

# ポテンシャルゲームを用いた全二重無線リソース制御

代表研究者 山本 高至 京都大学 大学院情報学研究所 准教授

## 1 全二重無線通信のための無線リソース制御

通常の無線通信である半二重通信においては、図1(a)中の電波干渉(破線矢印)が深刻な影響を与えないよう制御が行われている。一方、全二重無線機や、中継機のみ送受信を同時に行う全二重中継機(in-band full-duplex relaying)が混在した図1(b)では、本質的に図1(a)と異なる複雑な電波干渉管理の必要性が生じる。

そこで、本研究では図1(b)のように全二重無線機が混在する無線通信システムにおいて、周波数チャンネルや送信電力の変更が電波干渉に与える影響を定式化するとともに、制御が図2のようなループを持たない条件を持つ最適化問題のクラスであるポテンシャルゲームが成立する条件を数学的に明確化することを目的とした。まず、全二重無線機のみが存在する場合の周波数チャンネル割当問題においてポテンシャルゲームが成立する条件を明らかにした。この内容を2章で述べる。

並行して、全二重通信と半二重通信を適応的に切り替える時分割スケジューリング方式も検討し、3章で述べる計算機シミュレーションベースの検討に加え、4章で述べるようなセルサイズや局数が性能に与える性質を明らかにするための理論解析についての初期検討も行った。

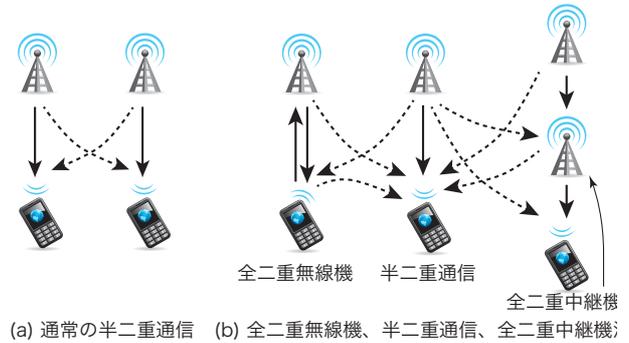


図1: 全二重通信による新たな電波干渉

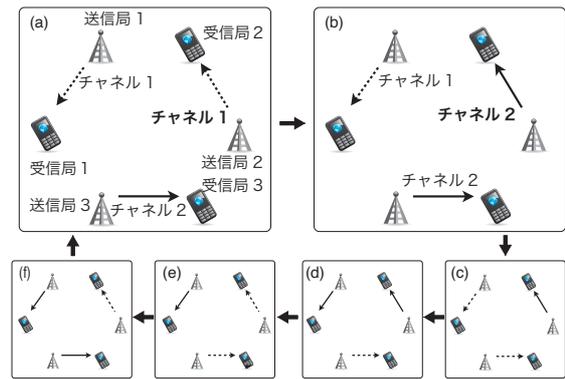


図2: ループの例 (破線: チャンネル1、実線: チャンネル2)

## 2 全二重無線ネットワークにおけるポテン

### シャルゲームに基づくチャンネル割当

#### 2-1 はじめに

双方向全二重通信(FD: Full-Duplex)のための適応チャンネル選択を、既存の半二重通信(HD: Half-Duplex)向けのチャンネル選択手法の修正により提案する。既存のチャンネル選択手法はシンメトリックインタラクション(対称相互作用)という性質を満たすよう設計されている。この性質があると定式化された数学的なゲームが、ポテンシャルゲームと呼ばれるクラスになることが証明できる。これによって、各局が自律分散的にチャンネルを選択したとしても、収束性が保証される。収束性が保証されるとは、ゲーム理論の言葉で言えば、ナッシュ均衡が存在し、かつ最適応答ダイナミクスなどが有限回数でそのナッシュ均衡に収束することを指す。収束性が保証されない場合は、例えば最適応答ダイナミクスがサイクルを持つような状況を指す。

特に双方向全二重通信に適用させるため、送信電力と受信干渉電力の積の和を、チャンネル選択の評価尺度として用いる利得関数に組み込むことで、上記収束性が保証されることを示す。計算機シミュレーションにより提案手法が効率的にチャンネルを割り当てられることを示す。

本章で得られた主な知見は以下の通りである。1) 一般に unilateral improvement dynamics と呼ばれるチャンネル変更ダイナミクスは、単に HD 向けのチャンネル選択手法を FD ネットワークで用いると、サイクルを持ち、収束しないことがあることを示す。2) チャンネル選択に使われる利得関数を修正し、FD ネットワークに

においても対称相互作用を持つような形にした。3) 提案するチャンネル選択ゲームがポテンシャルゲームになることを証明した。

## 2-2 ゲーム理論

無線通信の利用により、電波が届く範囲であれば有線での配線が難しい場所でも通信を成り立たせることが可能である。これは、電波が様々な方向に放射される同報性があるためである。一方で、同一周波数帯で同時に異なる複数の無線通信を行おうとすると、受信局において単純には同一チャンネル干渉が生じる。この同一チャンネル干渉は、複数の無線通信の間の相互作用と捉えることができる。

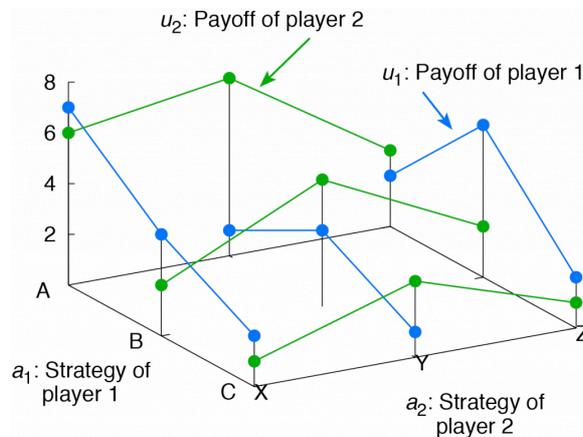
このような相互作用—特に複数の意思決定主体の間に存在する相互作用—がある状況における意思決定を扱う数学理論として、ゲーム理論 (Game Theory) が知られている。ゲーム理論は経済学で発展してきた理論であり、端的に言えばゲームと呼ばれるある種の最適化問題を扱う数学理論と言える。ゲームの中で最もシンプルな戦略形2人ゲームとは、次式のような問題設定のことを指す。

$$\begin{cases} \max_{a_1} u_1(a_1, a_2) \\ \max_{a_2} u_2(a_1, a_2) \end{cases}$$

片方の式のみであれば単純な最適化問題であり、上の最適化問題は  $a_2$  を固定した場合に関数  $u_1$  が最大となる変数  $a_1$  及びその場合の関数  $u_1$  の値を求めるという問題に過ぎない。ただ、2つの最適化問題が同時に存在するため、下の問題に上の問題の解が影響を与え、更に上の問題の解が下の問題の解にも影響を与える。これが戦略形ゲームで定式化できる相互作用である。

戦略形ゲームの解概念は、ナッシュ均衡と呼ばれるものである。ナッシュ均衡は、各プレーヤは自分の戦略のみを変更することでは利得関数をそれ以上上げられない戦略の組合せとして定義される。式で表すと次の条件を満たす  $a_1, a_2$  の組がナッシュ均衡である。

$$\begin{cases} u_1(a_1^*, a_2^*) = \max_{a_1} u_1(a_1, a_2^*) \\ u_2(a_1^*, a_2^*) = \max_{a_2} u_2(a_1^*, a_2) \end{cases}$$

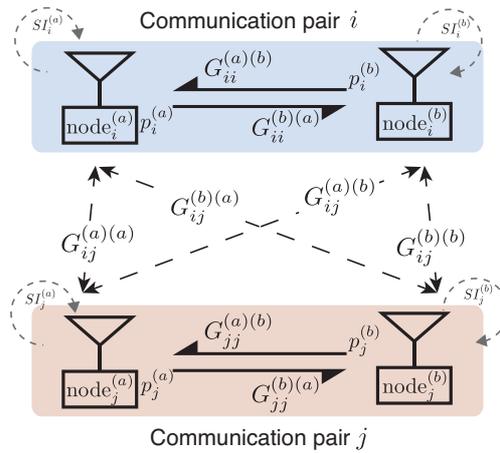


例として、上図により定義されるゲームのナッシュ均衡を説明する。この図では、各プレーヤの戦略の変更により利得関数を変化できる方向のみ線で繋いでおり、 $u_1$  はプレーヤ1が  $a_1$  を変化させることで意図的に変化できるため  $a_1$  方向に線を結んでいるが、 $a_2$  方向には結んでいない。

