

# アドホックネットワークにおける ビームフォーミングMACプロトコルの ための干渉回避機構

三大学合同修論発表会  
平成25年2月1日

豊橋技術科学大学大学院 博士前期課程  
ワイヤレス通信研究室  
大場 昌範  
指導教員 上原 秀幸

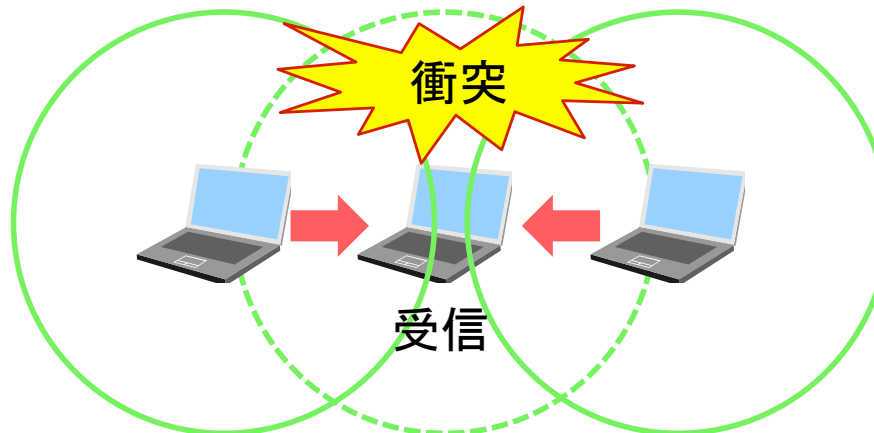
# 背景 - アドホックネットワーク

## アドホックネットワーク

- ・端末間で直接通信
- ・基地局が不要
- ・自律分散的にチャネルアクセス



自由に通信を開始すると・・・



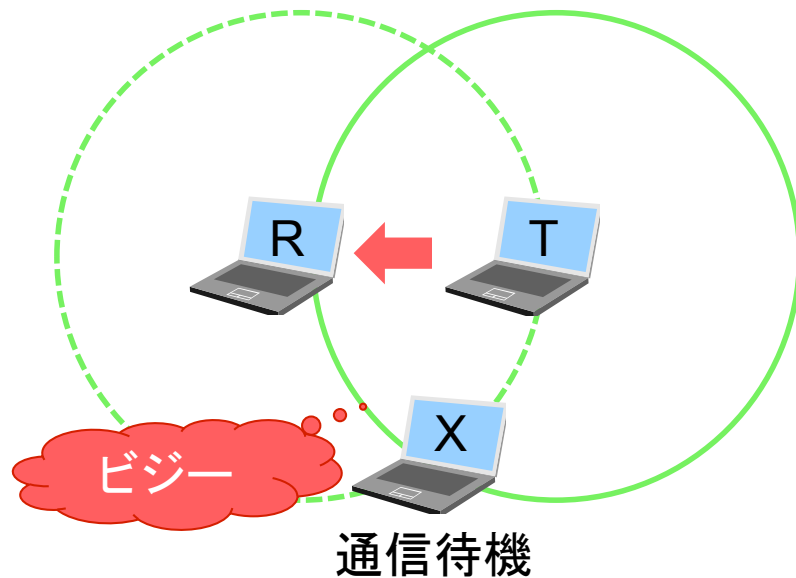
干渉回避するために通信タイミングを制御するMACプロトコルが必要

MAC: Medium Access Control

# 背景 -従来の干渉回避機構

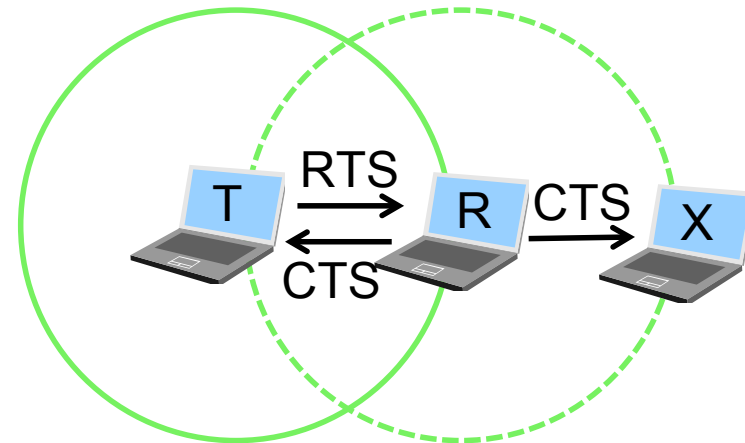
## 物理キャリアセンス

- パケット送信前にチャネルの使用状況を確認
- ビジーであれば通信待機



## 仮想キャリアセンス

- データ送信の許可を求めるパケット(RTS)とデータ送信を許可するパケット(CTS)の使用

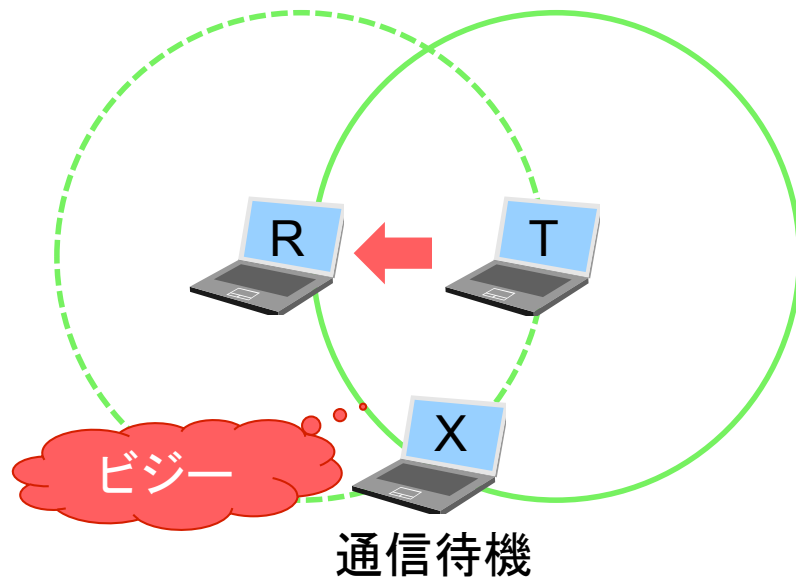


RTS: Request To Send    CTS: Clear To Send

# 背景 -従来の干渉回避機構

## 物理キャリアセンス

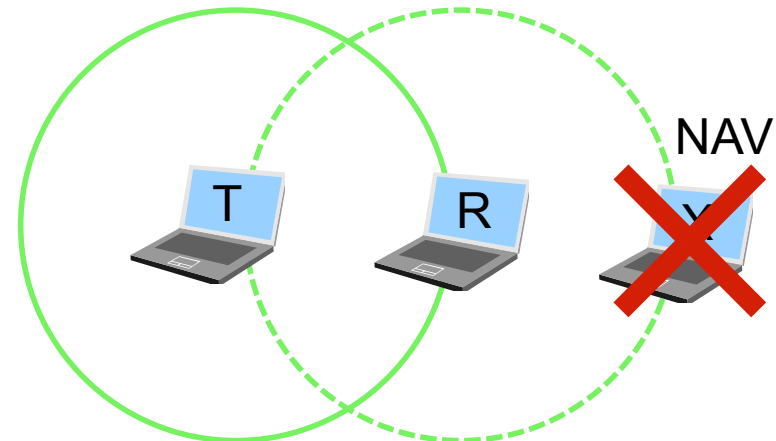
- パケット送信前にチャネルの使用状況を確認
- ビジーであれば通信待機



## 仮想キャリアセンス

- RTS/CTSを受信した周辺端末は周囲の通信を認識
- 周辺端末は一定期間通信を抑制

通信抑制期間=**NAV**  
(Network Allocation Vector)

