、中継局が算出した L_{rd} を図 7 の Relay's CTS の R-D PathLoss に含めて基地局に伝える。

Relay's CTS には Destination Address と Relay Address が含まれている。Destination Address はどの宛先端末からの伝搬損失を含めた CTS であるかを示す。Relay Address は中継局の MAC アドレスを示す。

3.4 各フレームのサイズと送信電力の算出

Taiji Cast では 3 つのフレームのサイズと重畳符号化での送信電力を調整することで通信を最適化する。3 つのフレームとは 1 回目の通信で基地局 S から宛先端末 D まで送信するフレームと、1 回目の通信と 2 回目の通信で基地局 S から中継局 R を経由して宛先端末 D まで送信するフレームと、逐次干渉除去を用いて基地局 S から宛先端末 D へ送信するフレームである。

Taiji Cast を用いて D [Byte] のパケットを送信するときに要する時間を T_{total} [sec] とすると、 T_{total} を最小化する電力 P_{far} [mW]・ P_{near} [mW] と、フレームサイズ F_1 [Byte]・ F_2 [Byte]・ F_3 [Byte] は次の式で表される。

$$(P_{far}, P_{near}, F_1, F_2, F_3) = \text{argmin}(T_{total})$$

Taiji Cast では、1 つのパケットをそれぞれ F_1 , F_2 , F_3 のサイズのフレームに分割して送信する。また、重畳符号化では遠方端末宛て信号と近方端末宛て信号にそれぞれ P_{far} , P_{near} の電力を割り当てて送信する。まず、パケットのサイズを D とすると、 F_1 , F_2 , F_3 は次の式で表される。

$$D = F_1 + F_2 + F_3$$

通常の通信における送信電力を P とすると、 P_{far} , P_{near} は次の式で表される。

$$P = P_{far} + P_{near}$$

重畳符号化を用いた時の基地局 S と宛先端末 D 間の伝送レートを $R_{spc, sd}$, 基地局 S と中継局 R 間の伝送レートを $R_{spc, sr}$, 逐次干渉除去を用いた時の基地局 S と宛先端末 D 間の伝送レートを $R_{sic, sd}$, 中継局 R と宛先端末 D 間の伝送レートを $R_{sic, rd}$ とすると、 T_{total} は次の式で表される。

$$T_{total} = \max\left(\frac{F_1}{R_{spc, sd}}, \frac{F_2}{R_{spc, sr}}\right) + \max\left(\frac{F_2}{R_{sic, rd}}, \frac{F_3}{R_{sic, sd}}\right)$$

送信帯域幅を W [Hz] とすると $R_{spc, sd}$, $R_{spc, sr}$, $R_{sic, sd}$, $R_{sic, rd}$ は次の式で表される。

$$R_{spc, sd} = W \log_2 \left(\frac{P_{far} L_{sd}}{N + P_{near} L_{sd}} \right)$$

$$R_{spc, sr} = W \log_2 \left(\frac{P_{near} L_{sr}}{N} \right)$$

$$R_{sic, rd} = W \log_2 \left(\frac{P L_{rd}}{N + P L_{sd}} \right)$$

$$R_{sic, sd} = W \log_2 \left(\frac{P L_{sd}}{N} \right)$$

4 つの伝送レートをもとに算出した T_{total} とパケットサイズ D から Taiji Cast 全体の伝送レート R_{taiji} は次の式で算出する。

$$R_{taiji} = \frac{D}{T_{total}}$$

4. 性能評価

Taiji Cast の有効性を示すために、計算機シミュレーションによって干渉除去技術を用いた通信のスループット、実際の環境を想定した場合の伝送レートを測定・算出した。Taiji Cast の性能を相対的に評価するために次の 3 つの伝送方法を比較した。

(1) Single hop

Single hop は、基地局から宛先端末までフレームを送信する場合、宛先端末までのフレームを基地局が宛先端末まで直接送信する。Taiji Cast は宛先端末が 1 つしかない場合を想定しているため、宛先端末が 1 つの場合に最も一般的な伝送方法である Single hop は、Taiji Cast が中継局と干渉除去技術によって得られる性能を示す尺度となる。

(2) Multi hop

Multi hop は、基地局から宛先端末までフレームを送信する場合、最初に宛先端末までのフレームを基地局が中継局に送信する。次に、受信したフレームを中継局が宛先端末まで送信する。2 つの伝送は時分割で行うことを想定している。中継局を用いているが干渉除去技術を用いていないため、Taiji Cast が干渉除去技術によって得られる性能を示す尺度となる。

