

重畳符号化を用いた協調通信

林 和則, 金子めぐみ
京都大学大学院情報学研究科
kazunori@i.kyoto-u.ac.jp

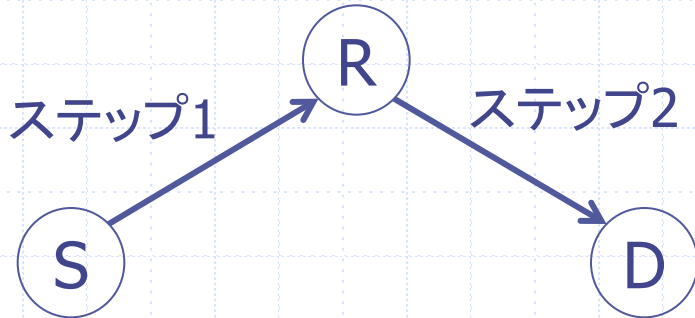


Outline

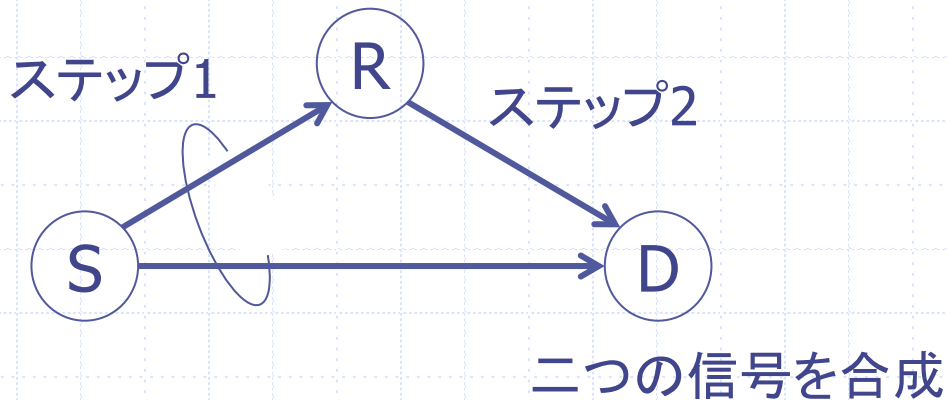
- ❖ 協調通信の例
- ❖ 重畳符号化＋逐次干渉キャンセラ
- ❖ 3ノード協調中継通信
- ❖ 3ノード双方向協調中継通信
- ❖ 2ユーザ中継放送通信路
- ❖ 離散階層変調を用いた場合
- ❖ まとめ

協調通信の例

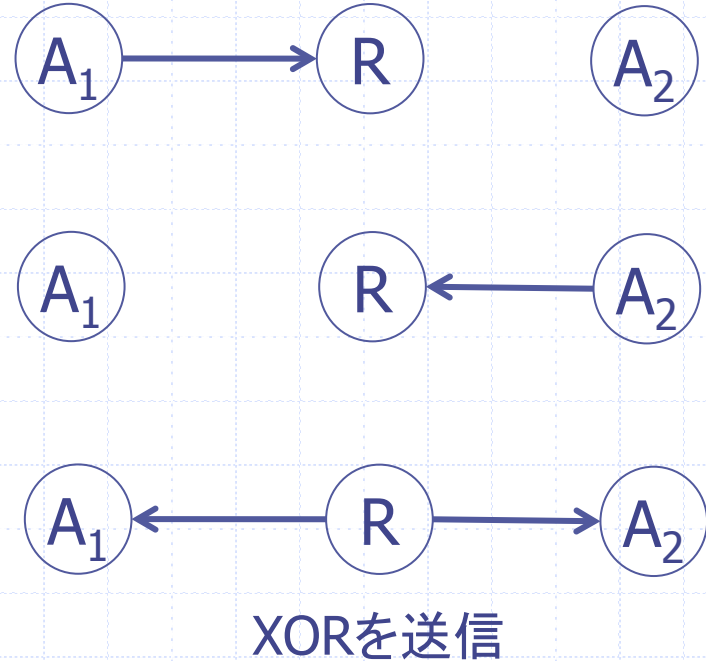
-マルチホップ:



-協調ダイバーシチ:



-ネットワークコーディング:



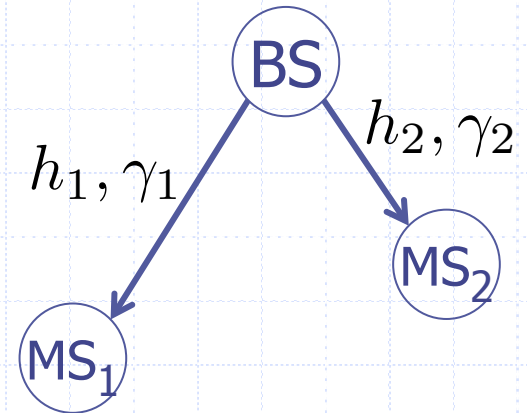
重畳符号化+逐次干渉キャンセラ (1/2)

ガウス放送通信路で容量領域を達成できる方式

-送信信号@BS(重畳符号化):

$$x = x_1 + x_2$$

$$\left(\begin{array}{l} x_j : \text{MS}_j \text{ 宛の信号} \\ P = P_1 + P_2 \quad E[|x_j|^2] = P_j \end{array} \right)$$



-受信信号@MS_j:

$$\begin{aligned} y_j &= h_j x + z_j \\ &= h_j x_1 + h_j x_2 + z_j \end{aligned}$$

重畳符号化+逐次干渉キャンセラ (2/2)

$$y_j = h_j x_1 + h_j x_2 + z_j$$

-復号処理 ($|h_1| < |h_2|$ のとき):

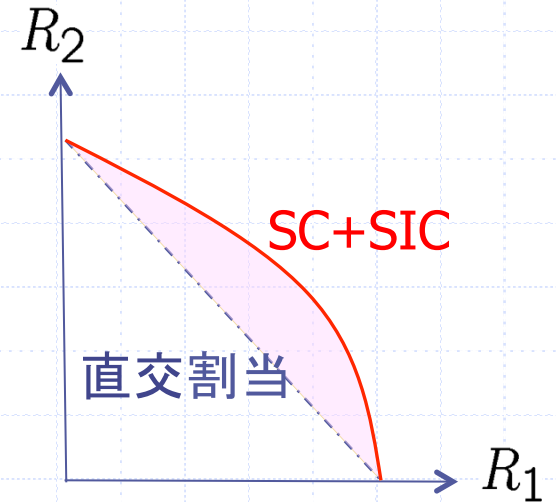
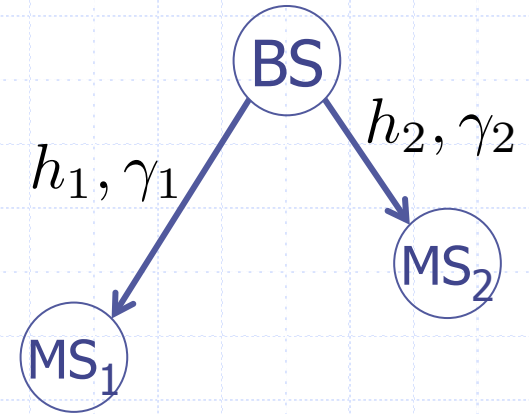
MS₁: x_2 を雑音と思って x_1 を復号

$$R_1 \leq \log \left(1 + \frac{P_1 |h_1|^2}{P_2 |h_1|^2 + N_0} \right) \text{ bit/s/Hz}$$

MS₂: x_2 を雑音と思って x_1 を復号し, x_1 の成分をキャンセルして x_2 を復号(SIC)

$$R_1 \leq \log \left(1 + \frac{P_1 |h_2|^2}{P_2 |h_2|^2 + N_0} \right) \text{ bit/s/Hz}$$

