

シングルキャリア協調 AF リレーネットワークにおける リレー予備選択に関する検討

中田 雅之¹ 小原 辰徳¹ 山本 哲矢¹ 安達 文幸²

東北大学 大学院工学研究科 電気・通信工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: ¹{nakada, obara, yamamoto}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, ²adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 協調リレーネットワークではセル内に配置されているリレーの中から信号伝送に用いるリレーを選択する必要がある。チャンネル容量を最大とするリレー選択法は全探索法であるが、全探索法はセル内に配置されている全てのリレーに対して、電力配分およびサブキャリア割当てを行ったときのチャンネル容量を計算・比較してリレーを選択するため、計算量の観点から実用的でない。本稿では、直接・協調リレー切り替えとスペクトル分割・適応サブキャリア割当てを用いるシングルキャリア(SC)協調非再生(AF)リレー伝送を対象としたリレー選択法を提案する。提案法では信号伝送に使用するリレーを選択する前に、端末・リレー間リンクのチャンネル情報に基づきあらかじめ決められた数の候補リレーを予備選択する。予備選択した候補リレーのそれぞれに対して電力配分およびサブキャリア割当てを行い、その中でチャンネル容量の最も大きいリレーを最終選択する。計算機シミュレーションにより、提案リレー選択法を用いたときのチャンネル容量を評価し、最大チャンネル容量を得るために必要な候補リレーの予備選択数について議論する。セル内に配置するリレー数が6局および18局のとき、最大チャンネル容量を得るために必要な候補リレーの予備選択数はそれぞれ約2局および5局程度で十分であり、セル内に配置されている全てのリレーを考慮する必要はないことを示す。

キーワード 協調 AF リレー, リレー予備選択, 直接・協調リレー切り替え, スペクトル分割・適応サブキャリア割当て

A Study Of Relay Preselection In Single-Carrier Cooperative AF Relay Network

Masayuki NAKADA¹ Tatsunori OBARA¹ Tetsuya YAMAMOTO¹ and Fumiyuki ADACHI²

Dept. of Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

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

E-mail: ¹{nakada, obara, yamamoto}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, ²adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract The relay selection is an important issue in cooperative relay network. The optimal relay selection which maximizes the channel capacity needs exhaustive search. In this paper, we propose a relay selection method for the single-carrier (SC) cooperative amplify-and-forward (AF) relay using direct/cooperative relay switching and spectrum division/adaptive subcarrier allocation (SDASA). In the proposed relay selection method, a predetermined number of candidate relay stations (RSs) are pre-selected according to the channel quality of the mobile terminal (MT) – RS link. The channel capacity of each of pre-selected RSs is calculated, and the RS which provides the maximum channel capacity is finally selected. The channel capacity of the cooperative AF relay using the proposed relay selection method is evaluated by the computer simulation, and the number of pre-selected RSs to be considered is discussed. It is shown that it is not necessary to consider all RSs in a cell in order to maximize the channel capacity.

Keyword Cooperative AF relay, relay preselection, direct/cooperative relay switching, spectrum division/adaptive subcarrier allocation

1. まえがき

次世代移動無線システムでは超高速データ通信の実現が期待されている。しかしながら、一般に所要の伝送品質を確保するためには伝送速度に比例して送信電力を増大させる必要があり、次世代システムのような超高速通信システムでは送信電力が許容できないほどに増大してしまうという問題が生じる。そのため、移動無線チャンネルにおける伝搬損失、シャドウイング損失および周波数選択性フェージングを克服すること

により、所要の通信品質を満たすための送信電力を低減する必要がある。

伝搬損失およびシャドウイング損失を軽減するためには空間ダイバーシチが有効である。空間ダイバーシチを実現する有力な手段に協調リレーがある[1]-[3]。協調リレーは伝搬損失およびシャドウイング損失の影響を軽減できるものの、①周波数選択性フェージングを積極的に利用する余地がまだ残されている、②伝送効率が端末・基地局間直接通信より低下してしまう[1]

という問題がある．これらの問題に対して筆者らは以前，上りリンクシングルキャリア(SC)-周波数分割多元接続(FDMA)[4]協調非再生(AF)リレーを対象として，より大きな周波数ダイバーシチ効果を得るために SC 信号スペクトルの分割に基づく適応的なサブキャリア割当て(スペクトル分割・適応サブキャリア割当て)を提案した[5]．また，文献[6]では協調リレーの直接通信に対する伝送効率の低下を避けるために，上りリンク協調 AF リレーにおける直接・協調リレー切り替えを提案し，セル内におけるチャンネル容量分布を明らかにした．文献[5]および[6]で筆者らは，スペクトル分割・適応サブキャリア割当てを行うことで周波数選択性フェージングを積極的に利用することができ，さらに直接・協調リレー切り替えを行うことで直接通信および協調リレーをそれぞれ単独に行ったときより大きなチャンネル容量が得られることを示した．文献[7]では，直接・協調リレー切り替えとスペクトル分割・適応サブキャリア割当てを用いる協調 AF リレーを対象とした電力配分法を提案し，端末とリレーに常に等しく送信電力を配分したときよりも大きなチャンネル容量が得られることを示した．