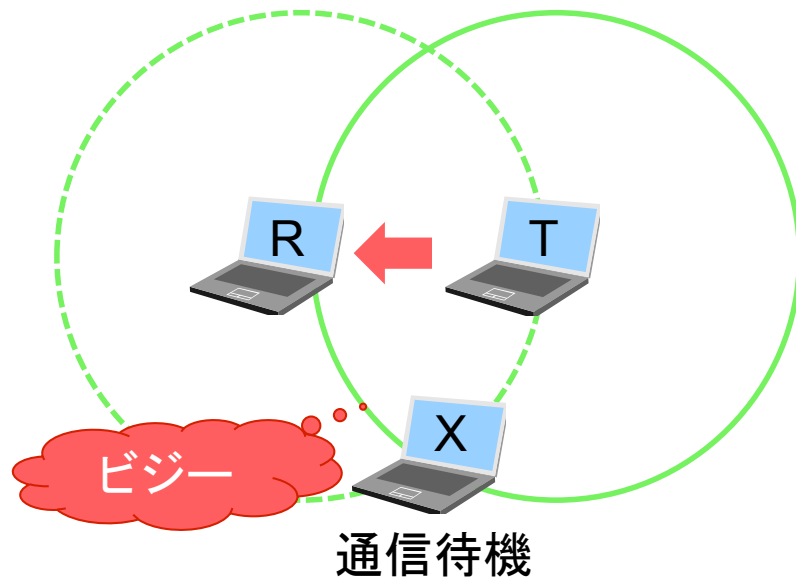


RTS: Request To Send    CTS: Clear To Send

# 背景 -従来の干渉回避機構

## 物理キャリアセンス

- パケット送信前にチャネルの使用状況を確認
- ビジーであれば通信待機



## 仮想キャリアセンス

- RTS/CTSを受信した周辺端末は周囲の通信を認識
- 周辺端末は一定期間通信を抑制

通信抑制期間=**NAV**  
(Network Allocation Vector)

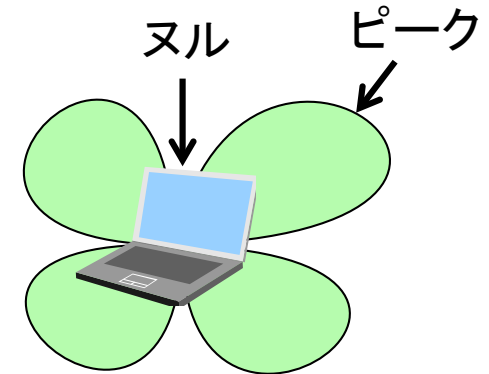
全方位性アンテナを想定しているため、NAV設定による過剰な通信抑制により低い空間利用効率

RTS: Request To Send    CTS: Clear To Send

# 可変指向性アンテナを用いた干渉回避

## アダプティブアレーアンテナ

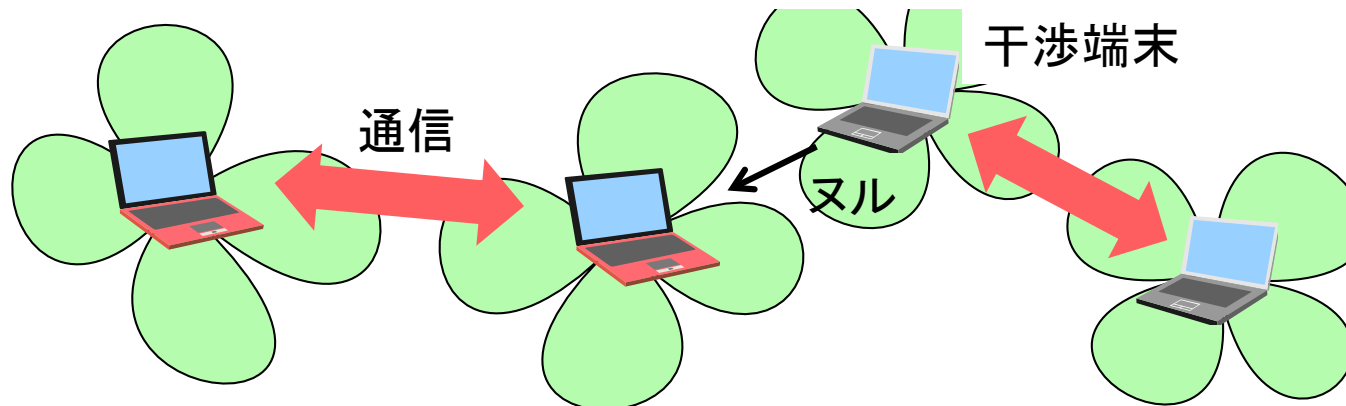
- ピーク点とヌル点を適応的に制御可能
- ビームフォーミングによる周辺環境に適したビーム形成



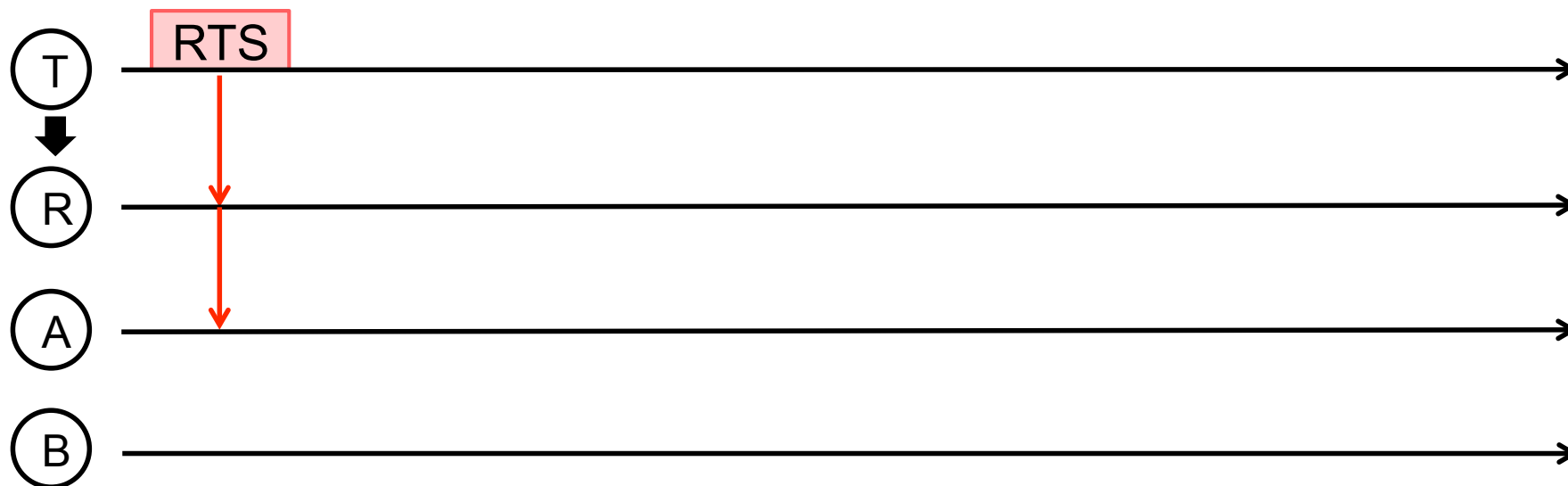
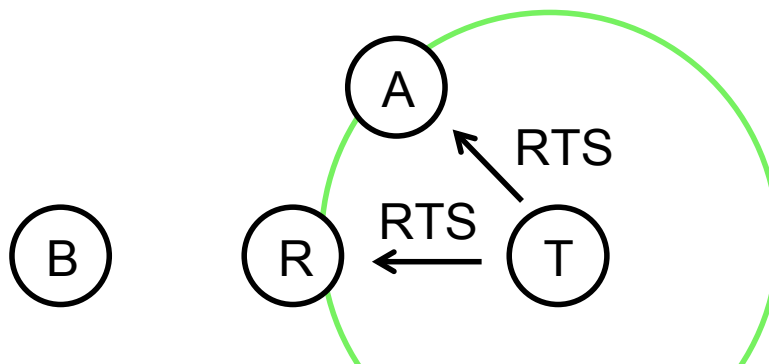
ヌル点: 利得が非常に小さくなる方向