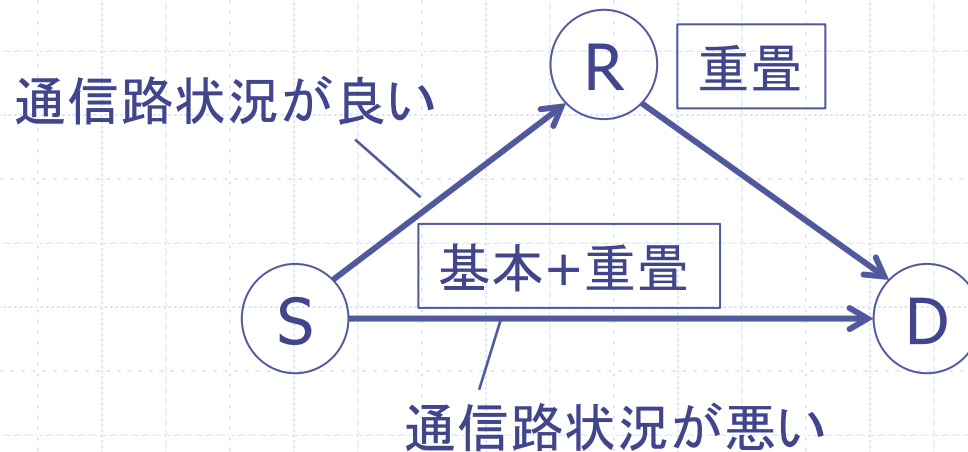
$$R_2 \leq \log \left(1 + \frac{P_2 |h_2|^2}{N_0} \right) \text{ bit/s/Hz}$$



通信路状況に偏りがある場合にゲイン

3ノード協調中継通信：アイデア

重畳符号化のアイデアを適用



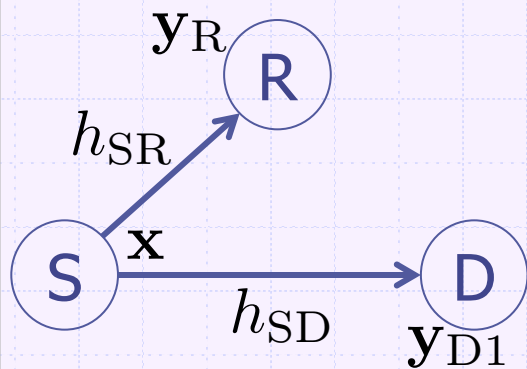
-SはD宛のメッセージを2つ(基本メッセージと重畳メッセージ)に分割し、これらを足し合わせて送信

-RはSICにより両メッセージを復号し、重畳メッセージのみをSに転送

-DはRからの信号を用いて重畳メッセージを復号し、その結果とSからの信号を用いて基本メッセージを復号

3ノード協調中継通信：通信手順

Step 1



S は $\mathbf{x} = \sqrt{1 - \alpha}\mathbf{x}_b + \sqrt{\alpha}\mathbf{x}_s$ を送信

$0 \leq \alpha \leq 1$: 電力配分係数

$\mathbf{x}_b \in \mathbb{C}^N$: 基本メッセージ (レート: R_b [bit/symbol])

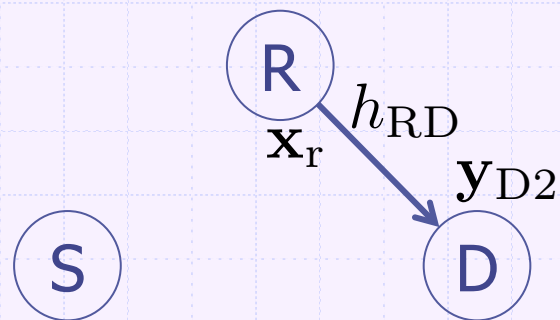
$\mathbf{x}_s \in \mathbb{C}^N$: 重畳メッセージ (レート: R_s [bit/symbol])

R は $\mathbf{y}_R = h_{SR}(\sqrt{1 - \alpha}\mathbf{x}_b + \sqrt{\alpha}\mathbf{x}_s) + \mathbf{z}_R$ を受信

\mathbf{x}_b を復号してこの成分をキャンセルし, \mathbf{x}_s を復号

D は $\mathbf{y}_{D1} = h_{SD}(\sqrt{1 - \alpha}\mathbf{x}_b + \sqrt{\alpha}\mathbf{x}_s) + \mathbf{z}_{D1}$ を受信し, 保持

Step 2



R はリンクRDに合わせて \mathbf{x}_s を再変調して \mathbf{x}_r (レート: R_r [bit/symbol])を送信

D は $\mathbf{y}_{D2} = h_{RD}\mathbf{x}_r + \mathbf{z}_{D2}$ を受信し, \mathbf{x}_r を復号

\mathbf{y}_{D2} から \mathbf{x}_s (\mathbf{x}_r) の成分をキャンセルし, 最後に

\mathbf{x}_b を復号

3ノード協調中継通信：電力割り当て

-リンクSNR:

$$\gamma_{SR} = \frac{|h_{SR}|^2}{\sigma^2}, \quad \gamma_{SD} = \frac{|h_{SD}|^2}{\sigma^2}, \quad \gamma_{RD} = \frac{|h_{RD}|^2}{\sigma^2}$$

σ^2 : ガウス雑音の分散

-レートの制約:

$$\text{ステップ1: } R_b \leq C\left(\frac{(1-\alpha)\gamma_{SR}}{1+\alpha\gamma_{SR}}\right), \quad R_s \leq C(\alpha\gamma_{SR})$$

$$C(\gamma) = \log(1 + \gamma)$$

$$\text{ステップ2: } R_r \leq C(\gamma_{RD}), \quad R_b \leq C((1-\alpha)\gamma_{SD})$$

-全体のレート:

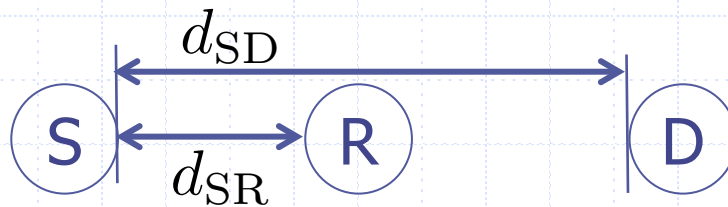
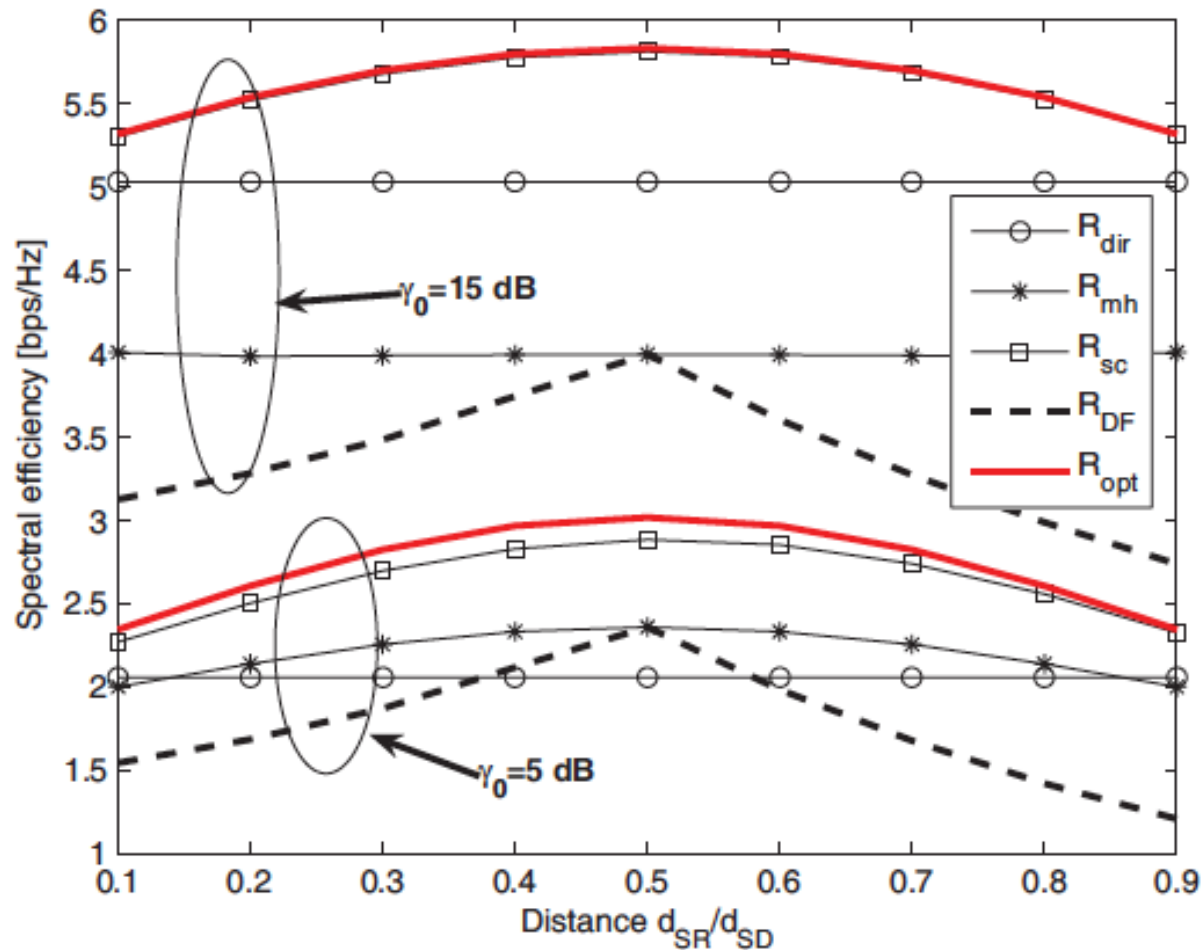
$$R_{sc} = \frac{N(R_b + R_s)}{N + M} = \frac{(R_b + R_s)R_r}{R_r + R_s} \quad M = \frac{NR_s}{R_r}$$