(3) Taiji Cast

Taiji Cast は、3 章で示したように、基地局から宛先端末までのフレームを中継局と干渉除去技術によって

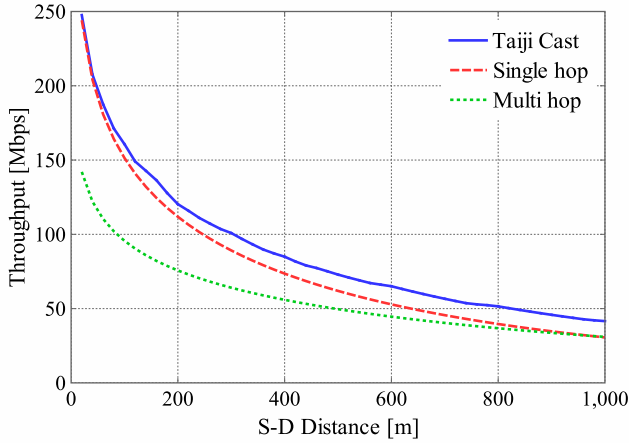


図 8 距離に対するスループット

送信する。中継局の選択と電力データ量制御によって作成した電力の割合とデータ量を用いて伝送した場合の伝送レートを算出する。

4.1 Taiji Cast とシングルホップの比較

Taiji Cast の基本性能を評価するために、基地局 S と宛先端末 D の間の距離を変えた場合のスループットを評価した。中継局 R は常に基地局と宛先端末 D を直線で結んだ中央に配置した。帯域幅 W は 20 [MHz]、最大送信電力 P は 20 [mW]、雑音電力は-90 [mW] とした場合の、自由空間におけるパスロスモデルとシャノン=ハートレーの定理を用いてスループットを算出した。図 8 に評価結果を示す。横軸は基地局から宛先端末までの距離、縦軸はスループットを表している。

図 8 から通信距離が大きくなればなるほど Taiji Cast の性能が相対的に高くなることが分かる。基地局と宛先端末との距離が離れるにつれて、基地局と中継局との距離も離れる。2つの通信路の距離差が大きくなるにつれて伝搬損失差も大きくなることで、干渉除去による利得が大きくなったためにスループットが大幅に向上したと考えられる。

4.2 Taiji Cast の電力・データ量割り当ての検証

4.1 節では、Taiji Cast が Single hop および Multi hop より高いスループットを達成することを述べた。本節では、Taiji Cast における電力・データ量割り当てが性能向上にどの程度寄与しているかを明らかにするため、電力・データ量割り当てをする場合としない場合とを評価した。Taiji Cast の電力・データ量割り当ての検証のために次の 4 つの手法を比較した。

(1) Taiji Cast w/o power allocation

Taiji Cast w/o power allocation は、Taiji Cast の 1 回目と 2 回目の通信に加えて、データ量割り当てのみを用いている。重畳符号化では、基地局から宛先端末への信号と基地局から中継局への信号に電力を半分ずつ

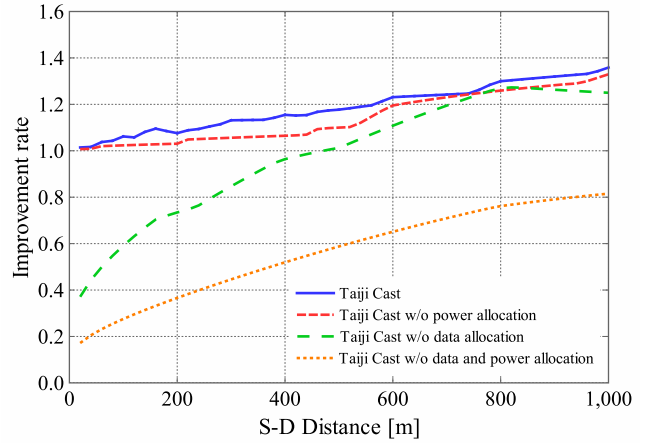


図 9 Taiji Cast における電力・データ量割り当て

割り当てる。Taiji Cast では電力割り当ても行っているため、電力割り当てによって得られた性能を示す尺度となる。

(2) Taiji Cast w/o data allocation

Taiji Cast w/o data allocation は、Taiji Cast の 1 回目と 2 回目の通信に加えて、電力割り当てのみを用いている。フレームサイズ F_1 , F_2 , F_3 は均等に分割した。Taiji Cast ではデータ量割り当ても行っているため、Taiji Cast がデータ量割り当てによって得られる性能を示す尺度となる。