## アダプティブアレーアンテナを用いた干渉回避

- NAVは使用せず, 干渉端末に対してヌル点を形成して干渉回避

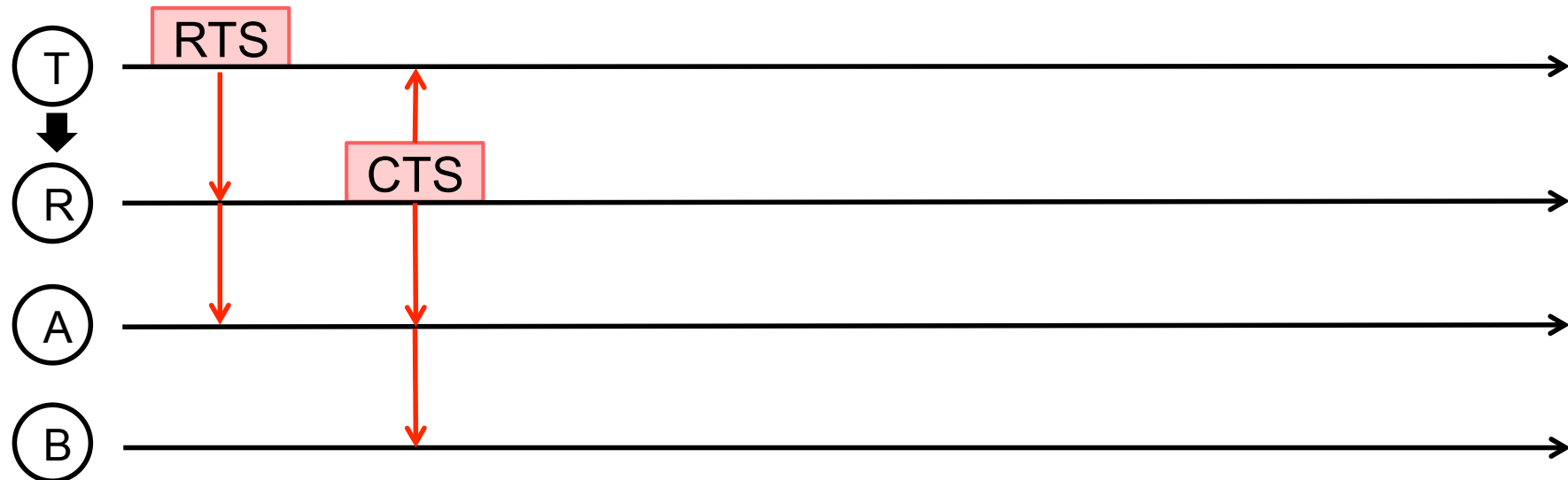
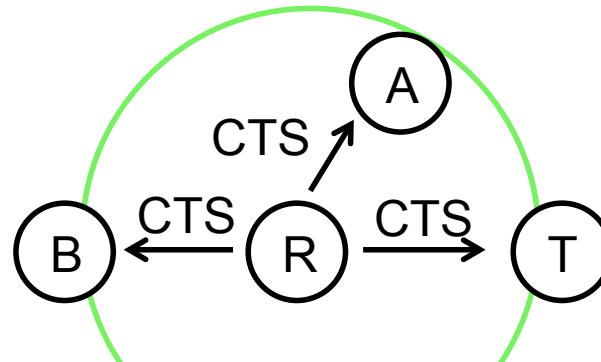


# SCSMA/CN



送信端末は全方位性ビームでRTSを送信

# SCSMA/CN

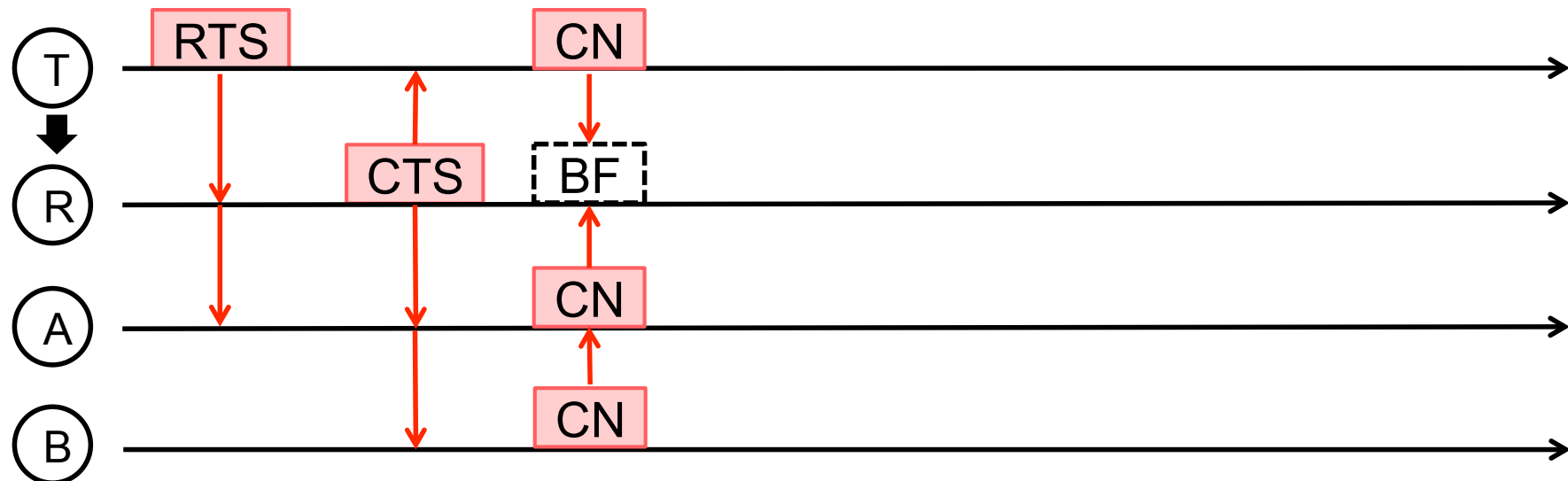
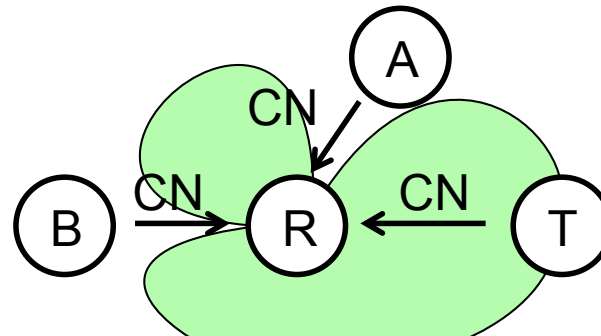