ステップ2の時間
ステップ1の時間

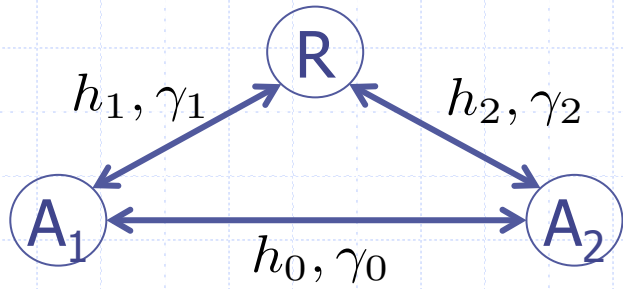
-電力割り当て ($\gamma_{SR} > \gamma_{SD}$, $\gamma_{RD} > \gamma_{SD}$ のとき):

$$\alpha_0 = \min \left\{ \frac{1}{\gamma_{SD}} - \frac{1}{\gamma_{SR}}, 1 \right\}$$

3ノード協調中継通信：特性評価

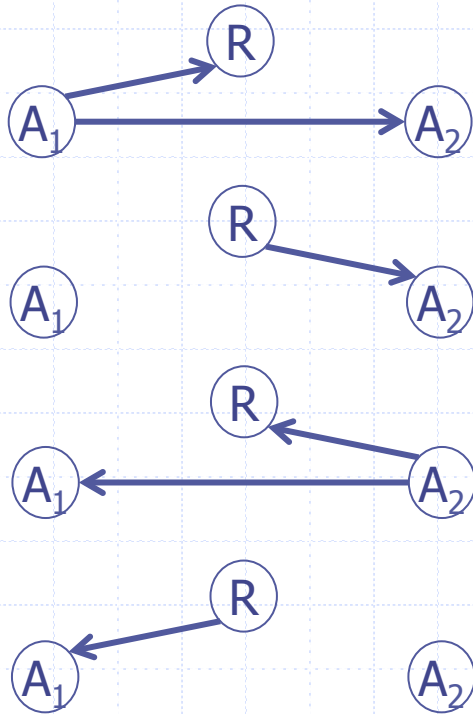


3ノード双方向協調中継通信：アイデア

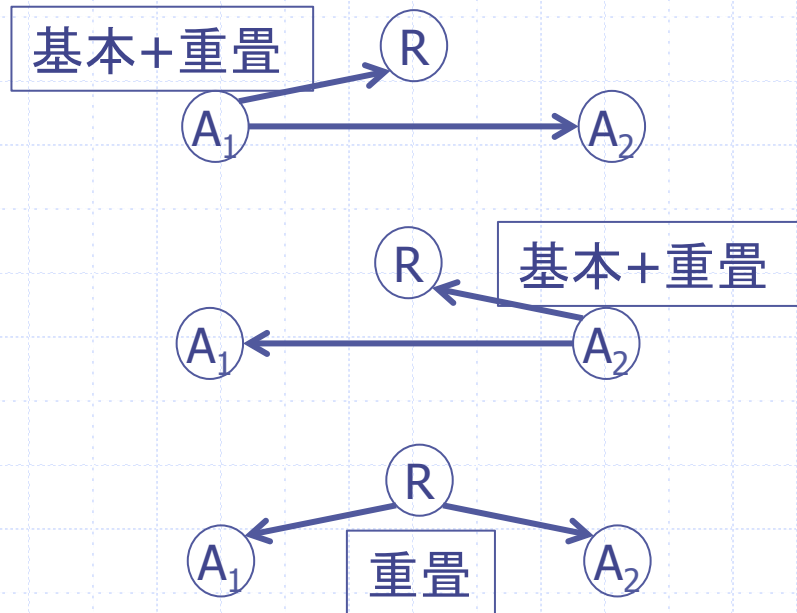


- A₁, A₂がソースかつ宛先
- チャンネルの対称性

-重畳符号化を素朴に適用:

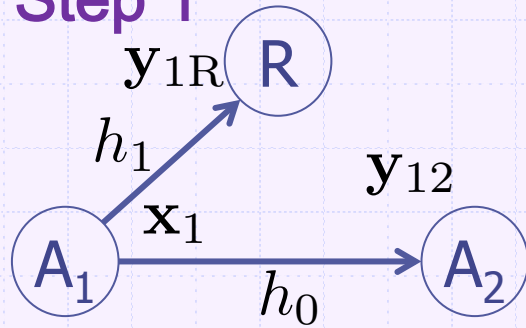


-重畳符号化+ネットワークコーディング:



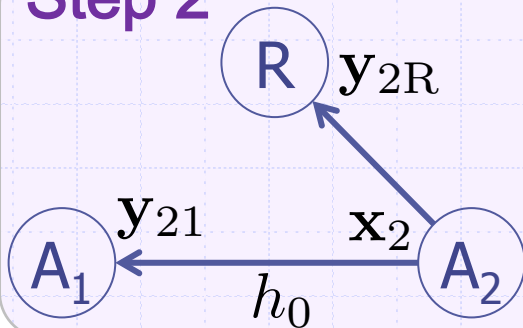
3ノード双方向協調中継通信：通信手順

Step 1



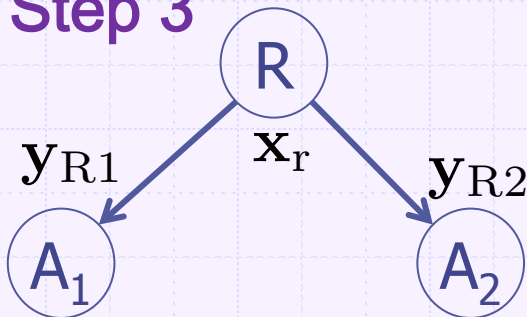
A₁ は $\mathbf{x}_1 = \sqrt{1 - \alpha_1} \mathbf{x}_{b_1} + \sqrt{\alpha_1} \mathbf{x}_{s_1}$ を送信
 R は $y_{1R} = h_1(\sqrt{1 - \alpha_1} \mathbf{x}_{b_1} + \sqrt{\alpha_1} \mathbf{x}_{s_1}) + \mathbf{z}_R^{(1)}$ を受信
 \mathbf{x}_{b_1} を復号してこの成分をキャンセルし, \mathbf{x}_{s_1} を復号
 A₂ は $y_{12} = h_0(\sqrt{1 - \alpha_1} \mathbf{x}_{b_1} + \sqrt{\alpha_1} \mathbf{x}_{s_1}) + \mathbf{z}_2^{(1)}$ を受信し, 保持