しかしながら，文献[5]-[7]では協調リレーに用いるリレーを全探索法により決定していた．全探索法は，セル内に配置されている全てのリレーに対して，電力配分およびサブキャリア割当てを行ったときのチャンネル容量を計算・比較するため，計算量の観点から実用的ではない．

そこで，本稿では直接・協調リレー切り替えとスペクトル分割・適応サブキャリア割当てを用いる SC 協調 AF リレー伝送を対象としたリレー選択法を提案する．提案法では，チャンネル容量を計算するリレー数を少なくするために，信号伝送に使用するリレーを選択する前に端末・リレー間リンクのチャンネル情報に基づきあらかじめ決められた数の候補リレーを予備選択する．予備選択の指標として，端末・リレー間の短区間平均伝搬ロスおよび瞬時伝搬ロスを定義し，伝搬ロスが小さい順に候補リレーを予備選択する．選択した候補リレーに対して電力配分およびサブキャリア割当てを行ったときのチャンネル容量を計算し，最大チャンネル容量のリレーを最終選択する．計算機シミュレーションにより，提案リレー選択法を用いたときのチャンネル容量を評価する．

本稿の構成は以下のようになっている．2 章にてシステムモデルを示す．3 章では直接・協調リレー切り替えとスペクトル分割・適応サブキャリア割当てを用いる SC 協調 AF リレー伝送を対象としたリレー選択法を提案する．4 章にて数値計算によりチャンネル容量を求め，5 章にてまとめる．

2. 直接・協調リレー切り替えとスペクトル分割・適応サブキャリア割当てを用いる SC 協調 AF リレー伝送

SC-FDMA 協調リレーを用いる上りリンクシステムモデルを図 1 に示す．シングルユーザ環境下において，円形セル内に K 個のリレー局が配置されているものとする．セル半径を d_{cell} とし，端末・基地局間，端末・リレー間およびリレー・基地局間の距離をそれぞれ

$d_{M \rightarrow B}$ ， $d_{M \rightarrow R}$ および $d_{R \rightarrow B}$ ($R \in \{0, 1, \dots, K-1\}$) とする．また，本稿では送信信号ブロック内でチャンネルの変動がない L 個のパスから構成される周波数選択性ブロックフェージングチャンネルを仮定し，パスの最大遅延時間はサイクリックプレフィクス(CP)長を超えないものとする．

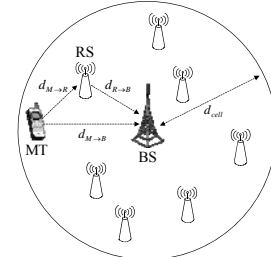


図 1 システムモデル

2.1. 直接・協調リレー切り替え

直接・協調リレー切り替えでは信号ブロック送信毎に直接通信および協調リレーのチャンネル容量を計算し，達成可能な容量の大きい通信方法に切り替えて通信を行う[6]．

協調リレーでは AF 方式を仮定し，2 タイムスロットの時間を用いて信号送信を行うものとする[8]-[10]．図 2 に示すように，第 1 タイムスロットでは端末が基地局およびリレーへ信号ブロックを送信し，第 2 タイムスロットにおいてリレーが端末からの受信信号を電力増幅し，再度サブキャリア割当てを行った後に基地局へ送信する．

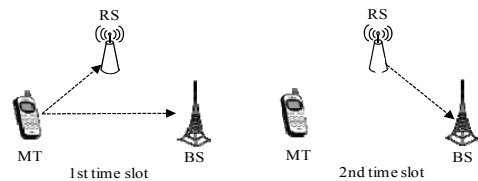


図 2 信号ブロック送信方法

2.2. スペクトル分割・適応サブキャリア割当て

本稿では，文献[11]で提案した方法でスペクトル分割・適応サブキャリア割当てを行う．直接通信および協調リレーに対してそれぞれ独立にサブキャリア割当てを行う．

システム帯域内 N_c 個のサブキャリアのうち M 個 ($M \leq N_c$) が信号伝送のためユーザに割り当てられるものとする． N_c 個のサブキャリアを M/D 個の連続したサブキャリアで構成されるリソースブロックに分割する．システム帯域内でユーザが使用可能な総リソースブロック数は $N_c / (M/D)$ 個である．ユーザは M 個のサブキャリアを D 個のサブブロックに分割し，それらを割り当てられたリソースブロックにマッピングする．