受信端末は全方位性ビームでCTSを返信



# SCSMA/CN

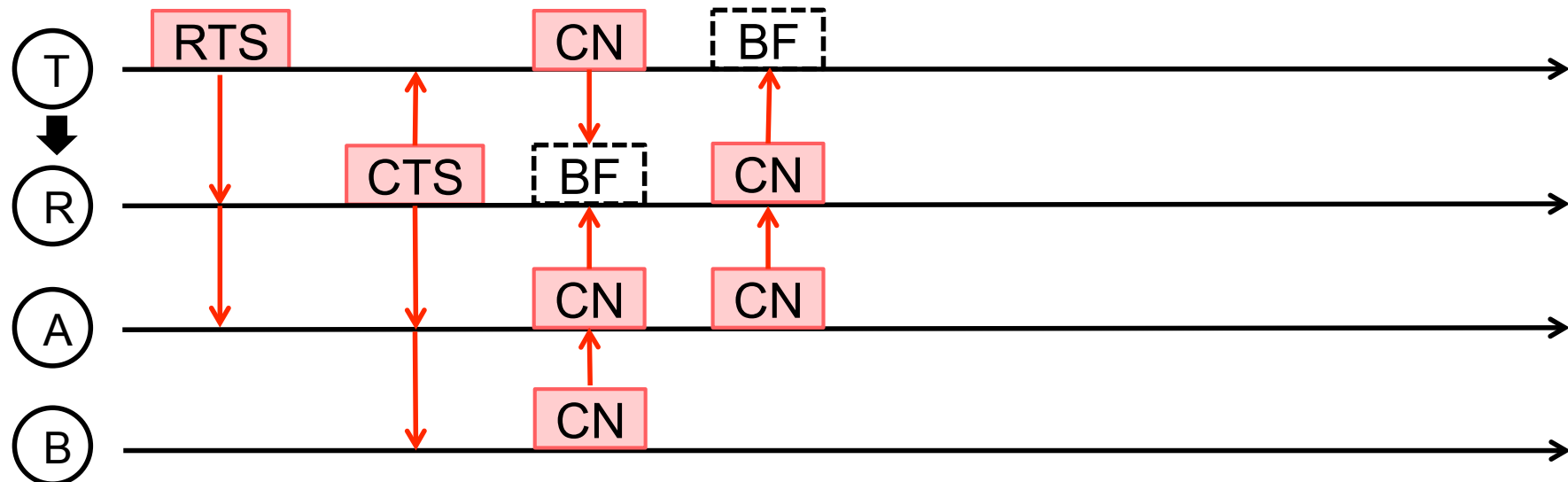
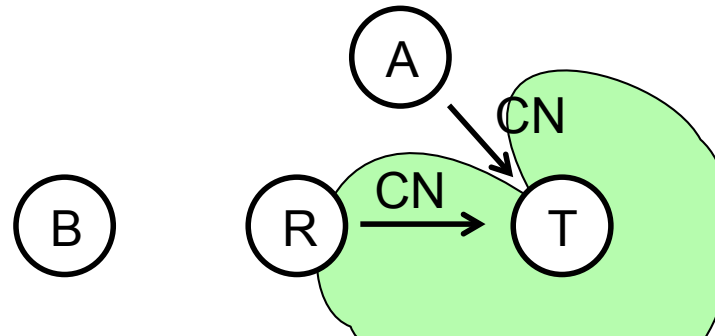
CN: Cooperative Nulling