Step 2



A₂ は $\mathbf{x}_2 = \sqrt{1 - \alpha_2} \mathbf{x}_{b_2} + \sqrt{\alpha_2} \mathbf{x}_{s_2}$ を送信
 R は $y_{2R} = h_2(\sqrt{1 - \alpha_2} \mathbf{x}_{b_2} + \sqrt{\alpha_2} \mathbf{x}_{s_2}) + \mathbf{z}_R^{(2)}$ を受信
 \mathbf{x}_{b_2} を復号してこの成分をキャンセルし, \mathbf{x}_{s_2} を復号
 A₁ は $y_{21} = h_0(\sqrt{1 - \alpha_2} \mathbf{x}_{b_2} + \sqrt{\alpha_2} \mathbf{x}_{s_2}) + \mathbf{z}_1^{(2)}$ を受信し, 保持

Step 3



R は \mathbf{x}_{s_1} と \mathbf{x}_{s_2} に対応する情報ビット列 \mathbf{b}_{s_1} と \mathbf{b}_{s_2} の XOR をとり, それを変調して \mathbf{x}_r を送信
 A₁ は $y_{R1} = h_1 \mathbf{x}_r + \mathbf{z}_1^{(3)}$ を受信し, \mathbf{b}_r を復号
 $\mathbf{b}_r \oplus \mathbf{b}_{s_1} = \mathbf{b}_{s_2}$ により \mathbf{b}_{s_2} を得て \mathbf{x}_{s_2} を生成
 y_{21} から \mathbf{x}_{s_2} の成分をキャンセルし, \mathbf{x}_{b_2} を復号

3ノード双方向協調中継通信:電力割り当て

-レート制約:

$$R_{b_1} \leq C \left(\frac{(1 - \alpha_1)\gamma_1}{1 + \alpha_1\gamma_1} \right), \quad R_{s_1} \leq C(\alpha_1\gamma_1), \quad R_{b_1} \leq C((1 - \alpha_1)\gamma_0), \quad R_r \leq C(\gamma_2)$$

$$R_{b_2} \leq C \left(\frac{(1 - \alpha_2)\gamma_2}{1 + \alpha_2\gamma_2} \right), \quad R_{s_2} \leq C(\alpha_2\gamma_2), \quad R_{b_2} \leq C((1 - \alpha_2)\gamma_0), \quad R_r \leq C(\gamma_2)$$

-サムレート:

$$R_{SC-2W} = \frac{R_{b_1} + R_{s_1} + R_{b_2} + R_{s_2}}{2 + \frac{\max(R_{s_1}, R_{s_2})}{R_r}}$$

-電力割り当て:

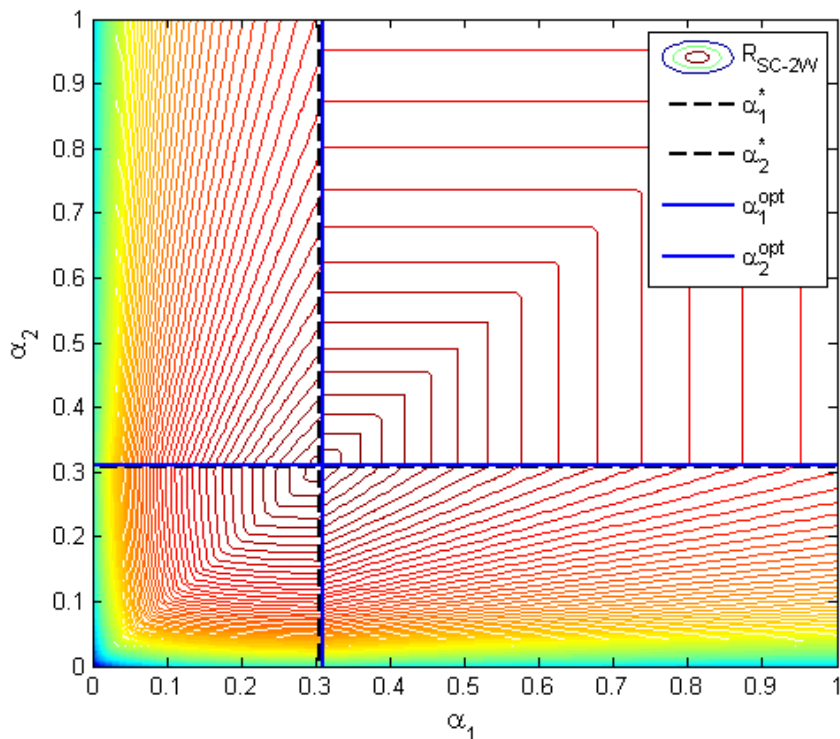
$$(\alpha_1^0, \alpha_2^0) = \left(\frac{1}{\gamma_0} - \frac{1}{\gamma_1}, \frac{1}{\gamma_0} - \frac{1}{\gamma_2} \right)$$

$$(\alpha_1^0, \alpha_2^1) = \left(\frac{1}{\gamma_0} - \frac{1}{\gamma_1}, \frac{\gamma_1 - \gamma_0}{\gamma_0\gamma_2} \right)$$

3ノード双方向協調中継通信：特性 (1/2)¹³

$\gamma_0=5\text{dB}, \gamma_1=20\text{dB}, \gamma_2=20\text{dB}$

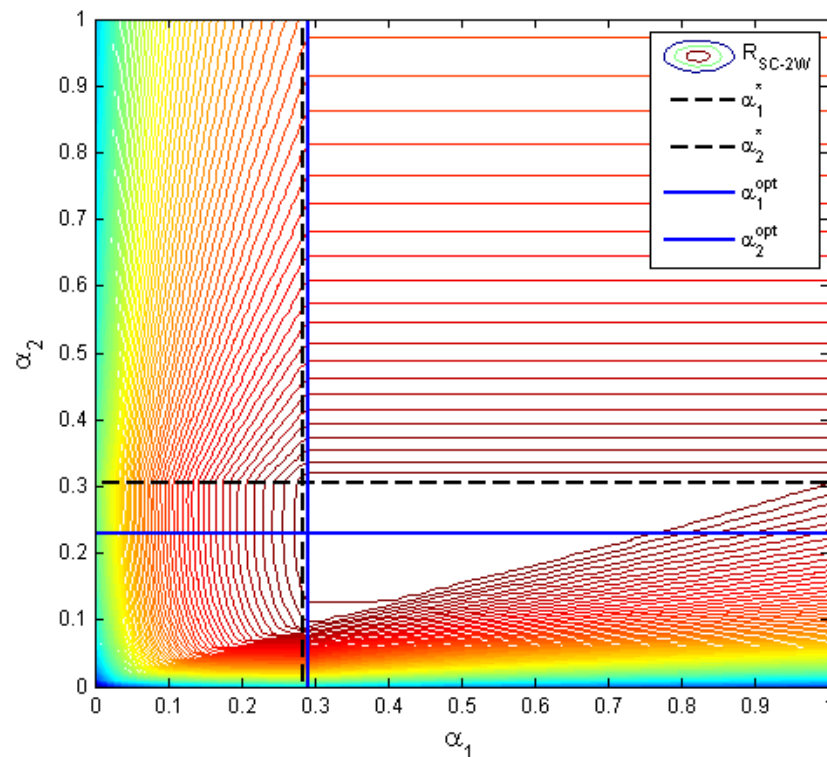
$$\alpha_1^* = \alpha_1^{opt}, \alpha_2^* = \alpha_2^{opt}$$