直接通信の場合，端末・基地局間の各リソースブロック内のチャンネル利得の二乗和(以後，リソースブロック利得と表記する)を計算する．その後，計算したリソースブロック利得を比較し，利得の高い D 個のリソースブロックをユーザへ割り当てる．

協調リレーの場合，端末・基地局間のチャンネルに関わらず端末・リレー間およびリレー・基地局間のチャンネルのみに着目してサブキャリア割当てを行う．まず，端末・リレー間およびリレー・基地局間のリソースブロック利得をそれぞれ計算する．その後，端末・リレー間

およびリレー・基地局間で独立にそれぞれリソースブロック利得を比較し、利得の高い順にリソースブロックを組み合わせてユーザおよびリレーへ割り当てる．図3に $M=8$, $D=4$, $N_c=16$ のときの直接・協調リレー切り替え通信におけるスペクトル分割・適応サブキャリア割当ての例を示す．

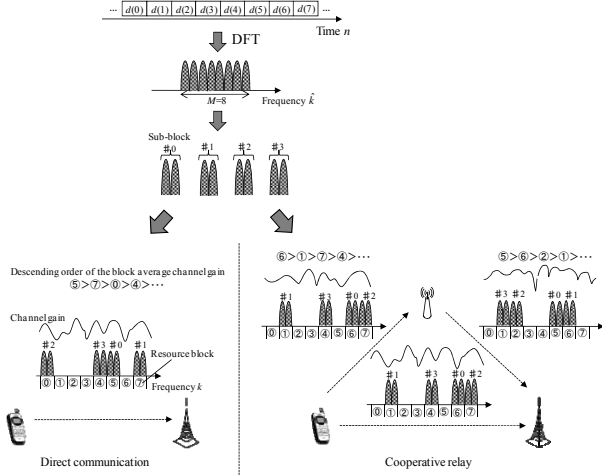


図3 直接・協調リレー切り替え通信におけるスペクトル分割・適応サブキャリア割当ての例 (M, D, N_c)=(8, 4, 16)

2.3. 電力配分法

協調リレーを行う場合、文献[7]で提案したチャンネル容量最大規範に基づく電力配分を行う．直接通信時の端末の送信電力を P_T 、協調リレー時の端末およびリレーの送信電力をそれぞれ $P_{t,M}$ および $P_{t,R}$ とする．総送信電力制約条件 $P_{t,M} + P_{t,R} = P_T$ のもとで、次式に従って端末およびリレーへ送信電力配分を行う．

$$\begin{cases} P_{t,M} = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} P_T \\ P_{t,R} = \frac{1}{1+\varepsilon} P_T \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 ε は端末およびリレーの送信電力の比率の最適値 ($\varepsilon = P_{t,M} / P_{t,R}$) であり、次式を満たす．

$$\sum_{k=0}^{N_c-1} \sum_{k'=0}^{N_c-1} \tau_R^{(CR)}(k, k') \times \left(\frac{\varepsilon^2 d_{M \rightarrow R}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{M \rightarrow R}}{10}} \sum_{j=0}^{N_c-1} \sum_{j'=0}^{N_c-1} \tau_R^{(CR)}(j, j') \frac{|H_{M \rightarrow R}(j)|^2}{M} - d_{R \rightarrow B}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{R \rightarrow B}}{10}} |H_{R \rightarrow B}(k')|^2}{\varepsilon d_{M \rightarrow R}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{M \rightarrow R}}{10}} \sum_{j=0}^{N_c-1} \sum_{j'=0}^{N_c-1} \tau_R^{(CR)}(j, j') \frac{|H_{M \rightarrow R}(j)|^2}{M} + d_{R \rightarrow B}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{R \rightarrow B}}{10}} |H_{R \rightarrow B}(k')|^2} \right) = 0 \quad (2)$$

s.t. $\varepsilon > 0$

ここで、 $H_{M \rightarrow R}(k)$ および $H_{R \rightarrow B}(k)$ はそれぞれ端末・リレー間およびリレー・基地局間リンクのチャンネル利得である． $\eta_{M \rightarrow R}$ および $\eta_{R \rightarrow B}$ はそれぞれ端末・リレー間およびリレー・基地局間リンクのシャドウイング損失(dB)である． $\tau_R^{(CR)}(k, k')$ は協調リレーを行うときに信号送信のために第1タイムスロットで第 k サブキャリア、第2タイムスロットで第 k' サブキャリアが割り当てら

れたかどうかを表わす変数であり、第1タイムスロットで第 k サブキャリア、第2タイムスロットで第 k' サブキャリアが割り当てられた場合は $\tau_R^{(CR)}(k, k')=1$ 、そうでない場合は $\tau_R^{(CR)}(k, k')=0$ となる．式(2)を満たす ε を解析的に求めることは困難であるため、本稿ではニュートン・ラフソン法[12]に代表される数値計算手法によって ε を求める．