(3) Taiji Cast w/o data and power allocation

Taiji Cast の 1 回目の通信と 2 回目の通信に加えて、電力は (1) と同様に基地局から宛先端末への信号と基地局から中継局への信号に電力を半分ずつ割り当てる。データ量は (2) と同様に 3 つのフレームサイズを均等に割り当てる。Taiji Cast が電力・データ量割り当てによって得られる性能を示す尺度となる。

(4) Taiji Cast

Taiji Cast では、重畳符号化を用いる 1 回目の通信と逐次干渉除去を用いる 2 回目の通信のほかに電力割り当てとデータ量割り当てを行っている。この電力・データ量割り当てがどの程度効果を発揮するかを確認する。

トポロジやパラメータは 4.1 節と同様に基地局が中央にある場合を想定した。帯域幅 W は 20 [MHz]、最大送信電力 P は 20 [mW]、雑音電力は-90 [mW] とした場合の、自由空間におけるパスロスモデルとシャノン=ハートレーの定理を用いてスループットを算出した。図 9 に評価結果を示す。横軸は基地局から宛先端末までの距離、縦軸は Single hop のスループットに対する改善率を表している。図 9 から 2 つのことがわかる。

1 つ目は、Taiji Cast w/o data allocation と Taiji Cast w/o data and power allocation は、Single hop よりも低いスループットになる場合が存在することである。1 回目の

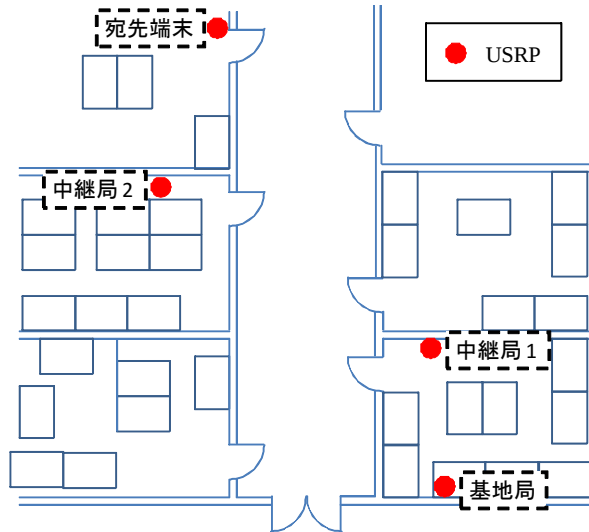


図 10 静岡大学のテストベッド

通信と 2 回目の通信でスループットの低い通信路にスループットの高い通信路と同じデータ量を割り当てているため、スループットの低い通信路でのデータ伝送時間が長くなるからだと考えられる。

2 つ目は、Taiji Cast と Taiji Cast w/o power allocation は、Single hop に比べて高いスループットを達成していることである。1000 [m] 地点では、Taiji Cast は Single hop と比較して約 1.35 倍のスループット向上を達成している。干渉除去技術による各通信路の伝搬損失の状況に合わせてデータ量を割り当てていることから、1 回目の通信と 2 回目の通信で最適なデータ量を割り当てることによって干渉除去技術を有効に利用できていることがわかる。

3 つ目は、Taiji Cast は、Taiji Cast w/o power allocation と比較して Taiji Cast の方が高いスループット改善率を達成していることである。送信時間が最小となる電力・データ量を割り当てているため、Taiji Cast が理論値上で最適値に近い伝送レートを達成できたと考えられる。

4.3 静岡大学のテストベッドに適用した場合の検証

4.1 節では、中継局が基地局と宛先端末を直線で結んだ中央に配置した環境で通信の高速化を達成することが分かった。4.2 節では、電力・データ量割り当てを行う Taiji Cast が最も高い性能を発揮することを確認した。しかしながら、基地局と宛先端末を結ぶ直線上の中心以外に中継局を配置した場合を考慮していない。そこで実際の環境を想定して中継局を基地局と宛先端末の中央以外に配置した場合にも Taiji Cast による通信の高速化を実現できるか検証する。検証では、静岡大学のテストベッドから作成した SNR マップを用いて計算機シミュレーションを行った。