図におけるナッシュ均衡は、結論から述べると、 $(a_1, a_2) = (B, Y)$  という1点のみである。これは  $u_1$  を結ぶ線と  $u_2$  を結ぶ線の両方が最大となる点であり、そのような点は他には存在しないためである。この点ではいずれのプレーヤも自分のみが戦略を変更する限りにおいては利得を上げることが出来ない。

まず点  $(a_1, a_2) = (A, X)$  を考える。この点は、ナッシュ均衡ではない。これは、プレーヤ2は戦略を  $a_2 = X$  から  $a_2 = Y$  に変化させることで自分の利得  $u_2$  を増加させられるためである。変化させた点  $(a_1, a_2) = (A, Y)$  もナッシュ均衡ではない。今度はプレーヤ1が戦略を  $a_1 = A$  から  $a_1 = B$  に変化させることで利得  $u_1$  を増加させられるためである。最終的に、さらに変化させた点  $(a_1, a_2) = (B, Y)$  が先に述べた通りナッシュ均衡である。

## 2-3 チャンネル割当手法



上図にシステムモデルを示す。N 個の静的な送受信組を仮定し、それらが全二重通信を行っているとする。送受信組 i はチャンネル  $a_i$  を用いるとする。

HD 向けのチャンネル割当の際の利得関数として、

$$u1_i(a_i, \mathbf{a}_{-i}) = - \sum_{j \neq i} G_{ij} p_j \mathbb{1}_{\{a_i = a_j\}},$$

および

$$u2_i(a_i, \mathbf{a}_{-i}) = -p_i \sum_{j \neq i} G_{ij} p_j \mathbb{1}_{\{a_i = a_j\}}$$

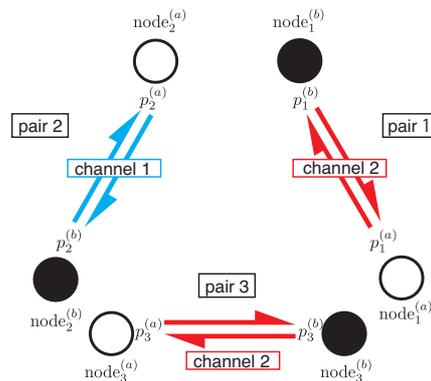
が知られている [Nee106] [Nee107] [Babadi10]。u1 は干渉電力が最小のチャンネルを選択する手法を表しており、u2 は干渉電力と送信電力の積が最小のチャンネルを選択する手法を表している。これらはポテンシャルゲーム [Monderer96] [Yamamoto15] となっており、チャンネル変更が有限回数で収束することが知られている。

まず u1 に対応する FD における利得関数を書き出すと、

$$u3_i(a_i, \mathbf{a}_{-i}) = - \sum_{s \in \mathcal{Q}} I_i^s(a_i, \mathbf{a}_{-i}) - \sum_{s \in \mathcal{Q}} SI_i^s(a_i),$$

$$I_i^s(a_i, \mathbf{a}_{-i}) = \sum_{j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}} \sum_{t \in \mathcal{Q}} G_{ij}^{st} p_j^t \mathbb{1}_{\{a_i = a_j\}} \cdot$$

となる。



ここで上図のようなシステムを考え、送信電力に差がある状況とすると、チャンネル変更がサイクルを持ち、収束しないことを示すことができた。

一方、u2 のように送信電力の積を用い

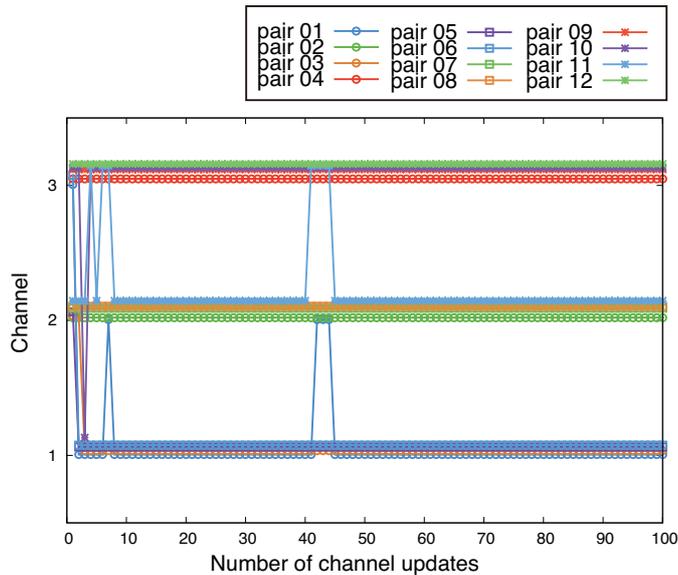
$$u4_i(a_i, \mathbf{a}_{-i}) = - \sum_{s \in Q} p_i^s I_i^s(a_i, \mathbf{a}_{-i}) - \sum_{s \in Q} p_i^s SI_i^s(a_i).$$

という利得関数を考えると、FD ネットワークであっても対称相互作用があり、そのポテンシャル関数が

$$f(a_i, \mathbf{a}_{-i}) = -\frac{1}{2} \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{s \in Q} p_i^s I_i^s(a_i, \mathbf{a}_{-i}) - \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{s \in Q} p_i^s SI_i^s(a_i)$$

と与えられることを示すことができた。すなわち、 $u4$  が大きい（干渉の小さい）チャンネルを順次選択すると、ポテンシャル関数  $f$  が単調に増加し、有限回数で収束することを示すことができた。

## 2-4 計算機シミュレーション



計算機シミュレーションの例を上図に示す。横軸が時刻、縦軸がチャンネルのインデックスを表しており、時刻 0 においてランダムにチャンネルを割り当てた後、提案する利得関数  $u4$  に基づいてチャンネル選択を行った結果を示している。有限回数で収束していることが確認できる。

## 2-5 まとめ

収束性が保証されている既存の半二重通信向けのチャンネル選択手法は、全二重通信ネットワークでは必ずしも収束性が保証されないことを明らかにした。その上で、全二重通信ネットワークでも収束性が保証されるような利得関数を明らかにし、計算機シミュレーションで確認した。

# 3 全二重セルラネットワークにおける重み付き PF スケジューリングの評価

## 3-1 はじめに

全二重通信（IBFD：In-Band Full-Duplex）では、無線機が送信と受信を同一周波数で同時に行うことで、高い周波数利用効率の実現が期待される。しかし、IBFD では自己干渉とユーザ間干渉が発生する。自己干渉は周囲の環境によって大きく変動しうるため、IBFD が半二重通信（HD：Half-Duplex）より低い伝送速度しか得られない可能性がある。したがって、IBFD を使用するシステムは自己干渉の大きさに応じて、IBFD と HD を切り替えることが望ましい。

本章では、セルラネットワークにおける IBFD について検討する。すなわち、基地局（BS：Base Station）が IBFD で送受信を同時に行い、ユーザが半二重（HD：Half-Duplex）通信で送信あるいは受信を行う。このようなセルラネットワークを全二重セルラ（FDC：Full-Duplex Cellular）ネットワークと呼ぶ。

文献[Shen13] [Goyal13]では、FDC ネットワークでの時間領域のスケジューリング方式が提案されている。このスケジューリング方式はプロポーショナルフェア (PF : Proportional Fair) スケジューリングを基にしている。PF スケジューリングは第 3 世代移動通信システムにおけるスケジューリング方式であり、マルチキャリア伝送や MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input Multiple-Output) でのユーザスケジューリングにも利用されている。しかし、このスケジューリング方式はユーザ間の公平性とシステムスループットを制御することはできない。

そこで、既存の FDC セルラネットワークにおけるプロポーショナルフェア (PF : Proportional Fair) スケジューリングに対し、システムスループットとユーザ間の公平性を制御するために、重み付き PF スケジューリング[Higuchi13] [Sang06]を定式化し、評価を行う。重み付き PF スケジューリングには、ユーザ間の公平性を決めるパラメータが導入されている。本方式は結果として自己干渉とユーザ間干渉の大きさに応じて HD と IBFD を切り替える。自己干渉が小さいとき、本方式は IBFD を選択することで高いシステムスループットが得られる。また、公平性を決めるパラメータを調整することで、高いシステムスループットまたは高いユーザ間の公平性の提供が可能である。

### 3-1 システムモデル

本章で想定する FDC ネットワークは、1 局の BS と N ユーザからなる。ただし、BS は IBFD と HD のいずれかを選択して使用できるが、ユーザは HD のみしか使うことができない。また、下り回線と上り回線には同一周波数を利用するものとする。