2.4. チャンネル容量

直接・協調リレー切り替え通信のチャンネル容量 $C^{(SW)}$ は次式で表わされる[6]．

$$C^{(SW)} = \max\{C^{(DC)}, C_R^{(CR)}\} \quad (3)$$

ここで、 $C^{(DC)}$ および $C_R^{(CR)}$ はそれぞれ直接通信および協調リレーのチャンネル容量である．

スペクトル分割・適応サブキャリア割当てを用いる直接通信のチャンネル容量 $C^{(DC)}$ は次式で与えられる．

$$C^{(DC)} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{N_c-1} \tau^{(DC)}(k) \log_2 \left(1 + \frac{P_r^{(DC)}}{N} |H_{M \rightarrow B}(k)|^2 \right) \quad (4)$$

ここで、 $H_{M \rightarrow B}(k)$ および N はそれぞれ端末・基地局間のチャンネル利得および基地局の雑音電力である． $P_r^{(DC)}$ は基地局の受信電力であり、直接通信時の端末の送信電力 P_T を用いて次式で与えられる．

$$\begin{aligned} P_r^{(DC)} &= P_T \cdot d_{M \rightarrow B}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{M \rightarrow B}/10} = (P_T \cdot d_{cell}^{-\alpha}) \cdot \left(\frac{d_{M \rightarrow B}}{d_{cell}} \right)^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{M \rightarrow B}/10} \\ &= \bar{P}_T \cdot r_{M \rightarrow B}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{M \rightarrow B}/10} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 α および $\eta_{M \rightarrow B}$ はそれぞれ伝搬損失指数および端末・基地局間のシャドウイング損失(dB)である． \bar{P}_T および $r_{M \rightarrow B}$ はそれぞれセル半径 d_{cell} で正規化された端末の送信電力および端末・基地局間の距離である．式(4)における $\tau^{(DC)}(k)$ は直接通信時に信号送信のために第 k サブキャリアが割り当てられたかどうかを表わす変数であり、第 k サブキャリアが割り当てられた場合は $\tau^{(DC)}(k)=1$ 、そうでない場合は $\tau^{(DC)}(k)=0$ となる．

スペクトル分割・適応サブキャリア割当てを用いる協調 AF リレーのチャンネル容量は次式で表わされる[6][13]．

$$\begin{aligned} C_R^{(CR)} &= \frac{1}{2M} \sum_{k=0}^{N_c-1} \sum_{k'=0}^{N_c-1} \tau_R^{(CR)}(k, k') \log_2 \left(1 + \frac{P_{r, M \rightarrow B}^{(CR)}}{N} |H_{M \rightarrow B}(k)|^2 \right) \\ &+ \frac{\frac{P_{r, M \rightarrow R}^{(CR)}}{N} |H_{M \rightarrow R}(k)|^2 \cdot \frac{P_{r, R \rightarrow B}^{(CR)}}{N} |H_{R \rightarrow B}(k')|^2}{\frac{P_{r, M \rightarrow R}^{(CR)}}{N} \sum_{j=0}^{N_c-1} \sum_{j'=0}^{N_c-1} \tau_R^{(CR)}(j, j') \frac{|H_{M \rightarrow R}(j)|^2}{M} + \frac{P_{r, R \rightarrow B}^{(CR)}}{N} |H_{R \rightarrow B}(k')|^2 + 1} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 N はリレーおよび基地局の雑音電力である． $P_{r, M \rightarrow B}^{(CR)}$ および $P_{r, M \rightarrow R}^{(CR)}$ 、 $P_{r, R \rightarrow B}^{(CR)}$ はそれぞれ第1タイムスロットにおける基地局およびリレー、第2タイムスロットにおける基地局の受信電力であり、次式で与えられる．

$$\begin{cases} P_{r,M \rightarrow B}^{(CR)} = \bar{P}_{t,M} \cdot r_{M \rightarrow B}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{M \rightarrow B}/10} \\ P_{r,M \rightarrow R}^{(CR)} = \bar{P}_{t,M} \cdot r_{M \rightarrow R}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{M \rightarrow R}/10} \\ P_{r,R \rightarrow B}^{(CR)} = \bar{P}_{t,R} \cdot r_{R \rightarrow B}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{R \rightarrow B}/10} \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 $\bar{P}_{t,M} = P_{t,M} \cdot d_{cell}^{-\alpha}$ および $\bar{P}_{t,R} = P_{t,R} \cdot d_{cell}^{-\alpha}$ はそれぞれセル半径 d_{cell} で正規化された協調リレー時の端末およびリレーの送信電力である。 $r_{M \rightarrow R} = d_{M \rightarrow R} / d_{cell}$ および $r_{R \rightarrow B} = d_{R \rightarrow B} / d_{cell}$ はそれぞれ端末・リレー間およびリレー・基地局間の正規化距離である。