図 10 に静岡大学の研究室に構築したテストベッドを示す。4 台の USRP N200 を 3 部屋に分けて配置している。

表 1 SNR マップ

Tx Node	Rx Node	SNR [dB]
基地局	宛先端末	6.397656
基地局	中継局 1	20.01639
中継局 1	宛先端末	8.867879
基地局	中継局 3	6.793988
中継局 2	宛先端末	18.92928

このテストベッドを用いて実際の環境から SNR の情報を取得して SNR マップを作成した。表 1 に取得した SNR マップを示す。SNR マップの作成には中心周波数が 5.11 [GHz]、帯域幅を 2 [MHz] で、総務省の許可を得た USRP N200 を使用した。

図 10 に示すトポロジで、基地局が宛先端末に対してデータを送信する場合を考える。表 1 に示す各通信路の SNR を用いて、計算機シミュレーションを実行した。1 回目の通信では、基地局が宛先端末宛てフレームと中継局宛てフレームに対して Spinal 符号を用いて信号を作成する。作成した信号に電力を割り当てて足し合わせることで重畳信号を作成する。重畳信号を受信した宛先端末では中継局宛ての信号をノイズとして扱うことで、宛先端末宛ての信号を復調する。表 1 で示される SNR と電力割り当ての情報から求められる、宛先端末が重畳信号から宛先端末宛ての信号を取得する場合の伝送レートを $R_{spc,sd}$ とする。同様に、中継局が重畳信号から中継局宛ての信号を取得する場合の伝送レートを $R_{spc,sr}$ とする。2 回目の通信では基地局と中継局が宛先端末宛てのフレームに対して Spinal 符号を用いて信号を作成する。作成した信号を基地局と中継局は同時に送信する。宛先端末では逐次干渉除去を用いて、基地局と中継局から送信されるフレームを同時に取得する。基地局からの信号をノイズとして扱うことで中継局からの信号を取得する場合の伝送レートを考える。基地局からの信号をノイズとして扱った場合の中継局と宛先端末間の SNR は観測できないため、基地局からの信号をノイズとした場合の中継局と宛先端末間の SNR である $SNR_{sic,rd}$ は次の式で算出したものを使用する。

$$SNR_{sic,rd} = \frac{SNR_{rd}}{1 + SNR_{sd}}$$

中継局と宛先端末間の SNR である SNR_{rd} 、基地局と宛先端末間の SNR である SNR_{sd} は表 1 で示されているものを使用した。算出した $SNR_{sic,rd}$ から求めた、中継局からの信号を宛先端末で受信する場合の伝送レートを $R_{sic,rd}$ とする。基地局から宛先端末へ送信される信号は、中継局から宛先端末への信号を除去した後の信号であるため、表 1 で示されている SNR_{sd} から求めた、基地局からの信号を宛先端末で受信する場合の伝送レートを $R_{sic,sd}$ とする。Spinal 符号のシミュレータで用いているパラメータは文献 [15,16] で示されているものを使用している。設定した

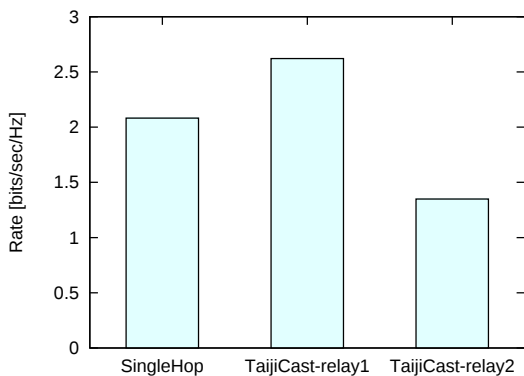


図 11 テストベッドでの伝送レート

パラメータをもとに AWGN 通信路における重畳 Spinal 符号と Spinal 符号の伝送レートを計算機シミュレーションを用いて測定した。

図 11 にシミュレーション結果を示す。横軸は SingleHop が基地局から宛先端末まで直接送信した場合、TaijiCast-relay1 は中継局 1 を使用して Taiji Cast を実行した場合、TaijiCast-relay2 は中継局 2 を使用して Taiji Cast を実行した場合を表している。縦軸は帯域 1 [Hz] あたりの伝送レートを表している。図 11 より、次の 2 つのことがわかる。

1 つ目は、中継局 1 を使用した場合において Single hop よりも高い伝送レートを達成していることである。適切な電力・データ量割り当てによって伝送時間が短縮できているからだと考えられる。この結果は、中継局を配置することで Single hop よりも高速に通信ができる場合が存在することを示している。