- Optimal allocation

$\gamma_0=5\text{dB}, \gamma_1=15\text{dB}, \gamma_2=20\text{dB}$

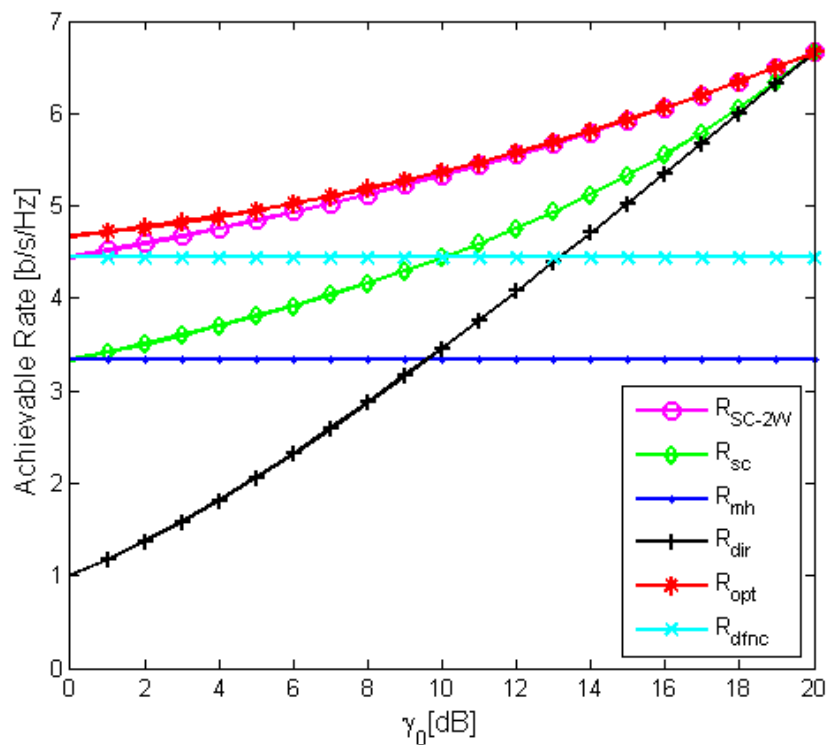
$$\alpha_1^* = \alpha_1^{opt}, \alpha_2^* \neq \alpha_2^{opt}$$



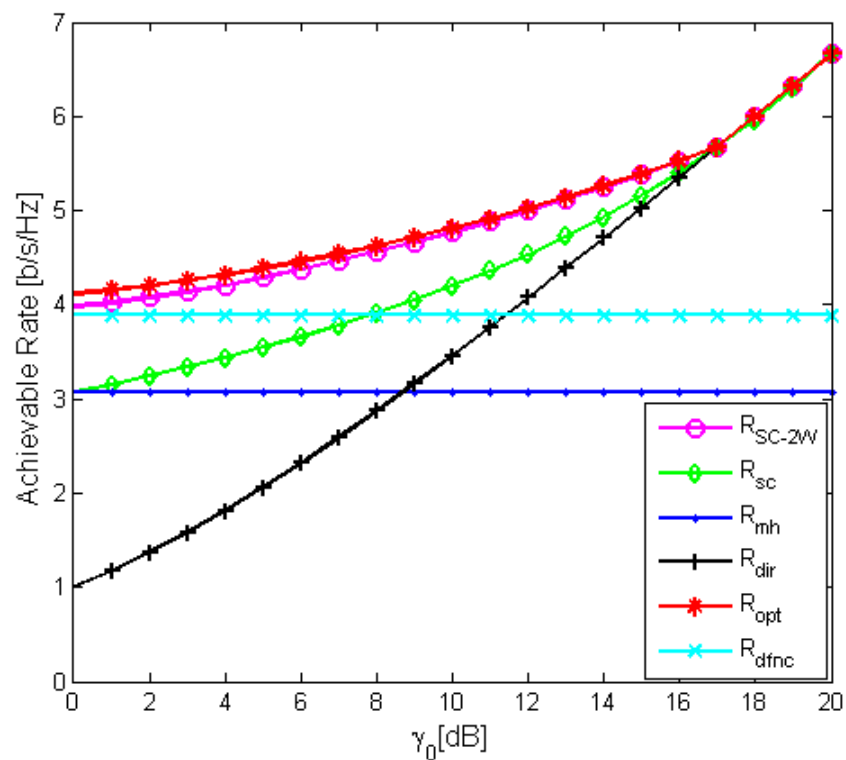
- Near-optimal allocation

3ノード双方向協調中継通信：特性 (2/2)¹⁴

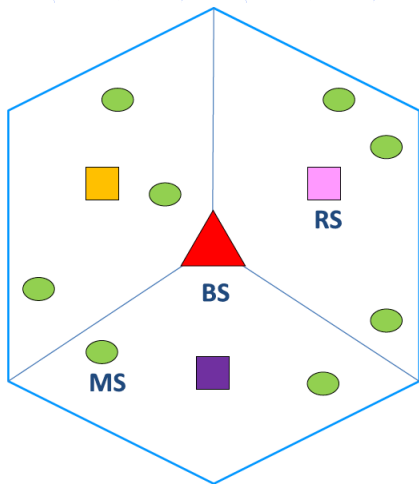
$\gamma_1 = \gamma_2 = 20\text{dB}$



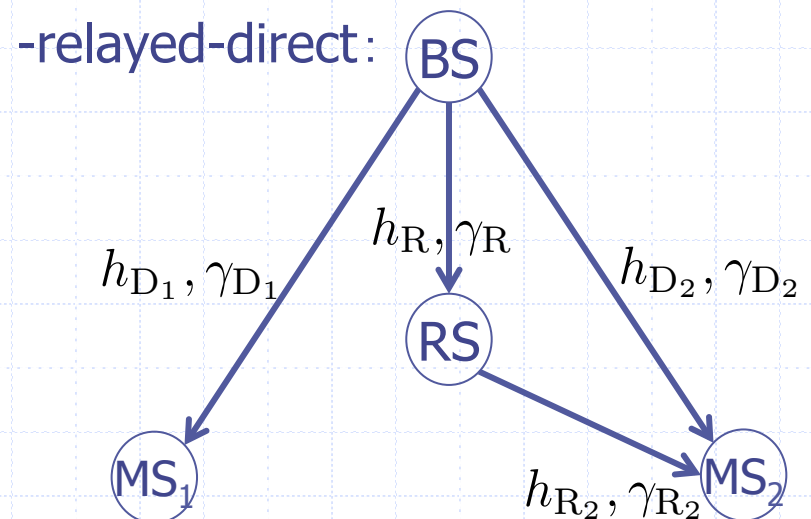
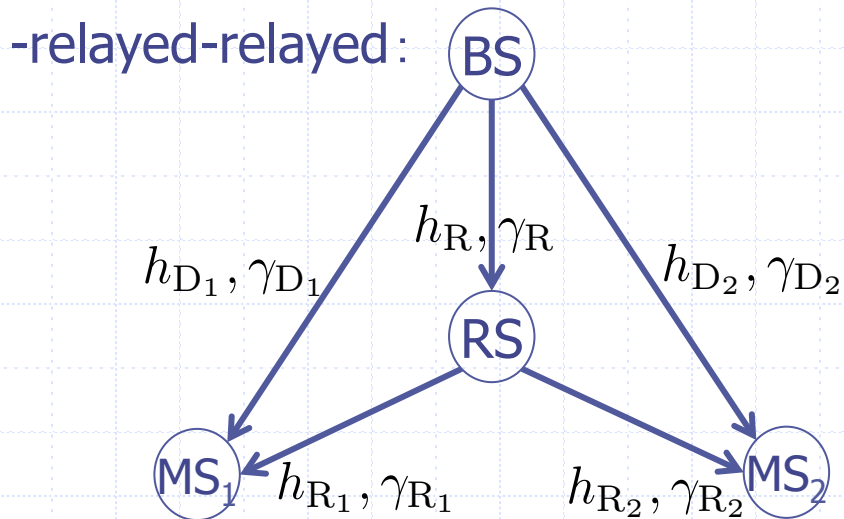
$\gamma_1 = 17\text{dB}, \gamma_2 = 20\text{dB}$