受信端末はCTSを受信した端末から同時にCNパケットを受信しビームフォーミング

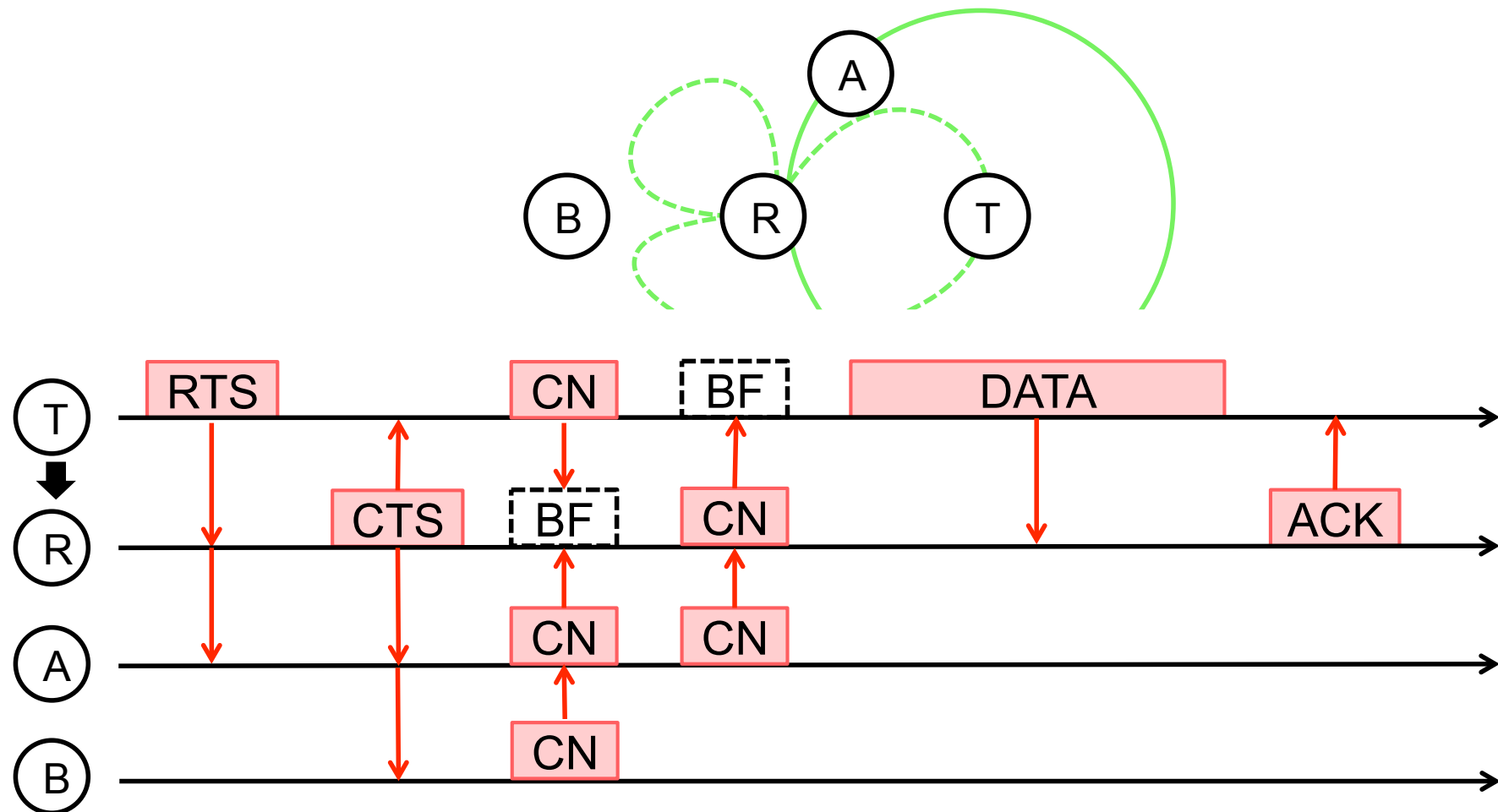
# SCSMA/CN

CN: Cooperative Nulling



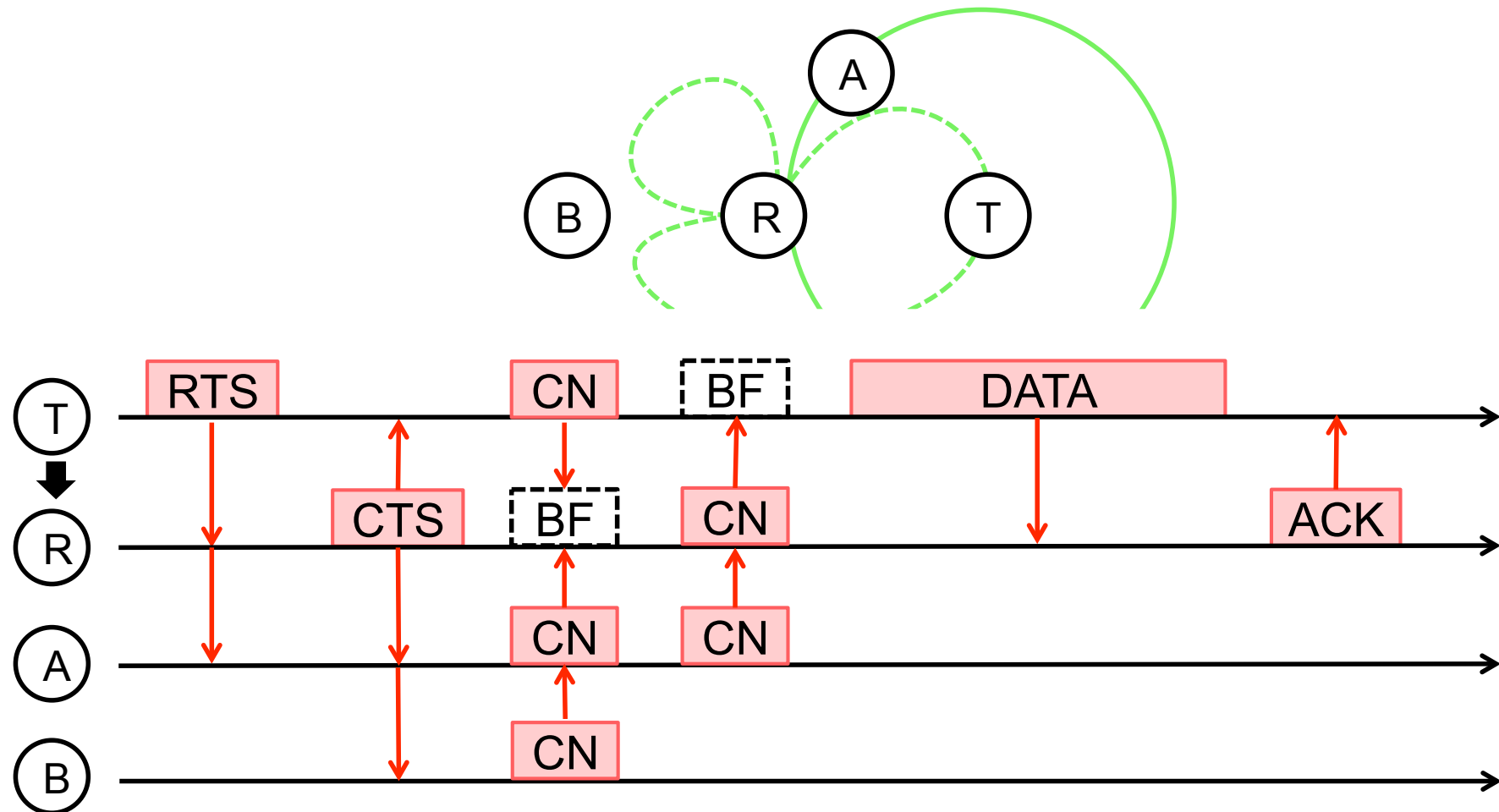
送信端末はRTSを受信した端末から同時にCNパケットを受信しビームフォーミング

# SCSMA/CN



形成した指向性ビームを用いてDATAを受信

# SCSMA/CN



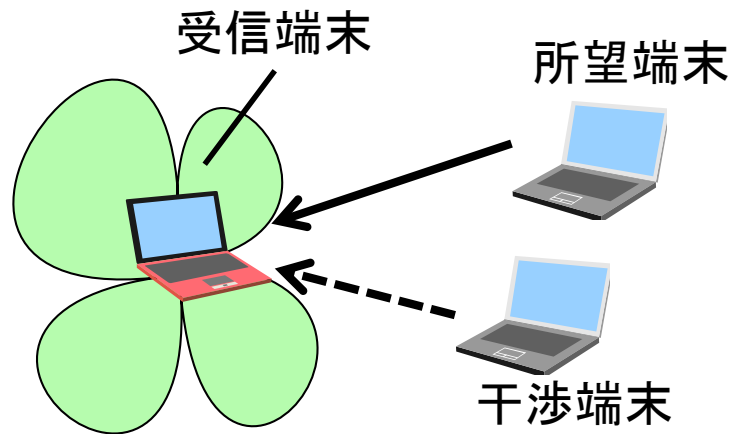
常に最適なビームフォーミングが行えるわけではない  
問題点:ビームフォーミングが的確に行えない状況が存在

# 問題となる状況

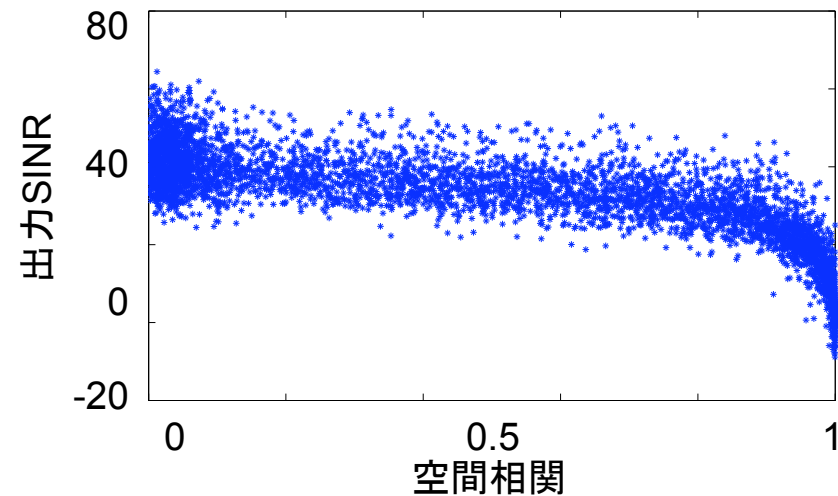
## ① 所望端末と干渉端末の位置関係による問題

到来する所望波と干渉波が類似している場合ピーク点とヌル点の切り分け困難

類似度を示す指標: **空間相関**



ヌル形成によって所望波方向の利得も減少

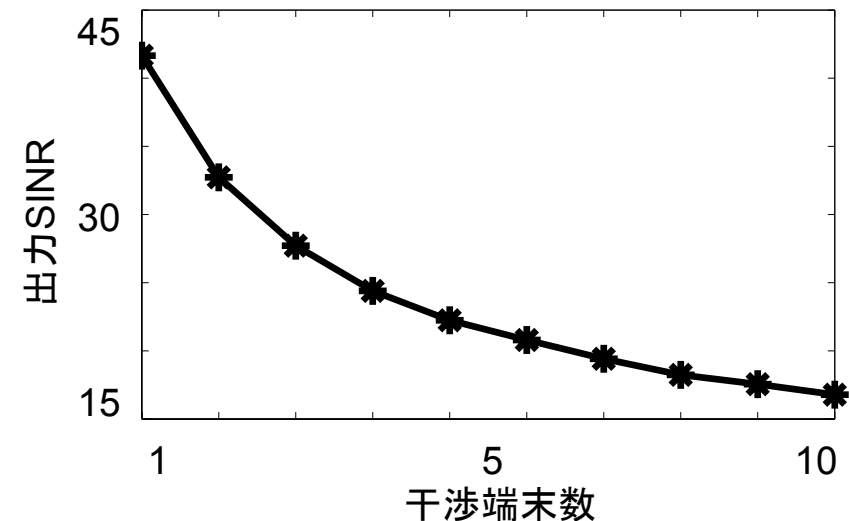
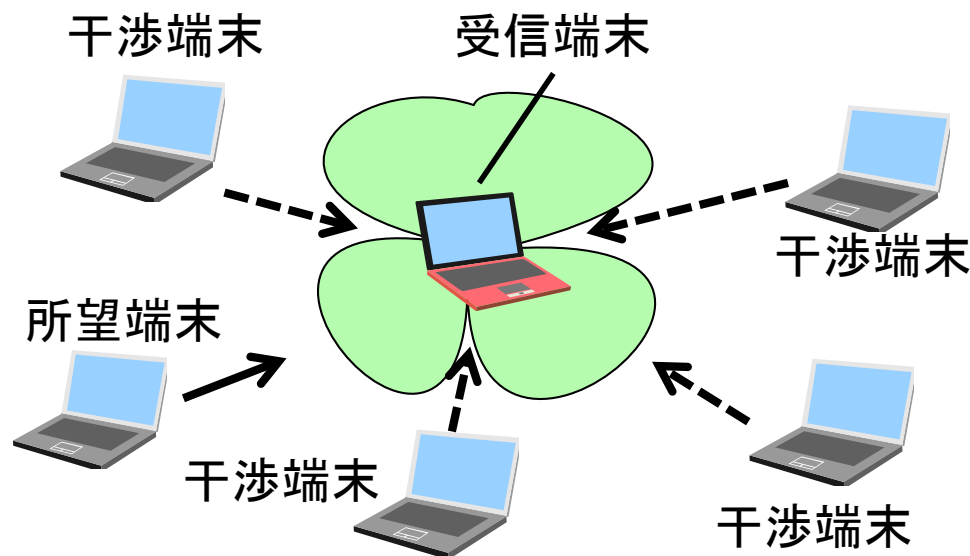