BS の送信した信号は BS 自身の所望受信信号に干渉する。この干渉を自己干渉と呼ぶ。また、ユーザ j の送信信号はユーザ i の所望受信信号に干渉する。この干渉をユーザ間干渉と呼ぶ。

各タイムスロットで、スケジューラは IBFD または HD を選択し、HD の場合は下り回線または上り回線を選択する。また、通信するユーザも選択する。

BS の送信信号と受信する自己干渉の比を自己干渉の利得と呼び、自己干渉の利得の平均値を  $G_{BS}$  とする。例えば、自己干渉の利得が -100 dB のとき、送信電力を 100 dB 低減した自己干渉を受信する。また、BS の送信電力を  $P_{BS}$ 、ユーザ i の送信電力を  $P_i$ 、雑音電力密度を  $N_0$ 、帯域幅を  $W$  とする。BS が IBFD 使用時、ユーザ i が送信した上り信号の SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise power Ratio) は

$$\text{SINR}_{BS,i}^{UL} = \frac{|h_{BS,i}|^2 G_{BS,i} P_i}{N_0 W + |h_{BS}|^2 G_{BS} P_{BS}}$$

となる。ただし、 $G_{BS,i}$  はユーザ i から BS への平均チャネル利得、 $h_{BS,i}$  と  $h_{BS}$  は 瞬時複素単位チャネル利得である。BS が IBFD を使用し、ユーザ i に下り回線、ユーザ j に上り回線を割り当てたとする。このとき、ユーザ i が受信する下り信号の SINR は

$$\text{SINR}_{i,BS}^{DL} = \frac{|h_{i,BS}|^2 G_{i,BS} P_{BS}}{N_0 W + |h_{i,j}|^2 G_{i,j} P_j}$$

となる。ただし、 $G_{i,j}$  はユーザ j からユーザ i へのチャネル利得、 $h_{i,BS}$  と  $h_{i,j}$  は 瞬時複素単位チャネル利得である。

### 3-2 FDC ネットワークのための重み付き PF スケジューリング

FDC ネットワークのための重み付き PF スケジューリングを定式化する。下り回線と上り回線に割り当てるユーザをユーザベクトル  $s=(i_1, i_2)$  と定義する。 $i_1$  は下り回線に割り当てるユーザ、 $i_2$  は上り回線に割り当てるユーザを表す。 $i_1=0$  は下り回線にどのユーザも割り当てられていないことを指し、 $i_2=0$  は上り回線にどのユーザも割り当てられていないことを指す。

文献[Goyal13]では、FDC ネットワークのための PF スケジューリングが提案されている。このスケジューリング方式では、スケジューラは下り回線の平均スループットと上り回線の平均スループットの対数和の和を最大化する。つまり、次式を最大化する。

$$u(t) = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^N \log R_k(i; t)$$

ただし、 $R_1(i;t)$ と $R_2(i;t)$ はそれぞれ、タイムスロット  $t$  でのユーザ  $i$  の下り回線の平均スループットとユーザ  $i$  の上り回線の平均スループットである。平均スループット  $R_k(i;t)$  は次式により表される。

$$R_k(i;t) = \left(1 - \frac{1}{T}\right) R_k(i;t-1) + \frac{1}{T} a_k(i;t) r_k(i;t)$$

ただし、 $a_1(i;t)$  はユーザ  $i$  がタイムスロット  $t$  で下り回線に割り当てられたとき 1、そうでなければ 0 となる。 $a_2(i;t)$  はユーザ  $i$  がタイムスロット  $t$  で上り回線に割り当てられたとき 1、そうでなければ 0 となる。 $r_1(i;t)$  はタイムスロット  $t$  におけるユーザ  $i$  の下り信号の伝送速度、 $r_2(i;t)$  はタイムスロット  $t$  におけるユーザ  $i$  の上り信号の伝送速度である。 $T$  は移動平均の重み係数である。

スケジューラは  $u(t)$  を最大化するユーザベクトル  $\mathbf{s}$  を次の規範に従い選択する。

$$\mathbf{s}^* = \arg \max_{\mathbf{s}} f(\mathbf{s})$$

$$f(\mathbf{s}) = \sum_{k=1}^2 \frac{r_k(i_k | \mathbf{s}; t)}{R_k(i_k | \mathbf{s}; t-1)}$$

ただし、 $f(\mathbf{s})$  はユーザベクトル  $\mathbf{s}$  の PF スケジューリングメトリックである。また、 $i_1=0$  は  $r_1(i_1;t)=0$  を意味し、 $i_2=0$  は  $r_2(i_2;t)=0$  を意味する。

上式に公平性のパラメータ  $\alpha_k$  を導入することで、重み付き PF スケジューリングを定式化する。 $\alpha_1$  と  $\alpha_2$  をそれぞれ下り回線と上り回線のユーザ間の公平性を決定するパラメータとすると、各タイムスロットで、スケジューラは次式のスケジューリングメトリック  $g(\mathbf{s})$  を最大化させるユーザベクトル  $\mathbf{s}$  を選択する。

$$\mathbf{s}^* = \arg \max_{\mathbf{s}} g(\mathbf{s})$$

$$g(\mathbf{s}) = \sum_{k=1}^2 \frac{r_k(i_k | \mathbf{s}; t)}{R_k(i_k | \mathbf{s}; t-1)^{\alpha_k}}$$

本方式は、

$$\max g(\mathbf{s}) = r_1(i;t)/R_1(i;t-1)^{\alpha_1}$$

のとき、タイムスロット  $t$  でユーザ  $i$  に下り回線、ユーザ  $j$  に上り回線を割り当てる IBFD を行う。

$$\max g(\mathbf{s}) = r_2(j;t)/R_2(j;t-1)^{\alpha_2}$$

のとき、タイムスロット  $t$  でユーザ  $i$  は HD で BS に上り信号を送信する。

$$\max g(\mathbf{s}) = r_1(i;t)/R_1(i;t-1)^{\alpha_1} + r_2(j;t)/R_2(j;t-1)^{\alpha_2}$$

のとき、タイムスロット  $t$  でユーザ  $i$  に下り回線、ユーザ  $j$  に上り回線を割り当てる IBFD を行う。

ユーザ間の公平性は  $\alpha_k$  によって決まる。 $\alpha_k$  が小さいほど、システムスループットは高くなり、 $\alpha_k$  が大きいほど、ユーザ間の公平性が高くなる。 $\alpha_1=\alpha_2=0$  のとき、スケジューラは瞬時伝送速度が最大となるユーザと通信を選択し、公平性を無視する。また、 $\alpha_1=\alpha_2=1$  のとき、本スケジューラは PF スケジューラと一致する。

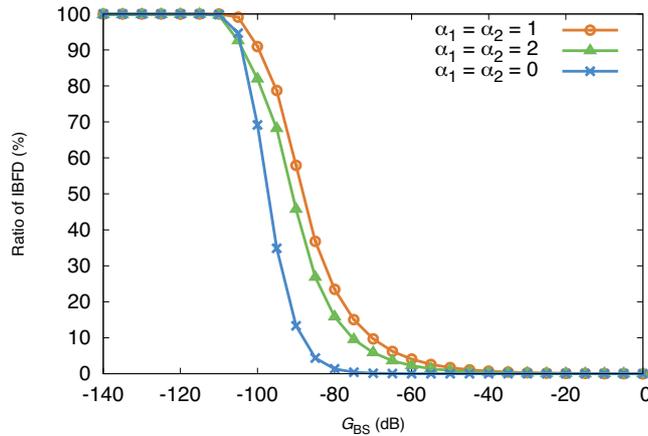
### 3-3 シミュレーション結果

本研究では、FDC ネットワークのための重み付き PF スケジューリングをシミュレーションにより評価した。伝送速度はシャノン容量で与えられるとした。シミュレーションで用いたパラメータを下表に示す。

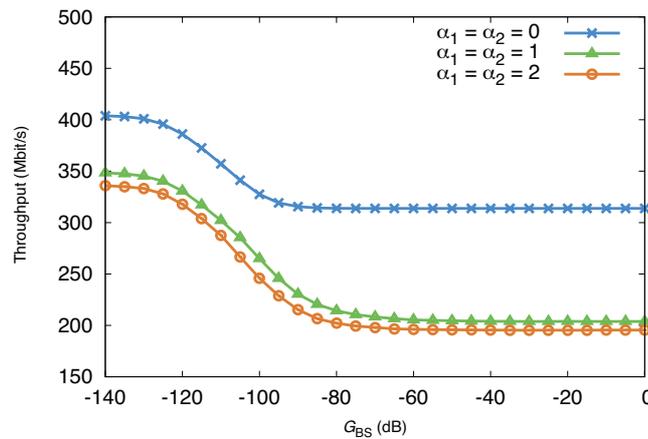
ユーザ数	10
BS 送信電力 $P_{BS}$	20 dBm
BS アンテナ利得	14 dBi
ユーザ送信電力 $P_i$	10 dBm
ユーザアンテナ利得	0 dBi
雑音電力密度 $N_0$	-174 dBm/Hz
帯域幅 $W$	10 MHz
伝搬損	$128.1 + 37.6 \log_{10}(D)$ dB ( $D$ in km)
$T$	100
チャンネル	準静的レイリーフェージング