2ユーザ中継放送通信路



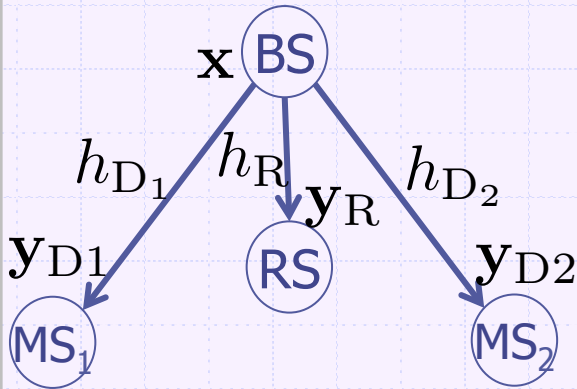
- 移動体通信システムでのリレーの利用
- 複数のリレーユーザを同時にサーブ
- 直接ユーザとリレーユーザを同時にサーブ



$$\gamma_R > \gamma_{R2} > \gamma_{R1} > \gamma_{D1} > \gamma_{D2}$$

2ユーザ中継放送通信路：通信手順 (1/2)

Step 1



BS はNシンボル時間で

$\mathbf{x} = \sqrt{\alpha_{b1}}\mathbf{x}_{b1} + \sqrt{\alpha_{s1}}\mathbf{x}_{s1} + \sqrt{\alpha_{b2}}\mathbf{x}_{b2} + \sqrt{\alpha_{s2}}\mathbf{x}_{s2}$
を送信 (ただし, $\alpha_{b1} + \alpha_{s1} + \alpha_{b2} + \alpha_{s2} = 1$)

RS は

$\mathbf{y}_R = h_R(\sqrt{\alpha_{b1}}\mathbf{x}_{b1} + \sqrt{\alpha_{s1}}\mathbf{x}_{s1} + \sqrt{\alpha_{b2}}\mathbf{x}_{b2} + \sqrt{\alpha_{s2}}\mathbf{x}_{s2}) + \mathbf{z}_R^{(1)}$
を受信し, $\mathbf{x}_{b2} \rightarrow \mathbf{x}_{b1} \rightarrow \mathbf{x}_{s1} \rightarrow \mathbf{x}_{s2}$ の順でSIC
により復号

MS_i は受信信号を保持

$\mathbf{y}_{Di} = h_{Di}(\sqrt{\alpha_{b1}}\mathbf{x}_{b1} + \sqrt{\alpha_{s1}}\mathbf{x}_{s1} + \sqrt{\alpha_{b2}}\mathbf{x}_{b2} + \sqrt{\alpha_{s2}}\mathbf{x}_{s2}) + \mathbf{z}_i^{(1)}$

2ユーザ中継放送通信路：通信手順 (2/2) ¹⁷

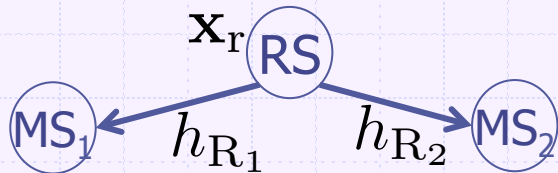
Step 2

BS

RS は \mathbf{x}_{s1} と \mathbf{x}_{s2} を再符号化して \mathbf{x}_{r1} と \mathbf{x}_{r2} を生成し,
 $\mathbf{x}_r = \sqrt{1 - \beta}\mathbf{x}_{r1} + \sqrt{\beta}\mathbf{x}_{r2}$ (M_R シンボル時間)を送信

MS₁ は $\mathbf{y}_{R1} = h_{R1}(\sqrt{1 - \beta}\mathbf{x}_{r1} + \sqrt{\beta}\mathbf{x}_{r2}) + \mathbf{z}_1^{(2)}$
を受信し, \mathbf{x}_{r1} (\mathbf{x}_{s1})を復号. これを用いて \mathbf{y}_{D1} から
 $\mathbf{x}_{b2} \rightarrow \mathbf{x}_{b1}$ の順でSICにより復号

MS₂ は $\mathbf{y}_{R2} = h_{R2}(\sqrt{1 - \beta}\mathbf{x}_{r1} + \sqrt{\beta}\mathbf{x}_{r2}) + \mathbf{z}_2^{(2)}$
を受信し, $\mathbf{x}_{s1} \rightarrow \mathbf{x}_{s2}$ の順でSICにより復号. さらに,
 \mathbf{y}_{D2} からこれらの成分をキャンセルして \mathbf{x}_{b2} を復号



2ユーザ中継放送通信路:電力割り当て(1/2)

-各ステップの時間配分:

$$\text{ステップ1: } t = \frac{N}{N + M_R} \quad \text{ステップ2: } 1 - t$$

-レート of 制約[bit/sec]:

$$R_{b2} \leq tC \left(\frac{\alpha_{b2}\gamma_R}{1 + (\alpha_{b1} + \alpha_{s1} + \alpha_{s2})\gamma_R} \right) \stackrel{\text{def}}{=} tC_{b2}^A$$

$$R_{b2} \leq tC \left(\frac{\alpha_{b2}\gamma_{D1}}{1 + (\alpha_{b1} + \alpha_{s2})\gamma_{D1}} \right) \stackrel{\text{def}}{=} tC_{b2}^B$$

$$R_{b1} \leq tC \left(\frac{\alpha_{b1}\gamma_R}{1 + (\alpha_{s1} + \alpha_{s2})\gamma_R} \right) \stackrel{\text{def}}{=} tC_{b1}^A$$

$$R_{b1} \leq tC \left(\frac{\alpha_{b1}\gamma_{D1}}{1 + \alpha_{s2}\gamma_{D1}} \right) \stackrel{\text{def}}{=} tC_{b1}^B$$

$$R_{s1} \leq tC \left(\frac{\alpha_{s1}\gamma_R}{1 + \alpha_{s2}\gamma_R} \right) \stackrel{\text{def}}{=} tC_{s1}^A$$

$$R_{s1} \leq (1 - t)C \left(\frac{(1 - \beta)\gamma_{R2}}{1 + \beta\gamma_{R2}} \right) \stackrel{\text{def}}{=} (1 - t)C_{s1}^C$$

$$R_{s2} \leq tC (\alpha_{s2}\gamma_R) \stackrel{\text{def}}{=} tC_{s2}^A$$

$$R_{s2} \leq (1 - t)C (\beta\gamma_{R2}) \stackrel{\text{def}}{=} (1 - t)C_{s2}^B$$

$$R_{s1} \leq (1 - t)C \left(\frac{(1 - \beta)\gamma_{R1}}{1 + \beta\gamma_{R1}} \right) \stackrel{\text{def}}{=} (1 - t)C_{s1}^B$$

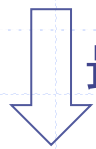
$$R_{b2} \leq tC \left(\frac{\alpha_{b2}\gamma_{D2}}{1 + \alpha_{b1}\gamma_{D2}} \right) \stackrel{\text{def}}{=} tC_{b2}^C$$

2ユーザ中継放送通信路:電力割り当て(2/2)

-サムレート:

$$R_{RRSC} = R_{b1} + R_{b2} + R_{s1} + R_{s2}$$

$$= tC_{b1}^{\min} + tC_{b2}^{\min} + \min(tC_{s1}^A, (1-t)C_{s1}^B) + \min(tC_{s2}^A, (1-t)C_{s2}^B)$$