空間相関と出力SINRには負の相関

# 問題となる状況

## ② 干渉端末が多く存在する状況

アンテナによって軽減できる干渉波数には限界が存在  
許容数以上の干渉端末に対してはヌル形成不可能

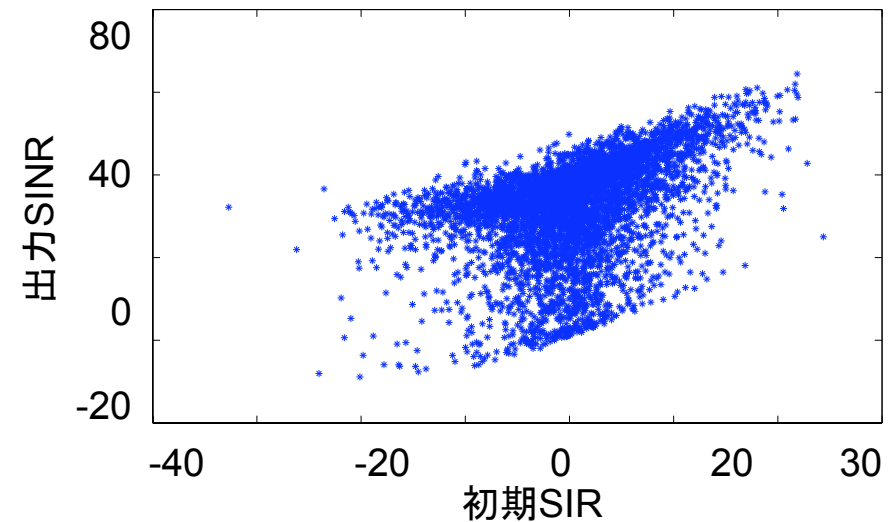
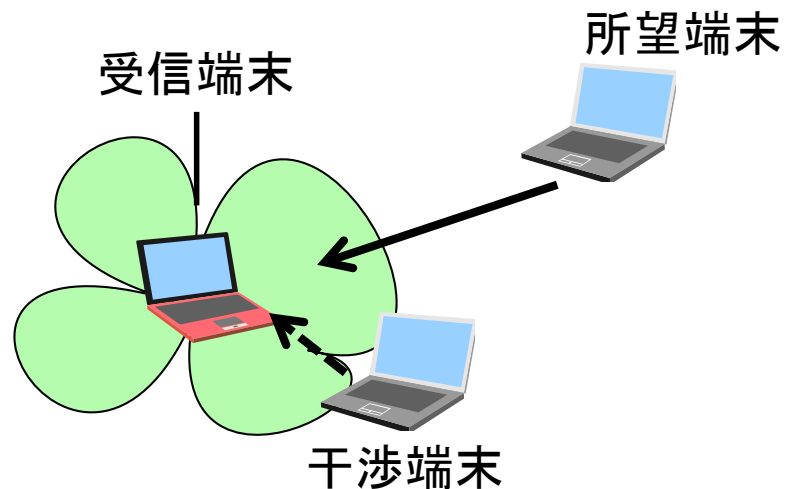


干渉端末数の増加に伴って  
出力SINRが低下

# 問題となる状況

## ③初期SIRが小さい状況

ビームフォーミング前のSIRが小さい場合, ビームフォーミングを行っても十分なSINRが得られない



初期SIRと出力SINRには正の相関

# 問題となる状況

- ①所望端末と干渉端末の空間相関が高い状況
- ②干渉端末が多く存在する状況
- ③初期SIRが小さい状況

SCSMA/CNではこれらの状況を考慮した設計がされていない  
そのため干渉が発生し通信を妨害

目的

干渉を回避し空間利用効率を向上

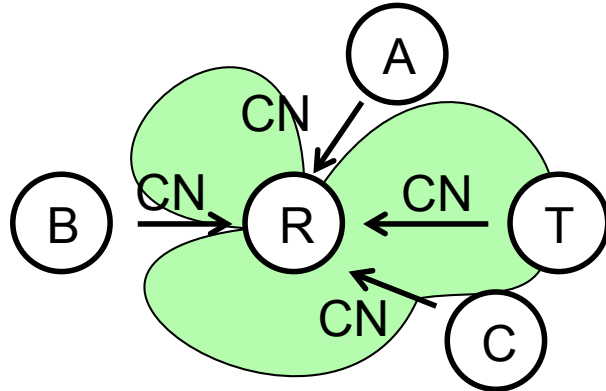
ビームフォーミングとNAVを組み合わせた干渉回避機構  
を提案



# 提案手法

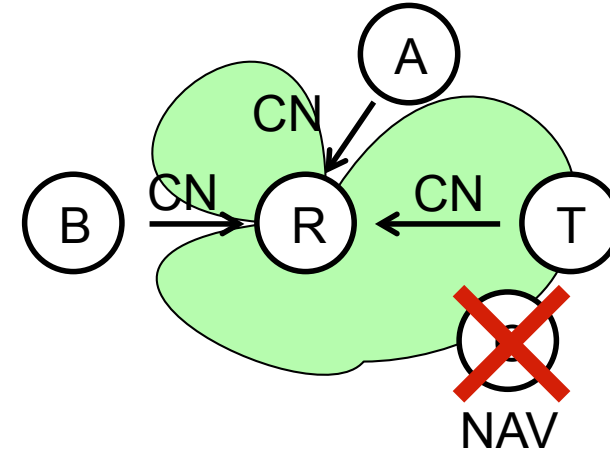
- 各干渉端末に対し、NAVによって通信を抑制するかヌルを形成するか判断
- 通信を抑制していない端末に対してヌル形成し通信

## SCSMA/CN



Cに十分なヌルが形成できていない

## 提案干渉回避機構



ヌル形成困難なCにはNAV設定

# 提案手法 -NAV設定判断

考慮すべき要素 = 空間相関, 初期SIR, 干渉端末数

## 判別分析を用いたNAV設定判断

変数は空間相関と初期SIR

出力SINRが20 [dB]を越えるか否かで, 2つの母集団を作成

### 判別式

シングルパス	$z = 4.2414 - 6.0246x_1 + 0.066x_2$	$x_1$ : 空間相関
マルチパス	$z = -2.3717 - 4.8367x_1 + 0.1413x_2$	$x_2$ : 初期SIR

$$\begin{cases} z \geq 0 : \text{ヌルを形成} \\ z < 0 : \text{NAVを設定} \end{cases}$$

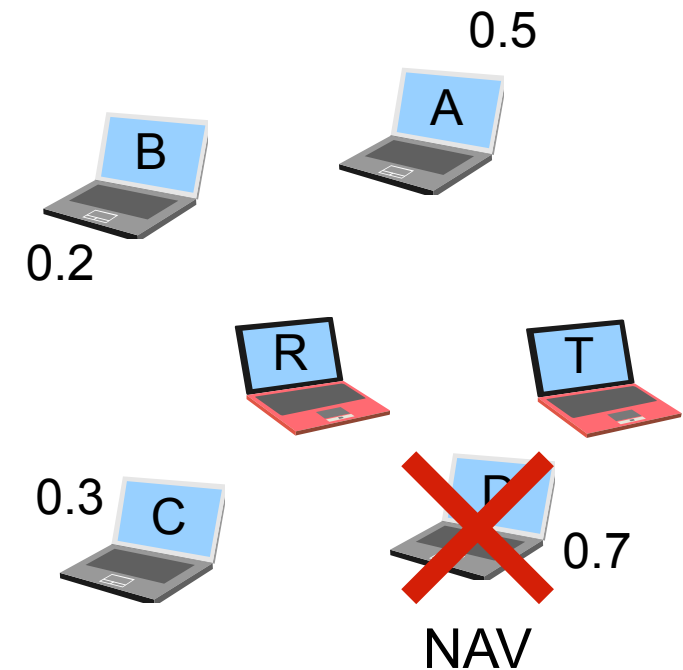
20 [dB] = BPSK変調においてBER=10<sup>-5</sup>を満たすために必要なSINR