3. 提案リレー選択法

直接・協調リレー切り替えとスペクトル分割・適応サブキャリア割当てを用いるSC協調AFリレー伝送を対象とした、チャンネル容量最大規範に基づくリレー選択法を提案する。チャンネル容量を最大とするリレー選択法は全探索法であるが、全探索法はセル内に配置されている全てのリレーに対して、電力配分およびサブキャリア割当てを行ったときのチャンネル容量を計算・比較してリレーを選択するため、計算量の観点から現実的ではない。そこで、提案法ではチャンネル容量を計算するリレー数を減らすために、リレーの予備選択を行う。信号伝送のために使用するリレーを選択する前にあらかじめ決められた数の候補リレーを予備選択し、選択した候補リレーに対して、電力配分およびサブキャリア割り当てを行ったときのチャンネル容量を計算する。その後、計算したチャンネル容量を比較し、達成可能なチャンネル容量の最も大きいリレーを最終選択する。以下、提案リレー選択法におけるリレーの予備選択規範およびリレー選択手順について述べる。

3.1. リレーの予備選択

協調リレーを行う場合、リレー・基地局間リンクは固定無線通信でありチャンネルの変動がない。さらに、各リレーはリレー・基地局間リンクのチャンネル状態の良好な位置に配置されることが想定される。したがって、協調リレーのチャンネル容量が端末・リレー間およびリレー・基地局間リンクのチャンネル状態の悪いリンクに強く依存する[1]ことを考慮すると、リレー選択に関してはチャンネルの変動する端末・リレー間リンクの影響が支配的である。そのため、提案リレー選択法では端末・リレー間リンクのチャンネルに着目して候補リレーの予備選択を行う。候補リレーの予備選択規範は電力配分およびサブキャリア割当てに依存しないことが望ましい。したがって、次式で表わされる端末・リレー間の短区間平均伝搬ロス $P_{loss,M \rightarrow R}^{(loc)}$ および瞬時伝搬ロス $P_{loss,M \rightarrow R}^{(ins)}$ を定義し、提案法では $P_{loss,M \rightarrow R}^{(loc)}$ または $P_{loss,M \rightarrow R}^{(ins)}$ の小さい順に J 個の候補リレーを予備選択する。

$$\begin{cases} P_{loss,M \rightarrow R}^{(loc)} = \bar{P}_{t,M} / P_{r,M \rightarrow R}^{(loc)} \\ = \left(r_{M \rightarrow R}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\eta_{M \rightarrow R}}{10}} \right)^{-1} \\ P_{loss,M \rightarrow R}^{(ins)} = \bar{P}_{t,M} / P_{r,M \rightarrow R}^{(ins)} \\ = \left(r_{M \rightarrow R}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\eta_{M \rightarrow R}}{10}} \sum_{k=0}^{N_c-1} \frac{|H_{M \rightarrow R}(k)|^2}{N_c} \right)^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、瞬時伝搬ロス $P_{loss,M \rightarrow R}^{(ins)}$ は候補リレーの予備選択

規範がサブキャリア割当てに依存しないという条件から、システム帯域内における全てのサブキャリアを使用したときのチャンネル利得を用いて定義している。また、 $P_{r,M \rightarrow R}^{(loc)}$ および $P_{r,M \rightarrow R}^{(ins)}$ はそれぞれ端末・リレー間リンクの短区間平均受信電力およびシステム帯域内における全てのサブキャリアを使用したときの瞬時受信電力であり、次式で与えられる。

$$\begin{cases} P_{r,M \rightarrow R}^{(loc)} = \bar{P}_{t,M} \cdot r_{M \rightarrow R}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\eta_{M \rightarrow R}}{10}} \\ P_{r,M \rightarrow R}^{(ins)} = \bar{P}_{t,M} \cdot r_{M \rightarrow R}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\eta_{M \rightarrow R}}{10}} \sum_{k=0}^{N_c-1} \frac{|H_{M \rightarrow R}(k)|^2}{N_c} \end{cases} \quad (9)$$

候補リレー数が $J=K$ のとき、セル内に配置されている全てのリレーに対してチャンネル容量を計算することになるため、提案リレー選択法と全探索法は等価である。

3.2. リレー選択手順

提案リレー選択法では、3.1 で述べた候補リレー予備選択規範に従い、以下の手順でリレー選択を行う。

- 1) 式(8)で与えられる短区間平均伝搬ロス $P_{loss,M \rightarrow R}^{(loc)}$ または瞬時伝搬ロス $P_{loss,M \rightarrow R}^{(ins)}$ 規範に従い、セル内に配置されているリレーの中から J 個の候補リレーを予備選択する(選択された J 個の候補リレーの集合を $\mathbf{J} \in \{0, \dots, K-1\}$ で表わす)。
- 2) 各候補リレーに対して、電力配分およびサブキャリア割当てを行ったときのチャンネル容量を式(6)を用いて計算する。
- 3) 計算したチャンネル容量を比較し、次式に従って達成可能なチャンネル容量の最も大きいリレーを最終選択する。