ユーザは半径  $d$  m のセルに一樣ランダムに配置する。通信チャンネルの瞬時複素単位チャンネル利得及びユーザ間干渉チャンネルの瞬時複素単位チャンネル利得はレイリーフェージングに従うとする。自己干渉チャンネル利

得の平均値はユーザの配置に関わらず一定とし、 $|h_{BS}|^2=1$  とする。また、下り回線、上り回線ともにトラヒックは飽和状態とする。



スケジューラが選択する IBFD と HD それぞれの割合とパラメータ  $\alpha_k$  の関係を調べた。上図に  $\alpha_k=0, 1, 2$  それぞれの場合の、スケジューラが IBFD を選択する割合を示す。セル半径  $d=100\text{m}$  とする。  $G_{BS}$  が小さいとき、IBFD の割合は高い。  $G_{BS}$  が大きくなるにつれて、IBFD を選択する割合は減少し、0%となる。  $G_{BS} = -100\text{ dB}$  から  $-40\text{ dB}$  の範囲では、  $\alpha_k=0$  のとき、最も IBFD を選択する割合が低い。これは、  $\alpha_k=0$  のとき、スケジューラは伝送速度が最大となる割当を行うためである。  $G_{BS}=-100\text{ dB}$  から  $-40\text{ dB}$  の範囲では、  $\alpha_k=2$  のときの方が  $\alpha_k=1$  のときより、IBFD を選択する割合が低い。これは、  $\alpha_k=2$  のとき、平均スループットの低いユーザに HD を割り当てることで、高いユーザ間の公平性を提供するためだと考えられる。

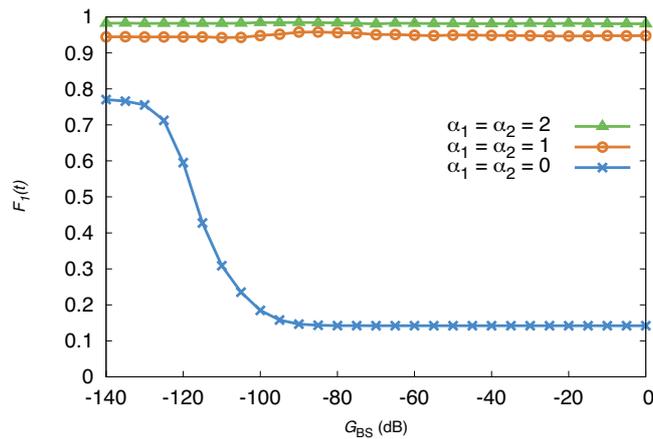


上図に  $\alpha_k=0, 1, 2$  それぞれの場合の、システムスループットを示す。セル半径  $d=100\text{ m}$  とする。  $G_{BS}$  が小さいとき、システムスループットは高い。これは、  $G_{BS}$  が大きいとき、スケジューラが IBFD を選択する割合が高いためである。また、  $G_{BS}$  が大きくなるにつれて、システムスループットは一定値に近づく。これは、  $G_{BS}$  が大きいとき、スケジューラは高い割合で HD を選択し、HD の伝送速度は  $G_{BS}$  の影響を受けないためである。さらに、  $\alpha_k$  が小さいほど、システムスループットは高くなる。これは、  $\alpha_k$  が小さいとき、スケジューラは瞬時伝送速度が大きなユーザを選択するためである。

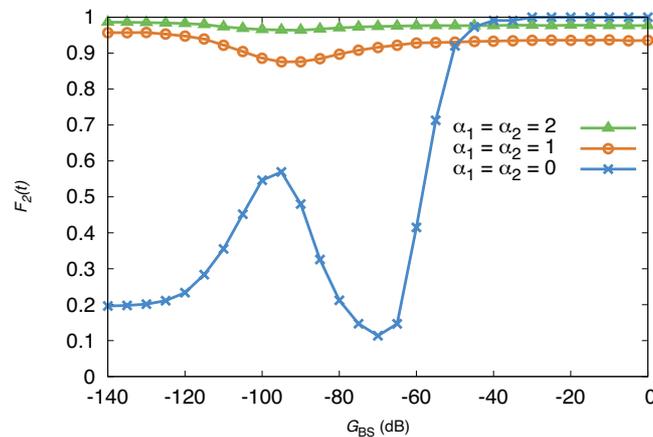
次式に示す公平性の指標 [Jain84] を用いて、ユーザ間の伝送速度の公平性を評価する。

$$F_k(t) = \frac{\left[ \sum_i^N R_k(i;t) \right]^2}{N \sum_i^N R_k(i;t)^2}, k \in \{1, 2\}$$

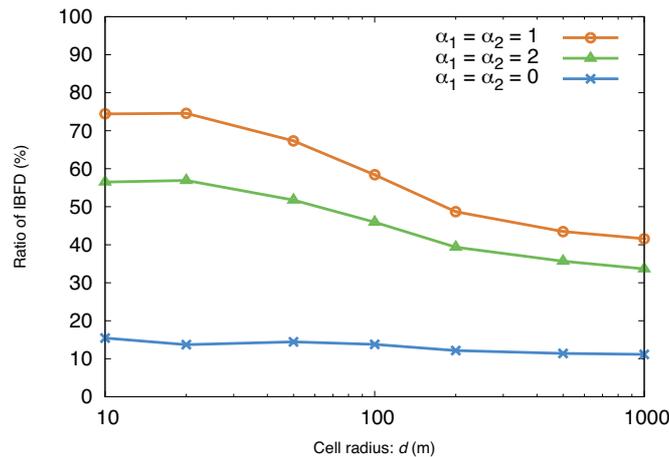
ただし、  $F_1(t)$  と  $F_2(t)$  はそれぞれ下り回線と上り回線の伝送速度の公平性の指標である。また、  $F_1(t)=[0, 1]$  であり、  $F_k(t)$  が大きいほど伝送速度は公平となる。  $F_k(t)$  のとき、全ユーザの平均スループットが同じ値である。



上図に下り回線におけるユーザ間の伝送速度の公平性を示す。セル半径  $d=100$  m とする。 $\alpha_k$  が大きいほど、伝送速度の公平性は高くなる。また、 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  の場合は、 $G_{BS}$  が小さいとき、公平性は高くなる。これは、 $G_{BS}$  が小さいとき、IBFD の上り回線の伝送速度は下り回線の伝送速度より高く、IBFD の合計の伝送速度は上り回線の伝送速度で決まり、下り回線のユーザ選択に依存しないためだと考えられる。



上図に上り回線におけるユーザ間の伝送速度の公平性を示す。下り回線と同様に、 $\alpha_k$  が大きいほど、伝送速度の公平性は高くなる。また、 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  では、 $G_{BS}$  が十分大きいとき、伝送速度の公平性は高くなる。送信電力の差から、HD では、上り回線より下り回線の伝送速度の方が高い。 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  のとき、スケジューラは瞬時伝送速度が最大となる割当を行うため、ユーザが上り回線を割り当てられるのは、スケジューラが IBFD を選択するときのみである。 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  では、 $G_{BS}$  が十分大きいとき、スケジューラは HD のみしか選択しないため、ユーザが上り回線を割り当てられることはない。したがって、 $G_{BS}$  が十分大きいとき、全ユーザの上り回線の平均スループットは小さくなり、伝送速度の公平性は高くなる。また、 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  では、 $G_{BS} = -100$  dB あたりで、伝送速度の公平性は高くなる。これは、 $G_{BS} = -100$  dB あたりで、IBFD の上り回線と下り回線の伝送速度が近い値になるためだと考えられる。IBFD の上り回線と下り回線の伝送速度が近い値のとき、ユーザ選択の偏りが小さくなり、公平性は高くなる。さらに、 $G_{BS}$  が大きくなると、上り回線の伝送速度が十分小さいユーザが現れ、そのようなユーザは選択されないため、公平性は低くなる。