# 提案手法 -NAV設定判断

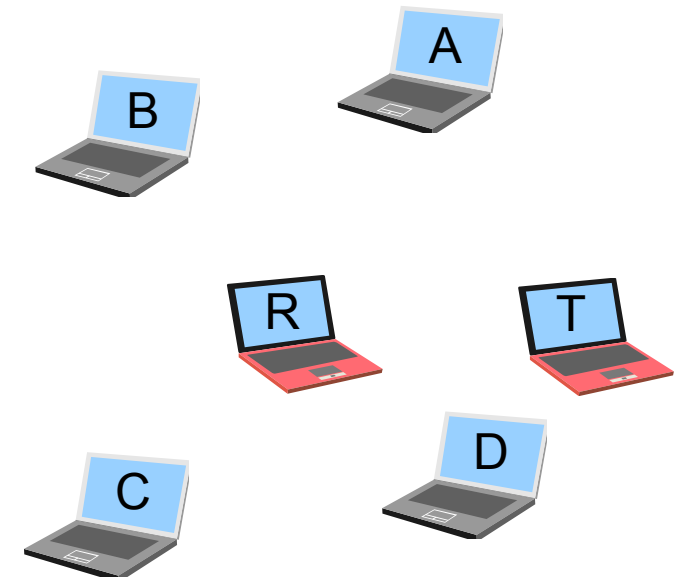
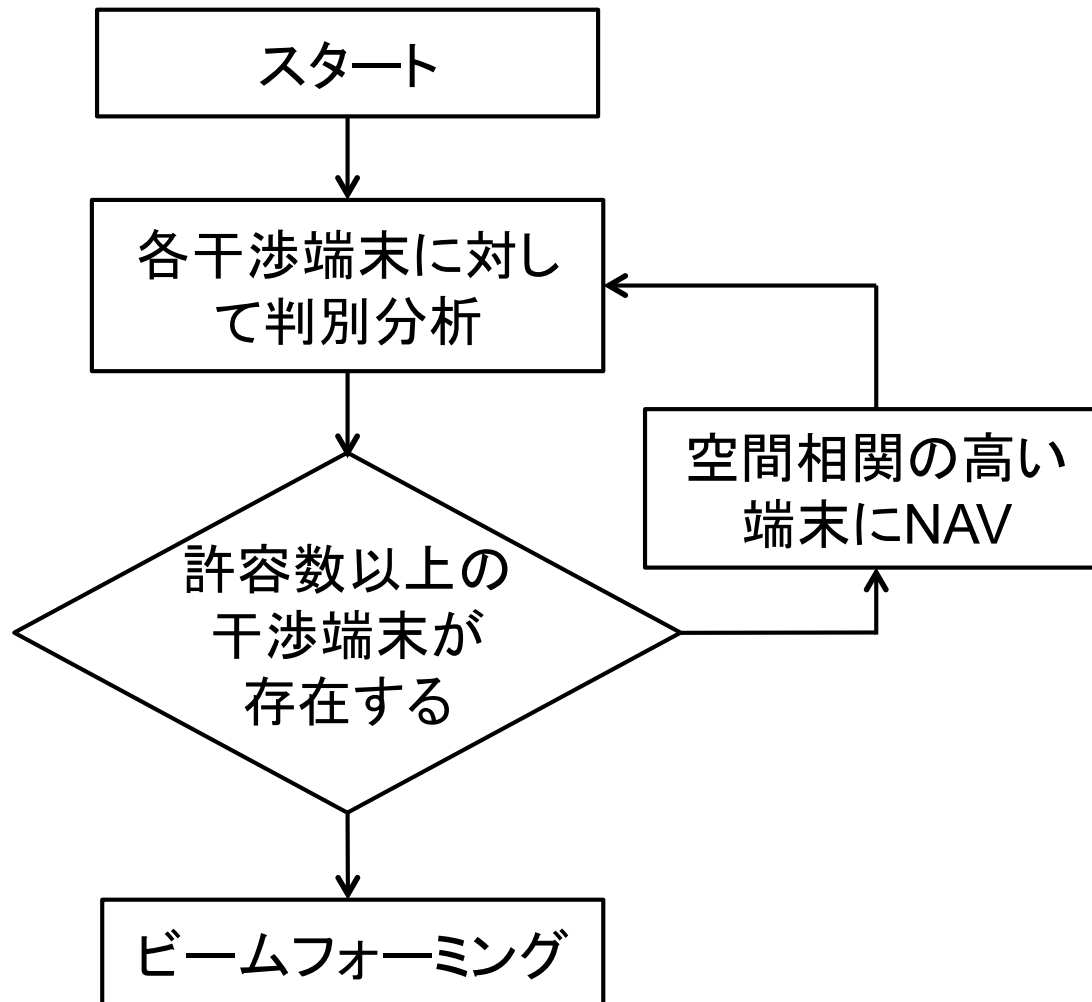
考慮すべき要素＝空間相関，初期SIR，**干渉端末数**

## 干渉端末数を考慮したNAV設定判断

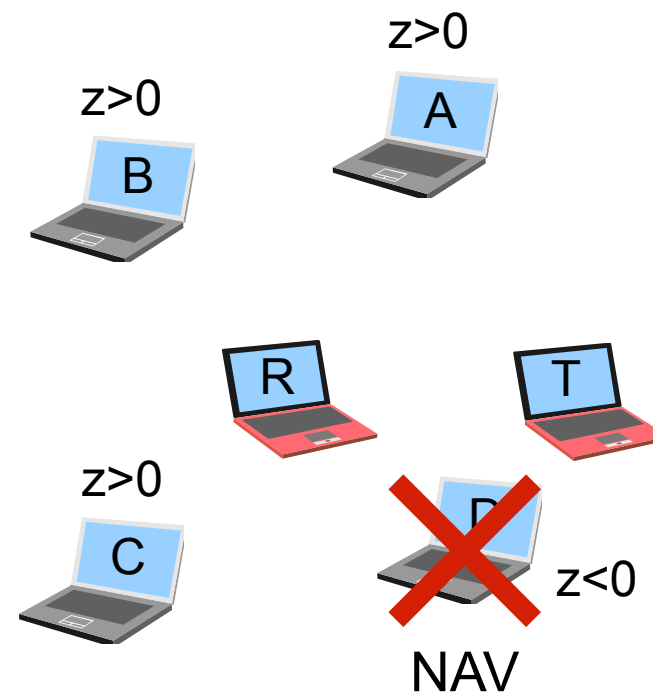
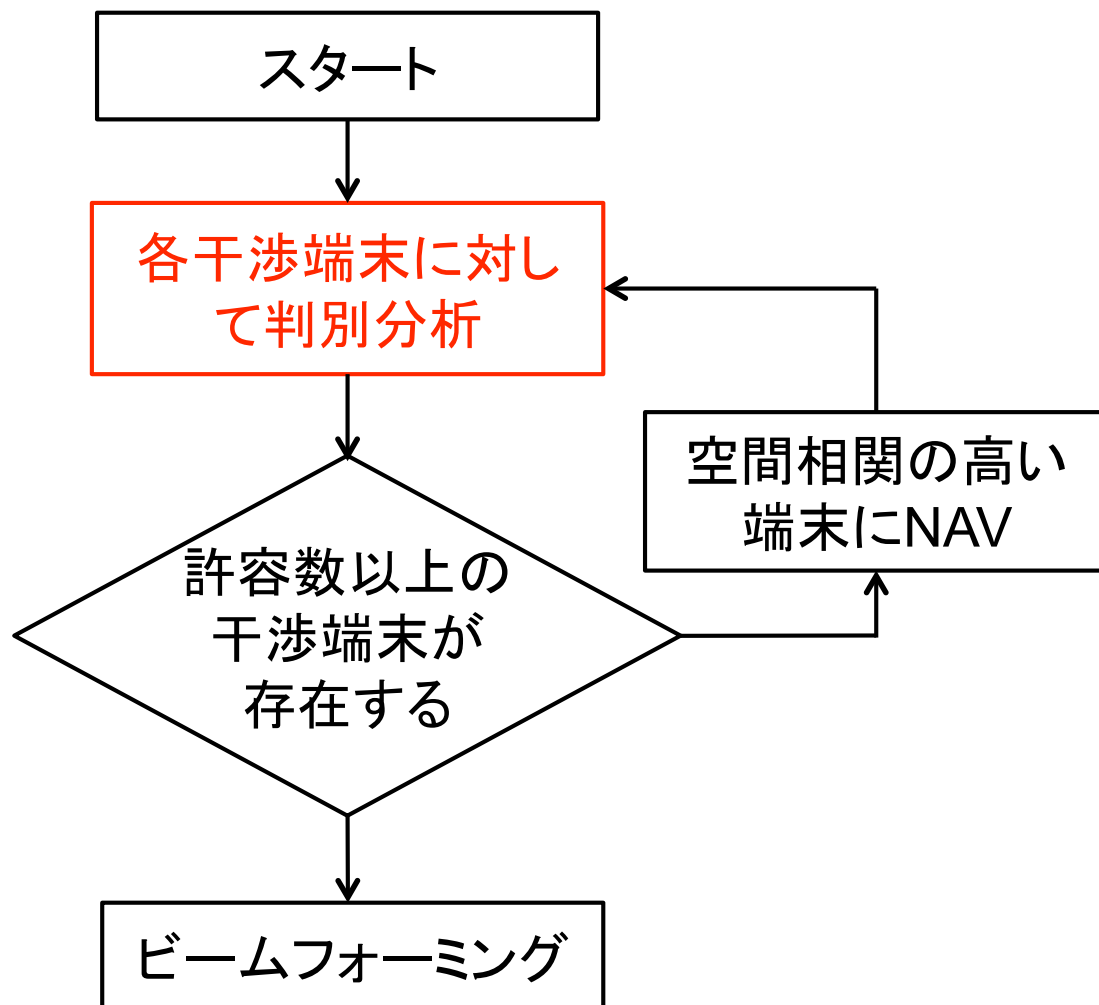
1. 所望端末との空間相関を確認
2. 空間相関の一番高い端末を選択しNAVを設定
3. 干渉端末数が許容数以下になるまで2.の繰り返し