2 つ目は、中継局 2 を使用した場合において Taiji Cast が Single hop よりも低い伝送レートになっていることである。原因は、4.2 節で示したように、電力・データ量割り当てが不十分である場合は Single hop に劣ることから電力・データ量割り当ての精度がよくないからだと考えられる。

5. おわりに

本稿では、干渉除去技術と中継局を用いて無線通信の高速化を実現する Taiji Cast を提案した。Taiji Cast は、基地局と宛先端末の間にある中継局を利用して、重畳符号化と逐次干渉除去を用いた通信を行うことで、スループットを向上させる。また、電力・データ量割り当てによって、各通信路において最適な通信を実現する。性能評価では、数値解析と計算機シミュレーションを用いて評価した結果、基地局から宛先端末までの間に実際に中継局を置いて Taiji Cast を用いることで直接送信するよりも高い伝送レートを達成できる場合があることを確認した。現在は中継局が複数存在した場合の中継局の選択方法と、新しい電力・データ量割り当ての検討をしている。

参考文献

- [1] 総務省：平成 25 年度版情報通信白書，日経印刷株式会社 (2013)。
- [2] Halperin, D., Anderson, T. and Wetherall, D.: Taking the Sting out of Carrier Sense: Interference Cancellation for Wireless LANs, *Proceedings of the 14th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'08)* (2008).
- [3] Tse, D. and Viswanath, P.: *Fundamentals of wireless communication*, Cambridge University Press (2005).
- [4] Ganti, R. K., Gong, Z., Haenggi, M., Han Lee, C., Srinivasa, S., Tisza, D., Vanka, S. and Vizi, P.: Implementation and experimental results of superposition coding on software radio, *In Proceedings of IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'10)*, pp. 1–5 (2010).
- [5] Vanka, S., Srinivasa, S., Gong, Z., Vizi, P., Stamatiou, K. and Haenggi, M.: Superposition coding strategies: Design and experimental evaluation, *In IEEE transactions on wireless communication*, Vol. 11, No. 7, pp. 2628–2639 (2012).
- [6] Vanka, S., Srinivasa, S. and Haenggi, M.: A practical approach to strengthen vulnerable downlinks using superposition coding, *In Proceedings of IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'12)* (2012).
- [7] Su, X. and Chan, S.: High-throughput routing with superposition coding and successive interference cancellation, *In IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'11)*, pp. 1–6 (2011).
- [8] Li, L. E., Alimi, R., Ramjee, R., Viswanathan, H. and Yang, Y. R.: muNet: Harnessing multiuser capacity in wireless mesh networks, *In Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM'09)*, pp. 2876–2880 (2009).
- [9] Li, L. E., Alimi, R., Ramjee, R., Shi, J., Sun, Y., Viswanathan, H. and Yang, Y. R.: Extended abstract: Superposition coding for wireless networks, *In Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking (ACM MobiCom'07)*, pp. 330–333 (2007).
- [10] Feng, J., Zhang, R. and Hanzo, L.: Auction-style cooperative medium access control, *In IEEE Vehicular Technology Conference (IEEE VTC'11)*, pp. 1–5 (2011).
- [11] 青木勇太，猿渡俊介，渡辺 尚：重畳符号化を用いた無線通信における転送量に基づく電力割当方式，情報処理学会研究報告，モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会，MBL-64-22，pp. 1–8 (2012)。
- [12] Shannon, C. E.: A Mathematical Theory of Communication, *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379–423 (1948).
- [13] Gudipati, A. and Katti, S.: Strider: Automatic Rate Adaptation and Collision Handling, *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011 Conference on Data Communication (ACM SIGCOMM'11)*, Istanbul, Turkey, pp. 158–169 (2011).
- [14] Gudipati, A., Pereira, S. and Katti, S.: AutoMAC: Rateless Wireless Concurrent Medium Access, *Proceedings of the 18th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'12)*, Istanbul, Turkey, pp. 5–16 (2012).
- [15] 山崎景太，西田昇平，石橋功至，猿渡俊介，渡辺 尚：ブロードキャスト通信路容量を達成するための無線通信方式の実装について，情報処理学会研究報告，モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会，MBL-70-1，pp. 1–8 (2014)。

- [16] Perry, J., Iannucci, P. A., Fleming, K., Balakrishnan, H. and Shah, D.: Spinal Codes, *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2012 Conference on Data Communication (ACM SIGCOMM'12)*, pp. 49–60 (2012).