セル半径  $d$  とスケジューラが IBFD を選択する割合の関係について調べる。上図にセル半径  $d$  に対するスケジューラが IBFD を選択する割合を示す。ただし、 $G_{BS} = -90$  dB とする。下り回線と同様に、 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$  のとき、IBFD を選択する割合が最も高く、 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  のとき、HD を選択する割合が最も高い。また、セル半径が大きくなるにつれて IBFD を選択する割合は低くなることを確認できる。ユーザ分布は一様であるため、セル半径が大きいくほど BS とユーザ間の距離が大きくなる確率が高くなる。自己干渉の利得  $G_{BS}$  と送信電力  $P_{BS}$  は BS とユーザ間の距離に関わらず一定であるため、BS とユーザ間の距離が離れるにつれて所望信号の受信電力は小さくなり、自己干渉の影響が大きくなる。したがって、セル半径が大きくなるにつれて IBFD を選択する割合は低くなる。

### 3-4 まとめ

本稿では、FDC ネットワークのための重み付き PF スケジューリングを定式化した。本方式はユーザ間の公平性を決めるパラメータ  $\alpha_k$  を導入することで、既存方式を一般化したものである。本方式をシミュレーションにより評価した。シミュレーション結果より、スケジューラは自己干渉が小さいとき IBFD を選択し、自己干渉が大きいとき HD を選択する。本方式はパラメータ  $\alpha_k$  を大きくすることで、高い公平性を提供し、 $\alpha_k$  を小さくすることで、高いシステムスループットを提供した。また、BS とユーザ間の距離に関わらず自己干渉の利得  $G_{BS}$  は一定のため、セル半径が大きくなるほど、スケジューラが IBFD を選択する割合が低くなった。

## 4 FDC ネットワークにおけるユーザスケジューリング特性解析

### 4-1 はじめに

FDC におけるユーザスケジューリングの特性解析をすることで、自己干渉とユーザ間干渉が FDC に与える影響を評価することができる。文献[Yang06]では、シングルセルにおける DL スケジューリングの特性を解析している。SNR (Signal-to-Noise power Ratio) を最大化するスケジューリングと、正規化した SNR を最大化するスケジューリングを検討し、後者は PF スケジューリングに基づいている。それぞれのスケジューリングについて、あるユーザが選択される確率、システム容量、公平性を定式化している。従来のセルラネットワークのスケジューリングとは違い、FDCでは、DLユーザと同時にULユーザのスケジューリングを行うため、DL と UL の通信品質に基づいた特性解析が必要となる。加えて、自己干渉とユーザ間干渉が通信品質に与える影響を考慮する必要がある。

本稿では、レイリーフェージング環境下の FDC におけるユーザスケジューリングの特性解析を行う。ユーザスケジューリングの特性を解析することで、自己干渉とユーザ間干渉が FDC に及ぼす影響を調べる。また、FDC におけるマルチユーザダイバーシチ利得を調べる。本稿では、DL と UL の SINR の和を最大化するスケジューリングと、正規化した SINR の和を最大化するスケジューリングの特性解析を行う。後者は FDC における PF スケジューリングに基づいている。各スケジューリングについて、あるユーザが選択される確率、システ

ム容量、ユーザ間の公平性を定式化する。

## 4-2 システムモデル

本稿では、FDC の一般的な特性解析を目的とし、簡易的なシステムモデルを想定する。すなわち、既存のセルラネットワークは前提としていない。

シングルセルモデルを想定する。スケジューラは各タイムスロットで一つのユーザペアを選択する。ユーザペア  $k$  は DL ユーザ  $k$  と UL ユーザ  $k$  からなるユーザの組み合わせとする。UL ユーザ  $k$  の送信と BS から DL ユーザへの送信が同時に行われる。ユーザペア数は  $k$  とする。また、DL ユーザ  $k$  と UL ユーザ  $k$  はユーザペア  $k$  以外のユーザペアには属さない。つまり、DL ユーザ  $k$  が選択されるとき、常に UL ユーザ  $k$  が選択される。

タイムスロット  $t$  における DL と UL の受信信号  $r_{D,k}(t)$  と  $r_{U,k}(t)$  は次式で表されるとする。

$$r_{D,k}(t) = h_{D,k}(t)x_D(t) + i_k(t)x_U(t) + n_{D,k}(t)$$

$$r_{U,k}(t) = h_{U,k}(t)x_U(t) + s_k(t)x_D(t) + n_{U,k}(t)$$

ただし、 $x_D(t)$  と  $x_U(t)$  はそれぞれ DL と UL の送信信号、 $h_{D,k}(t)$  と  $h_{U,k}(t)$  はそれぞれ DL と UL チャネルの複素振幅、 $n_{D,k}(t)$  と  $n_{U,k}(t)$  はそれぞれ DL と UL の雑音、 $i_k(t)$  は DL ユーザ  $k$  のユーザ間干渉チャネルの複素振幅、 $s_k(t)$  は UL ユーザ  $k$  の自己干渉チャネルの複素振幅とする。

$x_D(t)$  と  $x_U(t)$  の平均送信電力は時間的に一定とする。すなわち、 $E(|x_D(t)|^2)=1$ 、 $E(|x_U(t)|^2)=1$  とする。簡単のため、 $i_k(t)$  と  $s_k(t)$  の振幅は定数とする。すなわち、 $|i_k(t)| = I_k$ 、 $|s_k(t)| = SI_k$  とする。 $n_{D,k}(t)$  と  $n_{U,k}(t)$  は分散  $\sigma_n^2$  の i. i. d. (independent and identically distributed) 円対称複素ガウス雑音とする。BS とユーザ間のチャネルは準静的レイリーフェージングチャネルとする。ただし、 $h_{D,k}(t)$  と  $h_{U,k}(t)$  はそれぞれタイムスロット間で無相関とする。ただし、チャネルの複素振幅はユーザ間で独立とするが、必ずしも同じ分布に従うとは限らないものとする。

$h_{D,k}(t)$  と  $h_{U,k}(t)$  の振幅をそれぞれ  $\alpha_{D,k}(t)$  と  $\alpha_{U,k}(t)$  とする。すなわち、 $\alpha_{D,k}(t) = |h_{D,k}(t)|$ 、 $\alpha_{U,k}(t) = |h_{U,k}(t)|$  とする。 $\alpha_{D,k}(t)$  と  $\alpha_{U,k}(t)$  はレイリーフェージングチャネルのチャネル振幅であるから、pdf (probability density function) は次式で与えられる。

$$f_{\alpha_{D,k}}(x) = \frac{2x}{\Omega_{D,k}} \exp\left(-\frac{x^2}{\Omega_{D,k}}\right), \quad x \geq 0$$

$$f_{\alpha_{U,k}}(x) = \frac{2x}{\Omega_{U,k}} \exp\left(-\frac{x^2}{\Omega_{U,k}}\right), \quad x \geq 0$$

ただし、 $\Omega_{D,k}(t) := E(\alpha_{D,k}(t))$ 、 $\Omega_{U,k}(t) := E(\alpha_{U,k}(t))$  とする。

文献[Shen13][Goyal13]で提案される FDC のための PF スケジューリングでは、DL と UL の瞬時伝送速度と平均スループットの比の和を最大化するユーザペアを選択する。つまり、提案されたスケジューリングは次式を最大化するユーザペアを選択する。

$$\frac{r_{D,k}(t)}{\bar{r}_{D,k}(t)} + \frac{r_{U,k}(t)}{\bar{r}_{U,k}(t)}$$

ただし、 $r_{D,k}(t)$  と  $r_{U,k}(t)$  はそれぞれ DL と UL の瞬時伝送速度、上線付  $\bar{r}_{D,k}(t)$  と  $\bar{r}_{U,k}(t)$  はそれぞれ DL と UL の平均スループットである。

文献[Yang06]では、PF スケジューリングに基づくスケジューリングとして、正規化した SNR を最大化するスケジューリングの特性解析を行っている。これと同様に、文献[Shen13][Goyal13]で提案されている FDC における PF スケジューリングに基づくスケジューリングとして、正規化した SINR の和を最大化するスケジューリングの特性解析を行う。すなわち、次式を最大化するユーザペアを選択するスケジューリングの特性解析を行う。

$$\frac{\gamma_{D,k}(t)}{\bar{\gamma}_{D,k}} + \frac{\gamma_{U,k}(t)}{\bar{\gamma}_{U,k}}$$