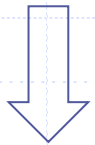


最適な t

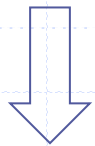
$$\left[C_{b1}^{\min} = \min(C_{b1}^A, C_{b1}^B) \quad C_{b2}^{\min} = \min(C_{b2}^A, C_{b2}^B, C_{b2}^C) \right]$$

$$R_{RRSC} = \frac{C_{b1}^{\min} + C_{b2}^{\min} + C_{s1}^A + C_{s2}^A}{1 + \max(I_1, I_2)}$$

$$\left[I_1 = \frac{C_{s1}^A}{C_{s1}^B}, I_2 = \frac{C_{s2}^A}{C_{s2}^B} \right]$$



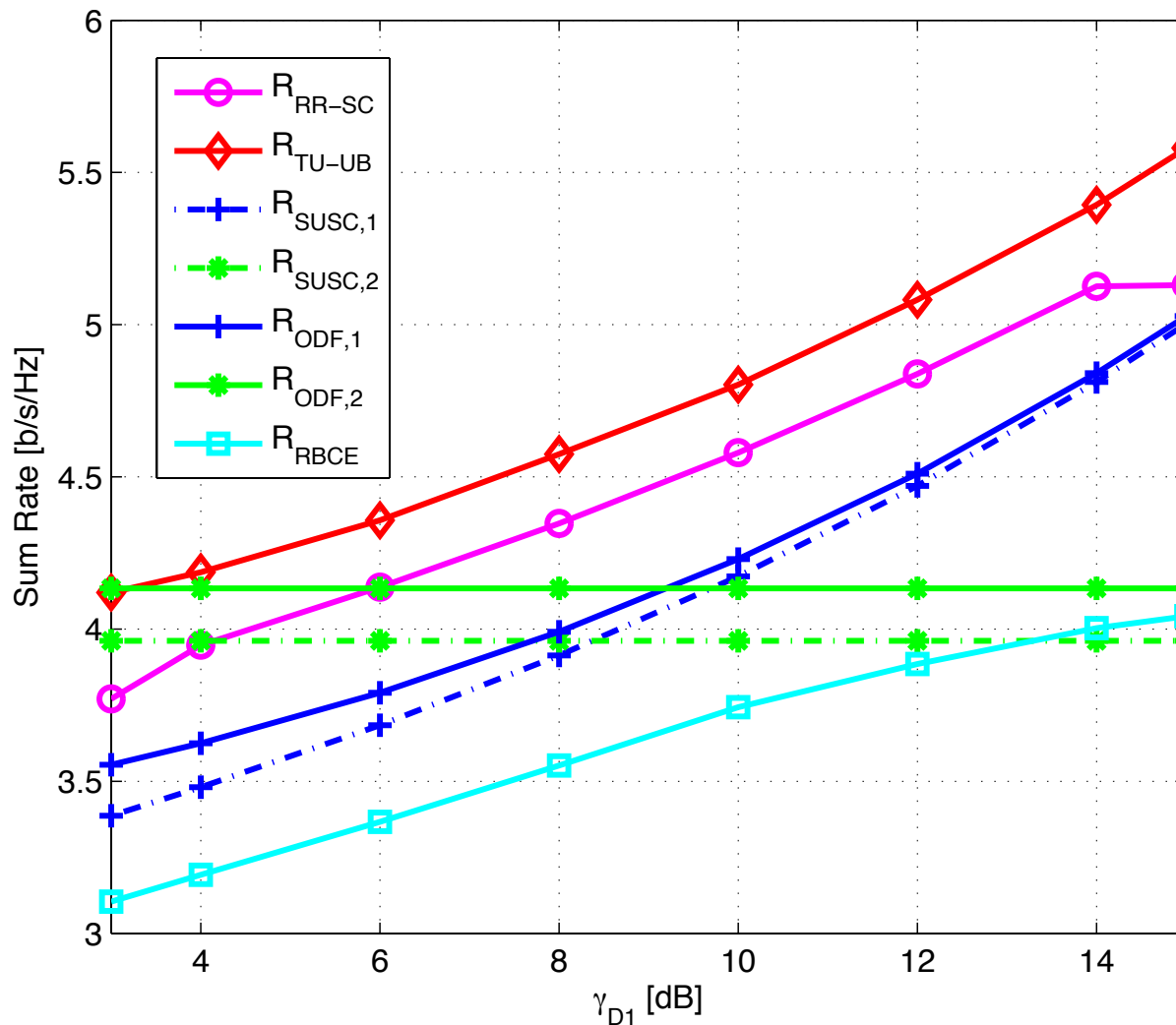
$\max(I_1, I_2)$ の最小化問題 (α_{s2} と β のみの関数)



全ての電力配分の決定

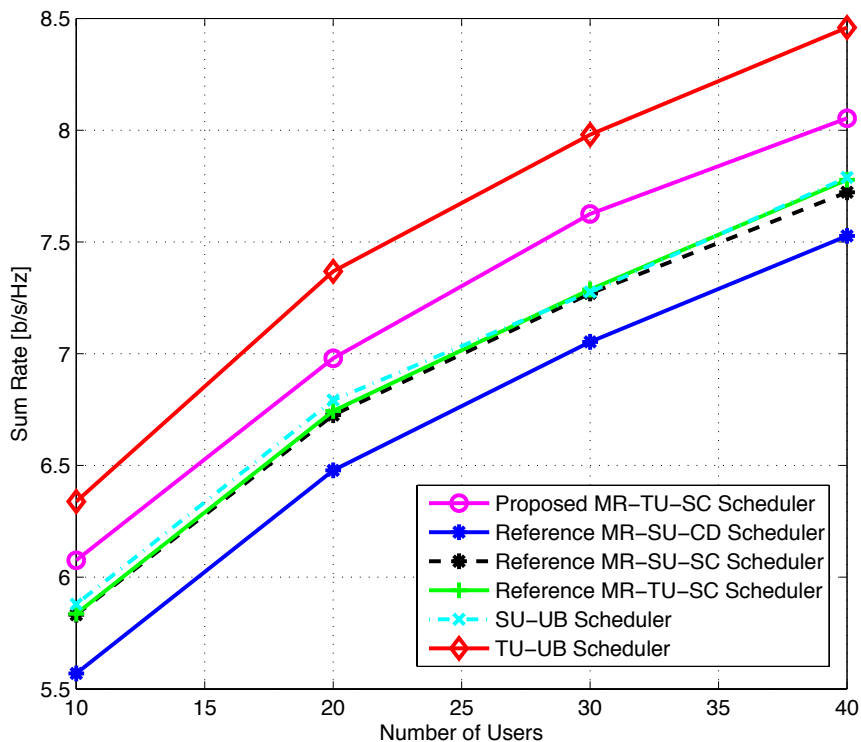
2ユーザ中継放送通信路：特性 (1/2)

サムレート(2ユーザ):

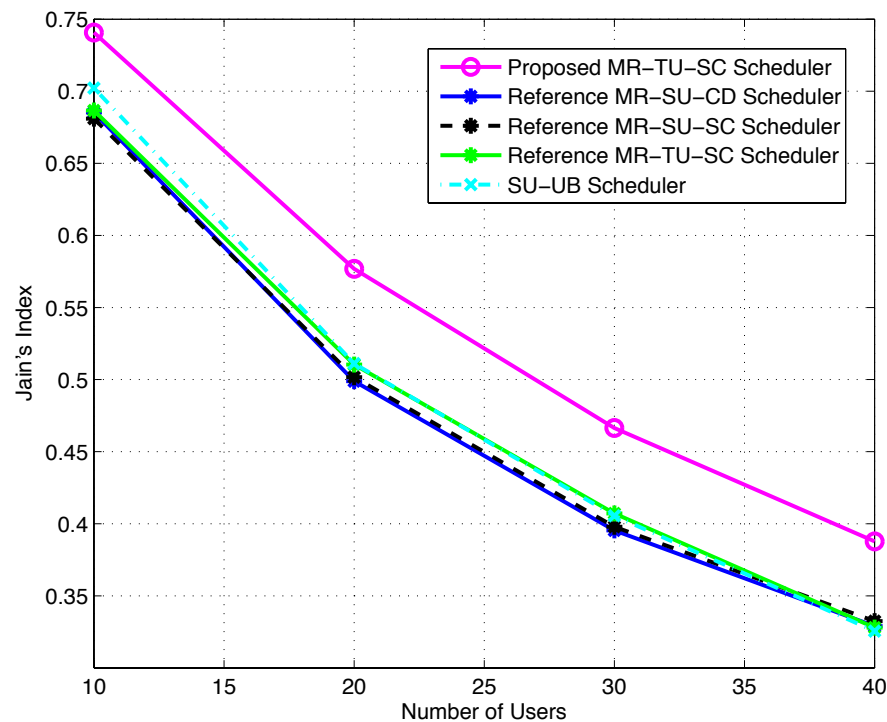


2ユーザ中継放送通信路：特性 (2/2)