$$R = \arg \max_{R \in \mathbf{J}} C_R^{(CR)} \quad (10)$$

3.3. 提案リレー選択法の計算量

提案リレー選択法と全探索法の計算量の違いは、①リレーの予備選択に要する計算、②チャンネル容量を計算するリレー数の違いにある。

リレーの予備選択には、端末・リレー間の短区間平均伝搬ロスまたは瞬時伝搬ロスの計算およびそれらの比較のための計算が必要である。短区間平均伝搬ロスの計算には $O(K)$ の実数除算、瞬時伝搬ロスの計算には $O(KN_c)$ の実数乗算および $O(K)$ の実数除算が必要となる。また、短区間平均伝搬ロスまたは瞬時伝搬ロスの比較に関して、例えばクイックソートを用いてソーティングを行うことで比較を行う場合、それぞれの伝搬ロスの比較には平均 $O(K \log_2 K)$ の実数減算が必要となる。

一方で、チャンネル容量の計算には $O(JN_c^2)$ の実数加算および実数乗算、 $O(JN_c)$ の実数除算が必要となる。一般に $N_c \gg K$ であると考えられるため、提案リレー選択法のリレーの予備選択に要する計算量はチャンネル容量の計算と比べて無視できるほど小さい。提案リレー選択法は全探索法と比較してチャンネル容量を計算するリレー数を J/K 倍に減らすことができるため、計算量を約 J/K 倍に低減することができる。

4. 数値計算結果

4.1. 数値計算パラメータ

モンテカルロ数値計算により、直接・協調リレー切り替えとスペクトル分割・適応サブキャリア割当てを用いるSC協調AFリレー伝送に提案リレー選択法を適用したときのチャンネル容量を求めた。本稿では、チャンネル容量の累積分布関数 $x\%$ 値を $x\%$ アウテージ容量と定義し、候補リレーの予備選択数 J をパラメータとして 1%アウテージ容量を評価する。候補リレーの予備選択規範として、第3章で提案した短区間平均伝搬ロスおよび瞬時伝搬ロス規範について検討する。

数値計算パラメータを表1に示す。 $L=16$ 個のパスから構成される等電力遅延プロファイルの周波数選択性チャンネルを仮定している。図4に示すようにリレーがセル内に $K=6$ 局または18局配置されているモデルを用いて評価を行う。 $K=6$ 局のリレーを配置する場合、各リレーは基地局から $r_{R \rightarrow B} = 2/3$ の位置に正六角形状に配置されるものとする。 $K=18$ 局のリレーを配置する場合、各リレーは基地局から $r_{R \rightarrow B} = 2/5$ および $4/5$ の位置に二層にわたって正六角形状に配置されるものとする。ユーザの位置はセル内で一様となるように決定している。 $N_c = 128$ 個のサブキャリアの中から $M = 64$ 個がユーザへ与えられる。ユーザは与えられた $M = 64$ 個のサブキャリアを $D = 32$ 個のサブブロックに分割する。

リレー・基地局間は固定通信であるため、リレーが送信電力 $\bar{P}_{i,R}$ で信号を送信したときの基地局における平均受信信号対雑音電力比 (SNR) $\Gamma_{M \rightarrow R}$ を、目標値 Δ (dB) を用いて $\Gamma_{R \rightarrow B} = 10 \log_2 (\bar{P}_{i,R} r_{R \rightarrow B}^{-\alpha} / N) + \Delta$ (dB) として評価を行っている。これは、基地局から距離 $r_{R \rightarrow B}$ の位置付近でリレー配置位置を探索したときの設計パラメータであり、シャドウイングに起因する値である。

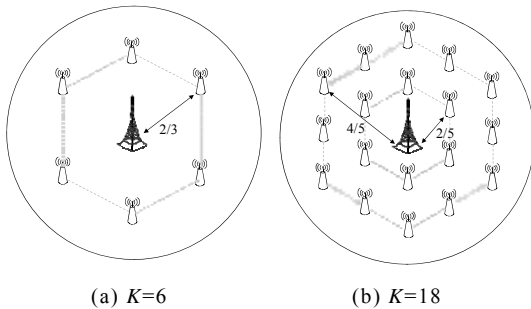


図4 数値計算モデル

表1 数値計算パラメータ

Fading type	Block Rayleigh fading
Power delay profile	Uniform
No. of paths	$L=16$
Time delay	$\tau_l = l, l=0 \sim L-1$
Number of Users	$U=1$
Total number of subcarriers	$N_c=128$
No. of subcarriers per user	$M=64$
No. of dividing SC spectra	$D=32$
Path loss exponent	$\alpha=3.5$
Shadowing loss standard variation	$\sigma=8.0$ (dB)
Design parameter	$\Delta=0,7,14$ (dB)