ただし、 $\gamma_{D,k}(t)$  と  $\gamma_{U,k}(t)$  は DL と UL の SINR とし、 $\gamma_{D,k}(t) := \alpha_{D,k}(t)^2 / (\sigma_n^2 + I_k)$ 、 $\gamma_{U,k}(t) := \alpha_{U,k}(t)^2 / (\sigma_n^2 + SI_k)$  と表される。また、上線付  $\bar{\gamma}_{D,k}(t)$  と上線付  $\bar{\gamma}_{U,k}(t)$  は DL と UL の SINR とし、上線付  $\bar{\gamma}_{D,k}(t) := \Omega$

$d_{,k}(t)/(\sigma_n^2 + I_k)$ 、上線付  $\gamma_{u,k}(t) := \Omega_{u,k}(t)/(\sigma_n^2 + SI_k)$  と表される。

SINR の和を最大化するスケジューリングを`SINR 最大化スケジューリング`、正規化した SINR の和を最大化するスケジューリングを`正規化 SINR 最大化スケジューリング`と呼ぶ。二つのスケジューリングについて、あるユーザペアが選択される確率、システム容量、ユーザペア間の公平性を定式化する。

#### 4-3 特性解析

SINR 最大化スケジューリングにおける、あるユーザペアが選択される確率、システム容量、ユーザペア間の公平性を定式化する。

レイリーフェージングを仮定したため、 $\gamma_{d,k}(t)$  と  $\gamma_{u,k}(t)$  の pdf はそれぞれ、

$$f_{\gamma_{D,k}}(x) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{D,k}} \exp\left(-\frac{x}{\bar{\gamma}_{D,k}}\right), \quad x \geq 0$$

$$f_{\gamma_{U,k}}(x) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{U,k}} \exp\left(-\frac{x}{\bar{\gamma}_{U,k}}\right), \quad x \geq 0$$

である。DL と UL の SINR の和を  $\gamma_k(t) = \gamma_{d,k}(t) + \gamma_{u,k}(t)$  とすると、 $\gamma_k(t)$  の pdf は

$$f_{\gamma_k}(x) = \frac{e^{-x/\bar{\gamma}_{U,k}} - e^{-x/\bar{\gamma}_{D,k}}}{\bar{\gamma}_{U,k} - \bar{\gamma}_{D,k}}, \quad x \geq 0$$

となる。4-2 で、DL ユーザ  $k$  と UL ユーザ  $k$  はユーザペア  $k$  以外のユーザペアに属さない設定とした理由は、 $\gamma_k(t)$  の独立性を保証するためである。

ユーザペア  $k$  が選択される確率  $P_k$  を求める。次式を満たすとき、ユーザペア  $k$  が選択される。

$$\gamma_k > \gamma_*$$

$$\gamma_* := \max_{\substack{l=1,\dots,L \\ l \neq k}} \gamma_l$$

したがって、 $P_k$  は、

$$\begin{aligned} P_k &= P_r[\gamma_k > \gamma_*] \\ &= \int_0^\infty f_{\gamma_k}(x) \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^L F_{\gamma_l}(x) dx \\ &= \int_0^\infty \frac{e^{-x/\bar{\gamma}_{U,k}} - e^{-x/\bar{\gamma}_{D,k}}}{\bar{\gamma}_{U,k} - \bar{\gamma}_{D,k}} \\ &\quad \times \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^L \frac{\bar{\gamma}_{D,l} (e^{-x/\bar{\gamma}_{D,l}} - 1) - \bar{\gamma}_{U,l} (e^{-x/\bar{\gamma}_{U,l}} - 1)}{\bar{\gamma}_{U,l} - \bar{\gamma}_{D,l}} dx \\ &= \int_0^\infty \frac{e^{-x/\bar{\gamma}_{U,k}} - e^{-x/\bar{\gamma}_{D,k}}}{\bar{\gamma}_{U,k} - \bar{\gamma}_{D,k}} \sum_{\tau \in T_k^L} G_\tau \exp(-\tau x) dx \\ &= \sum_{\tau \in T_k^L} \frac{G_\tau}{\bar{\gamma}_{D,k} - \bar{\gamma}_{U,k}} \left( \frac{1}{\bar{\gamma}_{U,k} + \tau} - \frac{1}{\bar{\gamma}_{D,k} + \tau} \right) \end{aligned}$$

となる。ただし、 $F_{\gamma_l}(\cdot)$  は  $\gamma_l$  の cdf (cumulative distribution function) とする。 $T_k^L$  は

$$\prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^L \frac{\bar{\gamma}_{D,l} (e^{-x/\bar{\gamma}_{D,l}} - 1) - \bar{\gamma}_{U,l} (e^{-x/\bar{\gamma}_{U,l}} - 1)}{\bar{\gamma}_{U,l} - \bar{\gamma}_{D,l}}$$

を展開し、 $e$  の指数部のうち、 $x$  の係数の集合とする。また、 $\exp(-\tau x)$  の係数を  $G_\tau$  とする。

ユーザペア  $k$  のスループット  $C_k$  は、

$$\begin{aligned}
C_k &= \int_0^\infty \int_0^{\gamma_{\max}} [\log_2(1 + \gamma_D) + \log_2(1 + \gamma_{\max} - \gamma_D)] \\
&\quad \times f_{\gamma_{D,k}}(\gamma_D) f_{\gamma_{U,k}}(\gamma_{\max} - \gamma_D) \\
&\quad \times \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^L F_{\gamma_l}(\gamma_{\max}) d\gamma_D d\gamma_{\max} \\
&= \sum_{\tau \in \mathcal{T}_k^L} \frac{\log_2 e G_\tau}{\bar{\gamma}_{D,k} - \bar{\gamma}_{U,k}} \left( \frac{1}{\frac{1}{\bar{\gamma}_{U,k}} + \tau} - \frac{1}{\frac{1}{\bar{\gamma}_{D,k}} + \tau} \right) \\
&\quad \times \left[ \exp\left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{D,k}} + \tau\right) E_1\left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{D,k}} + \tau\right) \right. \\
&\quad \left. + \exp\left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{U,k}} + \tau\right) E_1\left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{U,k}} + \tau\right) \right]
\end{aligned}$$

となる。ただし、 $E_1(\cdot)$ は一次の指数積分であり、次式で与えられる。

$$E_1(x) = \int_1^\infty \frac{e^{-xt}}{t} dt, \quad x \geq 0$$

したがって、システム容量  $C$  は、

$$C = \sum_{k=1}^L C_k$$

となる。

文献[Elliott02]で提案されている公平性の定量的定義を用いて、ユーザペア間の公平性  $f$  を求める。提案された定義は、システム全体におけるユーザペア間の公平性だけでなく、個々のユーザペアの公平性を定量的に示すことができる。本稿では、ユーザペア間の公平性のみ定式化する。公平性  $f$  は、

$$f = - \sum_{k=1}^L \frac{P_k \log(P_k)}{\log L}$$

となる。

正規化 SINR 最大化スケジューリングにおける、あるユーザペアが選択される確率、システム容量、ユーザペア間の公平性を定式化する。DL と UL の正規化した SINR をそれぞれ、 $\beta_{D,k}(t)$ 、 $\beta_{U,k}(t)$  とすると、 $\beta_{D,k}(t)$  と  $\beta_{U,k}(t)$  の pdf は、

$$f_{\beta_{D,k}}(x) = \exp(-x), \quad x \geq 0$$

$$f_{\beta_{U,k}}(x) = \exp(-x), \quad x \geq 0$$

となる。正規化した SINR の和を  $\beta_k(t) := \beta_{D,k}(t) + \beta_{U,k}(t)$  とすると、 $\beta_k(t)$  の pdf は、

$$f_{\beta_k}(x) = x \exp(-x), \quad x \geq 0$$

となる。

ユーザペア  $k$  が選択される確率  $P_k$  を求める。次式を満たすとき、ユーザペア  $k$  が選択される。

$$\beta_k > \beta_*$$

$$\beta_* := \max_{\substack{l=1, \dots, L \\ l \neq k}} \beta_l$$

したがって、 $P_k$  は、

$$\begin{aligned}
P_k &= P_i[\beta_k > \beta_*] \\
&= \int_0^\infty f_{\beta_k}(x) \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^L F_{\beta_l}(x) dx \\
&= \int_0^\infty x e^{-x} [1 - e^{-x} (1+x)]^{L-1} dx \\
&= \sum_{n=1}^{L-1} \binom{L-1}{n} \frac{(-1)^n}{n+1} \\
&= \frac{1}{L}
\end{aligned}$$