サムレート(マルチユーザ)：



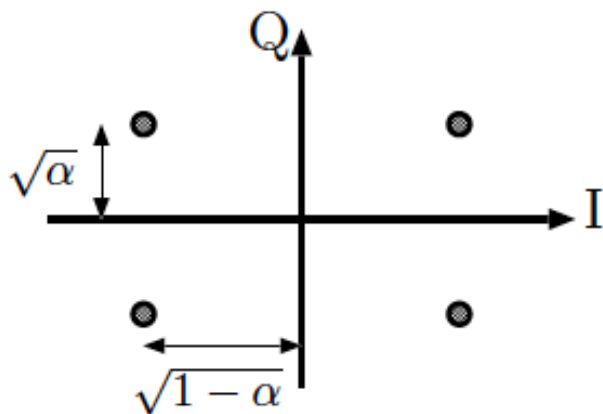
Jain's インデックス(マルチユーザ)：



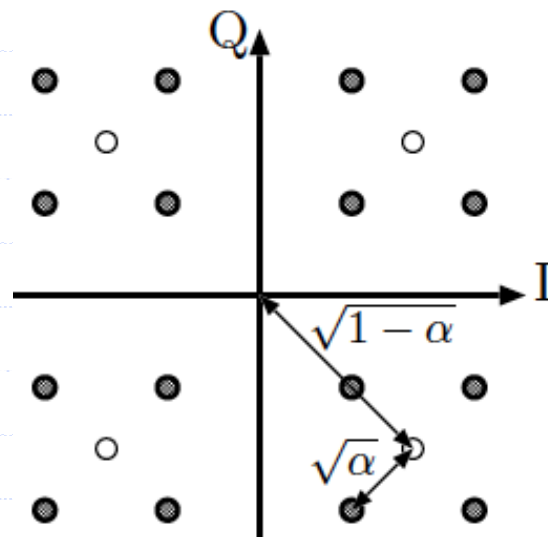
離散階層変調を用いた場合

-離散階層変調を用いた重畳符号化による3ノード協調中継通信

-信号点配置の例:



BPSKのとき (2-4QAM)



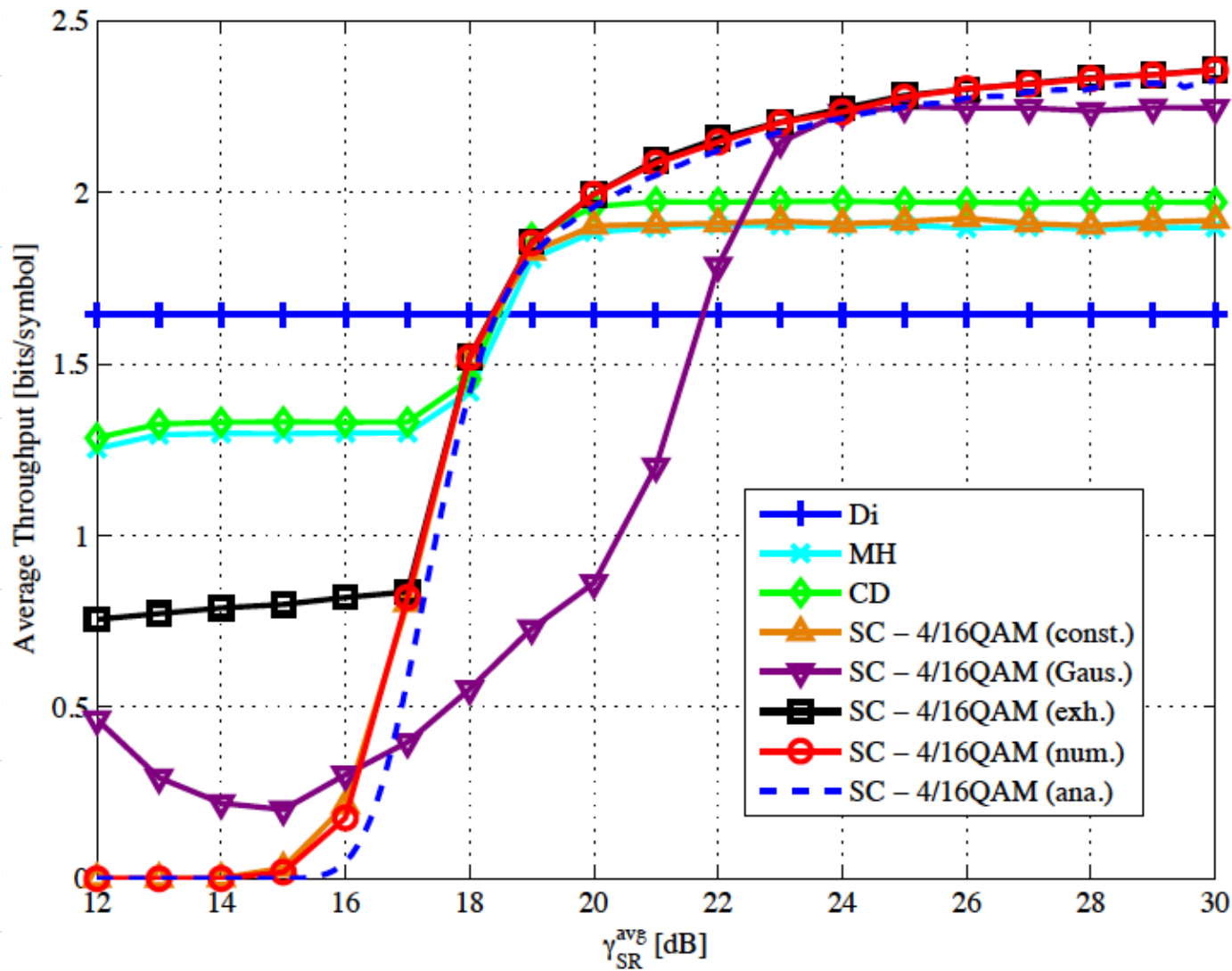
QPSKのとき (4-16QAM)

-平均レート:

$$R_{\text{hsc}}^{2/4\text{-QAM}} = \frac{4}{5} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\gamma_{\text{SR}}(1-\alpha)} \right) \right\}^N \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\gamma_{\text{SR}}\alpha} \right) \right\}^N$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{3}{4} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\gamma_{\text{RD}}}{10}} \right) \right\}^{\frac{N}{2}} \left[1 + \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\gamma_{\text{SD}}(1-\alpha)} \right) \right\}^N \right]$$

離散階層変調を用いた場合：特性



まとめ

- ❖ ガウス放送通信路における重畳符号化
- ❖ 重畳符号化の協調通信への適用
 - 3ノード協調中継通信
 - 3ノード双方向協調中継通信
 - 2ユーザ中継放送通信路
 - 離散階層変調を用いた場合
- ❖ レートや公平性を改善できる通信路状況が存在
- ❖ 現実的な変調方式・符号化を用いた場合の検討