4.2. 1%アウテージ容量

図5に提案リレー選択法を用いたときの1%アウテージ容量を示す。ここで、図4(a)に示したように $K=6$ 局のリレーがセル内に配置されているものとした。また、正規化送信 SNR ($= \bar{P}_T / N$) を 10dB, 設計パラメータ Δ を 0dB として評価を行った。図5より、パス数が $L=1$ のときは瞬時伝搬ロス規範により候補リレーの予備選択を行うことで、短区間平均伝搬ロス規範を用いたときよりも少ない予備選択数で最大のチャンネル容量を達成できることが分かる。例えば、パス数が $L=1$ のとき、最大のチャンネル容量を達成できるリレーを選択するために瞬時伝搬ロス規範では $J=2$ 局, 短区間平均伝搬ロス規範では $J=3$ 局の候補リレーを予備選択する必要がある。これは、瞬時のチャンネルを考慮することでフェージングの変動に対応して候補リレーを予備選択することができるためである。

それに対し、パス数が $L=16$ のときは瞬時伝搬ロス規範と短区間平均伝搬ロス規範ともに予備選択数が $J=1$ で最大のチャンネル容量を達成できることが分かる。これは以下のように説明できる。パス数 L が大きいとき、大数の法則よりフェージング利得が次式のように平均化される。

$$\sum_{k=0}^{N_c-1} \frac{|H_{M \rightarrow R}(k)|^2}{N_c} \approx 1 \quad (11)$$

そのため、式(8)で与えられる瞬時伝搬ロス規範と短区間平均伝搬ロス規範は等価となる。また、リレー・基地局間リンクのチャンネルが常に高品質に保たれているため、リレー選択ではユーザの位置によってチャンネルが大きく変動する端末・リレー間リンクのチャンネルが支配的になる。したがって、端末・リレー間リンクのチャンネル品質の最もよいリレーを選択することで最大のチャンネル容量を達成することができる。

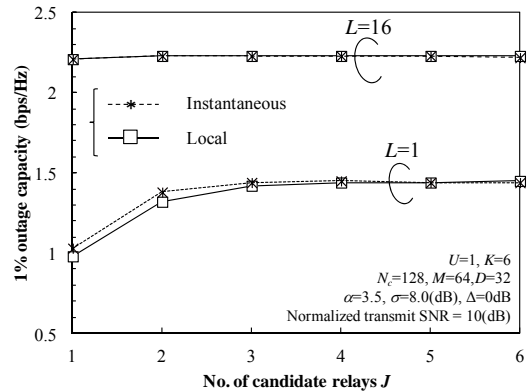


図5 1%アウテージ容量

4.3. リレー密度の影響

図6にセル内のリレー密度を変化させたときの1%アウテージ容量を示す。ここで、図4に示したように $K=6$ 局および $K=18$ 局のリレーがセル内に配置されているモデルを用いて評価を行った。図6より、リレー密度が高くなると最大のチャンネル容量を達成するために候補リレーの予備選択数を多くする必要があることが分かる。例えば、最大のチャンネル容量を達成するためには、リレーを $K=6$ 局配置した場合は $J=1$ 局,

リレーを $K=18$ 局配置した場合は $J=5$ 局の候補リレーを予備選択する必要がある。これは、リレー密度が高くなると各リレー・基地局間リンクの距離の違いが大きくなり、リレー選択においてリレー・基地局間リンクのチャンネルの影響が大きくなるためである。

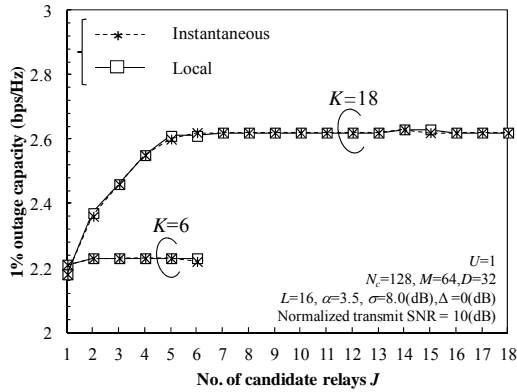


図 6 リレー密度と 1%アウテージ容量の関係

4.4. Δ の影響

図 7 に設計パラメータ Δ (dB) を変化させたときの 1%アウテージ容量を示す。ここで、セル内に配置するリレー数を $K=18$ 局とした。図 7 より、 Δ の値が大きくなるほど最大のチャンネル容量を達成するために必要な候補リレーの予備選択数を少なくできることが分かる。例えば、最大のチャンネル容量を達成するために必要な予備選択数は、 $\Delta=0$ (dB) のときは $J=5$ 、 $\Delta=7$ (dB) のときは $J=4$ 、 $\Delta=14$ (dB) のときは $J=3$ である。これは、 Δ の値を大きく設定するほどリレー・基地局間リンクのチャンネル品質が良好になるため、リレー選択においてリレー・基地局間リンクのチャンネルの影響が端末・リレー間リンクのチャンネルの影響と比べて非常に小さくなるためである。