となる。ただし、 $F_{\beta_1}(\cdot)$  は  $\beta_1$  の cdf とする。  
ユーザペア  $k$  のスループット  $C_k$  は、

$$\begin{aligned}
C_k &= \int_0^\infty \int_0^{\beta_{\max}} [\log_2(1 + \beta_D \bar{\gamma}_{D,k}) \\
&\quad + \log_2(1 + (\beta_{\max} - \beta_D) \bar{\gamma}_{U,k})] \\
&\quad \times f_{\gamma_{D,k}}(\bar{\gamma}_{D,k} \beta_D) f_{\gamma_{U,k}}(\bar{\gamma}_{U,k} (\beta_{\max} - \beta_D)) \\
&\quad \times \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^L F_{\beta_l}(\beta_{\max}) d\beta_D d\beta_{\max} \\
&= \frac{\log_2 e}{\bar{\gamma}_{D,k} \bar{\gamma}_{U,k}} \int_0^\infty \left[ \frac{1 + \bar{\gamma}_{D,k} \beta_{\max}}{\bar{\gamma}_{D,k}} \log(1 + \bar{\gamma}_{D,k} \beta_{\max}) \right. \\
&\quad \left. + \frac{1 + \bar{\gamma}_{U,k} \beta_{\max}}{\bar{\gamma}_{U,k}} \log(1 + \bar{\gamma}_{U,k} \beta_{\max}) - 2\beta_{\max} \right] \\
&\quad \times \sum_{n=1}^{L-1} \binom{L-1}{n} (-1)^n (1 + \beta_{\max})^n e^{-(n+1)\beta_{\max}} d\beta_{\max}
\end{aligned}$$

となる。したがって、システム容量  $C$  は、

$$C = \sum_{k=1}^L C_k$$

となる。

ユーザペア間の公平性  $f$  は、

$$\begin{aligned}
f &= - \sum_{k=1}^L \frac{P_k \log(P_k)}{\log L} \\
&= 1
\end{aligned}$$

となる。

#### 4-4 数値評価

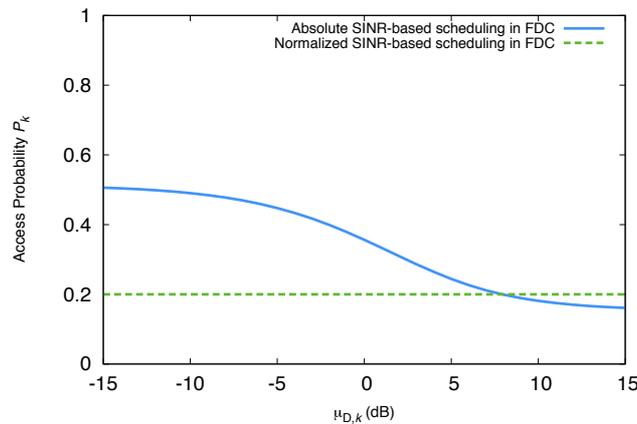
本章では、数値評価により SINR 最大化スケジューリングと正規化 SINR 最大化スケジューリングの特性を調べる。ユーザペア  $k$  の DL ユーザと UL ユーザの HD 通信時の平均 SNR をそれぞれ上線付  $\delta_{D,k}(t)$ 、 $\delta_{U,k}(t)$  とする。ユーザペア  $k$  のユーザ間干渉電力  $I_k$  と熱雑音電力の比を  $\mu_{D,k}(t)$ 、自己干渉電力  $SI_k$  と熱雑音電力の比を  $\mu_{U,k}(t)$  とすると、上線付  $\gamma_{D,k}(t)$  と  $\gamma_{U,k}(t)$  は、

$$\bar{\gamma}_{D,k} = \frac{1}{1 + \mu_{D,k}} \bar{\delta}_{DL,k}, \quad \bar{\gamma}_{U,k} = \frac{1}{1 + \mu_{U,k}} \bar{\delta}_{UL,k}$$

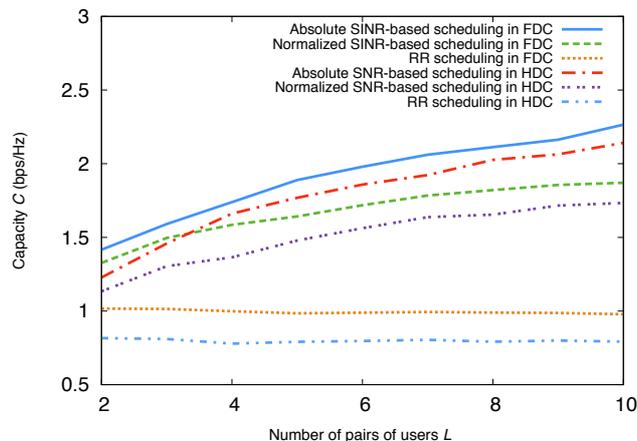
と表される。

本評価では、文献[Yang06]と同様に、上線付  $\delta_{d,k}(t)$ 、 $\delta_{u,k}(t)$  は 0 から 1 の一様乱数とし、それぞれの和が 1 となるように正規化する。また、比較の公正性のため、上線付  $\delta_{d,k}(t)$ 、 $\delta_{u,k}(t)$  の値はすべてのスケジューリングで同じ値とする。

以下、図中で、SINR 最大化スケジューリングを「Absolute SINR-based scheduling in FDC」、正規化 SINR 最大化スケジューリングを「Normalized SINR-based scheduling in FDC」、HD 通信の SNR を最大化する DL スケジューリングを「Absolute SNR-based scheduling in HDC」、HD 通信の正規化 SNR を最大化する DL スケジューリングを「Normalized SNR-based scheduling in HDC」、FDC でユーザペアを順番に選択するラウンドロビン (RR: Round Robin) スケジューリングを「RR scheduling in FDC」、HD 通信の DL における RR スケジューリングを「RR scheduling in HDC」とする。ここで、HD 通信の SNR を最大化するスケジューリングの特性と、正規化 SNR を最大化する DL スケジューリングの特性は文献[Yang06]で解析されている。

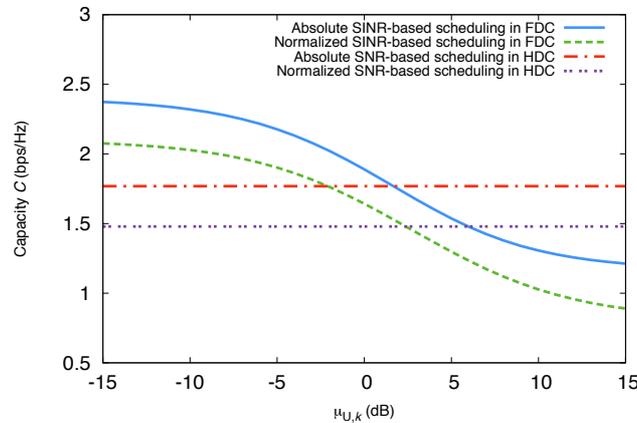


上図に、 $\mu_{u,k}(t)$  に対する  $P_k$  を示す。ただし、 $L=5$ 、 $\mu_{u,1}(t)=0$  dB,  $1 \neq k$ 、 $\mu_{u,1}(t)=0$  dB,  $\forall 1$  とする。つまり、すべてのユーザペアの自己干渉電力が等しく、ユーザペア  $k$  以外のユーザペアのユーザ間干渉電力が等しいとき、ユーザペア  $k$  が選択される確率  $P_k$  を調べる。 $\mu_{d,k}(t)=0$  dB のとき、SINR 最大化スケジューリングにおける  $P_k$  が 0.2 より大きいことから、ユーザペア  $k$  の SINR の和  $\gamma_k$  は他のユーザペアに比べて大きいことが分かる。 $\mu_{d,k}(t)$  が大きくなるにつれて、SINR 最大化スケジューリングにおける  $P_k$  は正規化 SINR 最大化スケジューリングの  $P_k$  より低くなる。したがって、所望信号の受信信号電力が大きいユーザでさえ、ユーザ間干渉が大きいとき、SINR 最大化スケジューリングでは選択されにくい。

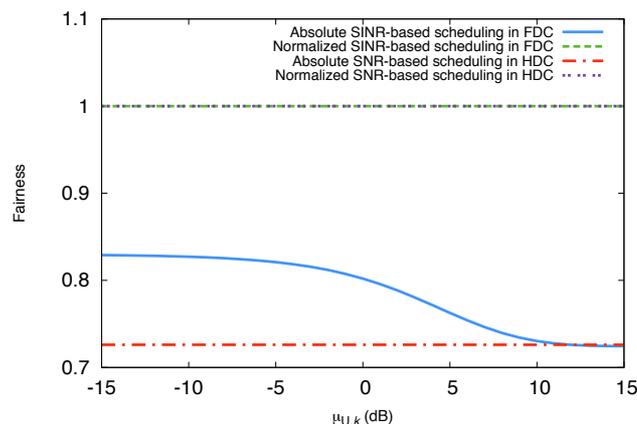


SINR 最大化スケジューリング、正規化 SINR 最大化スケジューリング、RR スケジューリングについて、FDC におけるマルチユーザダイバーシチ利得を調べる。上図に、ユーザペア数  $L$  に対するシステム容量  $C$  を示す。ただし、 $\mu_{d,1}(t)=0$  dB,  $\forall 1$ 、 $\mu_{u,1}(t)=0$  dB,  $\forall 1$  とする。4-2 で、独立したユーザペアを設定したため、FDC