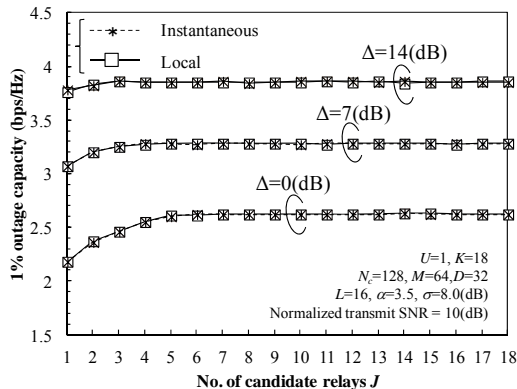


図 7 設計パラメータ Δ と 1%アウテージ容量の関係

5. まとめ

本稿では、直接・協調リレー切り替えとスペクトル分割・適応サブキャリア割当てを用いる SC 協調 AF リレー伝送を対象としたリレー選択法を提案した。提案リレー選択法ではチャンネル容量を計算するリレー数を少なくするためにリレーの予備選択を行う。リレーの予備選択規範として、瞬時伝搬ロス規範および短区

間平均伝搬ロス規範を提案した。提案リレー選択法を用いたときのチャンネル容量を評価し、パス数が多いときは短区間平均伝搬ロス規範で予備選択を行ったとしても、瞬時伝搬ロス規範を用いたときと同じ予備選択数で最大チャンネル容量を得られることを示した。また、リレーをセル内に 6 局および 18 局配置したとき、最大チャンネル容量を得るために必要な候補リレーの予備選択数はそれぞれ約 2 局および 5 局程度で十分であり、セル内に配置されている全てのリレーを考慮する必要はないことを示した。リレー密度が高くなると最大チャンネル容量を得るための候補リレー局の予備選択数を多くする必要があるが、リレー・基地局間リンクのチャンネル状態が良好な位置にリレーを配置することで予備選択数を少なくできることを示した。

文 献

- [1] 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, Dec.2004.
- [2] T. M. Cover and A. A. El Gamal, "Capacity Theorems For The Relay Channel," IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. IT-25, pp. 572-584, Sept. 1979.
- [3] Y. Oohama, "Capacity Theorems For Relay Channels With Confidential Messages," Proc. ISIT 2007, pp. 926-930, Jun. 2007.
- [4] H. G. Myung, J. Lim, and D. J. Goodman, "Single Carrier FDMA For Uplink Transmission," IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 1, No. 3, pp. 30-38, Sept. 2006.
- [5] 中田雅之, 武田 一樹, 安達文幸, "適応サブキャリア割当てを用いる SC-FDMA 協調リレーのチャンネル容量," 信学技報, RCS209-299, pp.239-244, 2010 年 3 月
- [6] M. Nakada, T. Obara, T. Yamamoto and F. Adachi, "Direct/Cooperative AF Relay Switching Using Spectrum Division/Adaptive Subcarrier Allocation For SC-FDMA Uplink," Proc. APWCS 2011, Aug. 2011.
- [7] 中田雅之, 小原辰徳, 山本哲矢, 安達文幸, "スペクトル分割・適応サブキャリア割当てを用いる SC-FDMA 直接・協調リレー切り替え通信における電力配分法," 信学技報, RCS2011-147, pp.41-46, 2011 年 10 月
- [8] Y. Zhao, R. Adve, and T. Lim, "Improving Amplify-and-Forward Relay Networks: Optimal Power Allocation Versus Selection," Proc. ISIT, pp. 1234-1238, Jul. 2006.
- [9] J. Zhang, L. Yang, and L. Hanzo, "Multi-User Performance Of The Amplify-and-Forward Single-Relay Assisted SC-FDMA Uplink" IEEE Trans Veh. Technol., pp. 1-5, Sept.2009.
- [10] P. Herhold, E. Zimmermann, and G. Fettweis, "On The Performance Of Cooperative Amplify-and-Forward Relay Networks," Proc. ITG SCC 2004, pp.451-458, Jan.2004.
- [11] 中田雅之, 武田一樹, 安達文幸, "直接・協調リレー選択 SC-FDMA 上りリンク通信におけるスペクトル分割・適応サブキャリア割当て," 信学技報, RCS2011-290, pp.241-245, 2011 年 3 月
- [12] S. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex Optimization." Cambridge Univ. Press, 2004.
- [13] H. Jeong, J. H. Lee, and H. Seo, "Resource Allocation For Uplink Multiuser OFDM Relay Networks With Fairness Constraints," Proc. IEEE Veh. Technol. Conf., pp. 1-5, Apr. 2009.