におけるマルチユーザダイバーシチ利得は得られにくいと考えられるが、ユーザペア数が増えるにつれて、SINR 最大化スケジューリングと正規化 SINR 最大化スケジューリングにおけるシステム容量は HD 通信の適応的スケジューリングにおけるシステム容量と同様に増加する。一方、RR スケジューリングでは、通信品質を考慮していないため、マルチユーザダイバーシチ利得が得られていない。



SINR 最大化スケジューリング、正規化 SINR 最大化スケジューリングについて、すべてのユーザペアの自己干渉電力が等しいとき、自己干渉電力に対するシステム容量  $C$  を調べる。上図に自己干渉電力と雑音電力の比  $\mu_{U,k}(t)$  に対するシステム容量  $C$  を示す。ただし、 $L=5$ ,  $\mu_{U,1}(t) = \mu_{U,2}(t) = \dots = \mu_{U,L}(t)$ ,  $\mu_{D,1}(t) = 0$  dB,  $\forall 1$  とする。自己干渉電力に関係なく、SINR 最大化スケジューリングの方が、正規化 SINR 最大化スケジューリングより高いシステム容量を提供する。`Absolute SINR-based scheduling in FDC` と `Absolute SNR-based scheduling in HDC`、`Normalized SINR-based scheduling in FDC` と `Normalized SNR-based scheduling in HDC` を比較すると、FDC におけるスケジューリングは  $\mu_{U,k}(t)$  が大きくなるにつれて、HD 通信の DL のシステム容量より小さくなる。また、正規化 SINR 最大化スケジューリングに比べて、SINR 最大化スケジューリングにおけるシステム容量の方が、低い自己干渉電力で HD 通信のシステム容量より低くなる。これは、HD 通信の SNR を最大化する DL スケジューリングがマルチユーザダイバーシチ利得を最大限利用しているのに対して、FDC で独立したユーザペアを設定したとき、マルチユーザダイバーシチ利得が得られにくいからである。



上図に、すべてのユーザペアの自己干渉電力が同一のとき、自己干渉電力と熱雑音電力の比  $\mu_{U,k}(t)$  に対するユーザペア間の公平性を示す。ただし、 $L=5$ ,  $\mu_{U,1}(t) = \mu_{U,2}(t) = \dots = \mu_{U,L}(t)$ ,  $\mu_{D,1}(t) = 0$  dB,  $\forall 1$  とする。自己干渉電力に関係なく、正規化 SINR 最大化スケジューリングの方が、SINR 最大化スケジューリングより高い公平性を提供することが分かる。SINR 最大化スケジューリングのユーザペア間の公平性は  $\mu_{U,k}(t)$  が大

きくなるにつれて小さくなり、しだいに HD 通信の SNR を最大化する DL スケジューリングのユーザ間の公平性に近づく。自己干渉が十分大きいとき、上線付  $\gamma_{u,k}(t)=0$  となり、ユーザペア間の公平性は上線付  $\gamma_{d,k}(t)$  で決まる。したがって、自己干渉が十分大きいとき、FD 通信のユーザペア間の公平性は HD 通信の DL ユーザ間の公平性と等しくなる。

#### 4-5 まとめ

本章では、自己干渉とユーザ間干渉が FDC に及ぼす影響を調べるために、FDC におけるユーザスケジューリングの特性を解析した。DL と UL の SINR の和を最大化するスケジューリングと、DL と UL の正規化した SINR の和を最大化するスケジューリングを検討した。特に、後者は PF スケジューリングに基づいている。それぞれのスケジューリングについて、あるユーザペアが選択される確率、システム容量、ユーザペア間の公平性を定式化した。数値評価により、定式化したスケジューリング特性を評価した。独立したユーザペアを設定したため、マルチユーザダイバーシチ利得が得られにくいと考えられるが、ユーザペア数が多いほど、RR 以外のスケジューリングにおけるシステム容量は増加することを示した。SINR 最大化スケジューリングは正規化 SINR 最大化スケジューリングより高いシステム容量を提供すること、正規化 SINR 最大化スケジューリングは SINR 最大化スケジューリングより高いユーザペア間の公平性を提供することを示した。また、自己干渉が大きいとき、FDC のシステム容量が従来のセルラネットワークのシステム容量より低いことを示した。

## 4 まとめ

全二重無線通信のための無線リソース制御手法として、ポテンシャルゲームに基づくチャネル選択法、全二重通信と半二重通信を適応的に切り替える時分割スケジューリング方式を提案し、その効果を明らかにした。提案したチャネル選択法は収束性などの特性が理論的に保証されている。また、時分割スケジューリング方式はその特性を計算機シミュレーションのみならず理論的にも解明することに成功した。

### 【参考文献】

- [Monderer96] D. Monderer and L. S. Shapley, "Potential games," *Games and Econ. Behav.*, vol. 14, pp. 124-143, 1996.
- [Yamamoto15] K. Yamamoto, "A comprehensive survey of potential game approaches to wireless networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98-B, no. 9, pp. 1804-1823, Sep. 2015.
- [Neel06] J. O. Neel and J. H. Reed, "Performance of distributed dynamic frequency selection schemes for interference reducing networks," in *Proc. IEEE Milcom'06*, Washington, DC, 2006, pp. 1-7.
- [Babadi10] B. Babadi and V. Tarokh, "GADIA: A greedy asynchronous distributed interference avoidance algorithm," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 12, pp. 6228-6252, 2010.
- [Neel07] J. Neel, "Synthetic symmetry in cognitive radio networks," Nov. 2007, presented at SDR Forum Tech. Conf., Denver, CO.
- [Shen13] X. Shen, X. Cheng, L. Yang, M. Ma, and B. Jiao, "On the design of the scheduling algorithm for the full duplexing wireless cellular network," *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf. (GLOBECOM)*, pp. 4970-4975, Atlanta, GA, Dec. 2013.
- [Goyal13] S. Goyal and S. Panwar, "Analyzing a full-duplex cellular system," *Proc. Ann. Conf. Inform. Sci. Syst. (CISS)*, pp.1-6, Baltimore, MD, March 2013.
- [Higuchi13] K. Higuchi and Y. Kishiyama, "Non-orthogonal access with random beamforming and intra-beam sic for cellular MIMO downlink," *Vehicular Technology Conference*, pp.1-5, Las Vegas, NV, Sept. 2013.

- [Sang06] A. Sang, X. Wang, M. Madhian, and R.D. Gitlin, "A flexible downlink scheduling scheme in cellular packet data systems," IEEE Trans. Wireless Commun., vol.5, no.3, pp.568– 577, Mar. 2006.
- [Jain84] R. Jain, D.-M. Chiu, and W. Hawe, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems," DEC Research Report TR-301, 1984.
- [Yang06] L. Yang and M.-S. Alouini, "Performance analysis of multiuser selection diversity," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.55, no.6, pp.1848–1861, Nov. 2006.
- [Elliott02] R. Elliott, "A measure of fairness of service for scheduling algorithms in multiuser systems," Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol.3, pp.1583–1588, Winnipeg, MB, Canada, May 2002.

### 〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Performance evaluation of user scheduling in full-duplex cellular networks	Proc. SmartCom2016	2016年5月
全二重セルラネットワークにおけるユーザスケジューリング特性解析	電子情報通信学会無線通信システム研究会 RCS2015- 268	2015年12月
Generalized PF scheduling for bidirectional and user-multiplexing unidirectional full-duplex links	Proc. the 21st Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2015), Kyoto, Japan	2015年10月
Symmetric interaction in channel allocation for bi-directional in-band full-duplex network	Proc. the 26th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2015), pp.1924-1929, Hong Kong	2015年9月
双方向全二重とユーザ多重全二重のためのPFスケジューリング	電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-1	2015年9月
帯域内全二重セルラネットワークにおける重み付きPFスケジューリングの評価	電子情報通信学会無線通信システム研究会 RCS2015-71	2015年6月