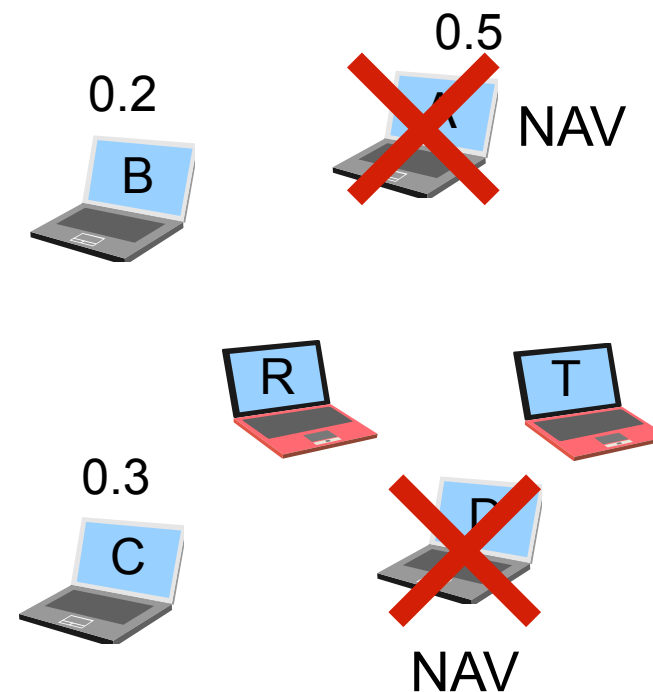
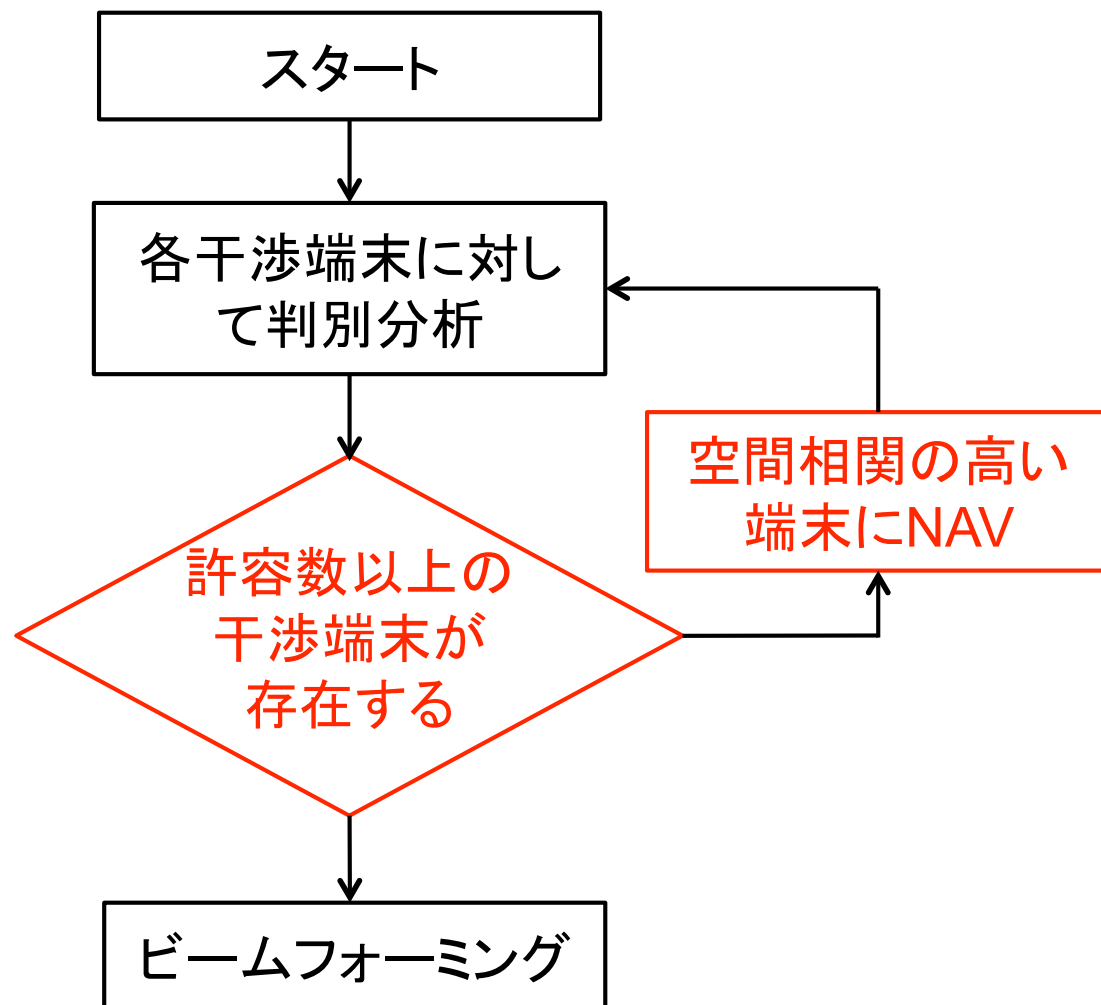
# 提案手法 – 適用手順



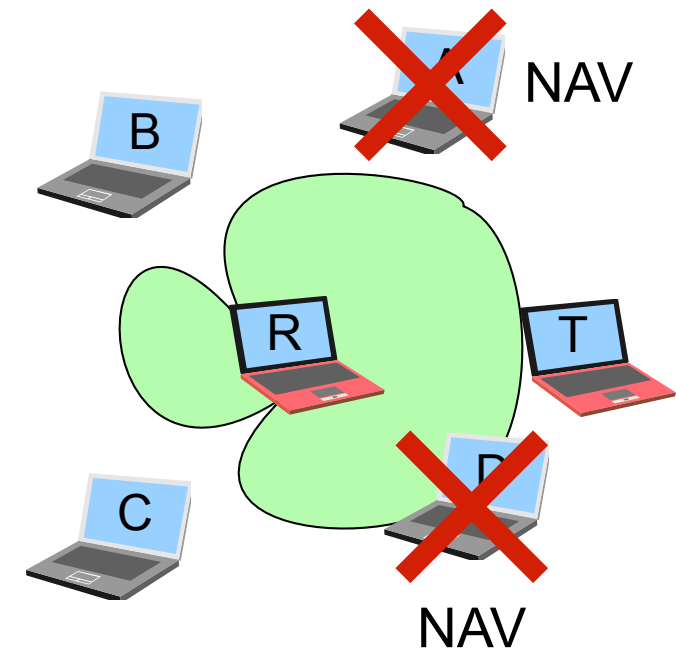
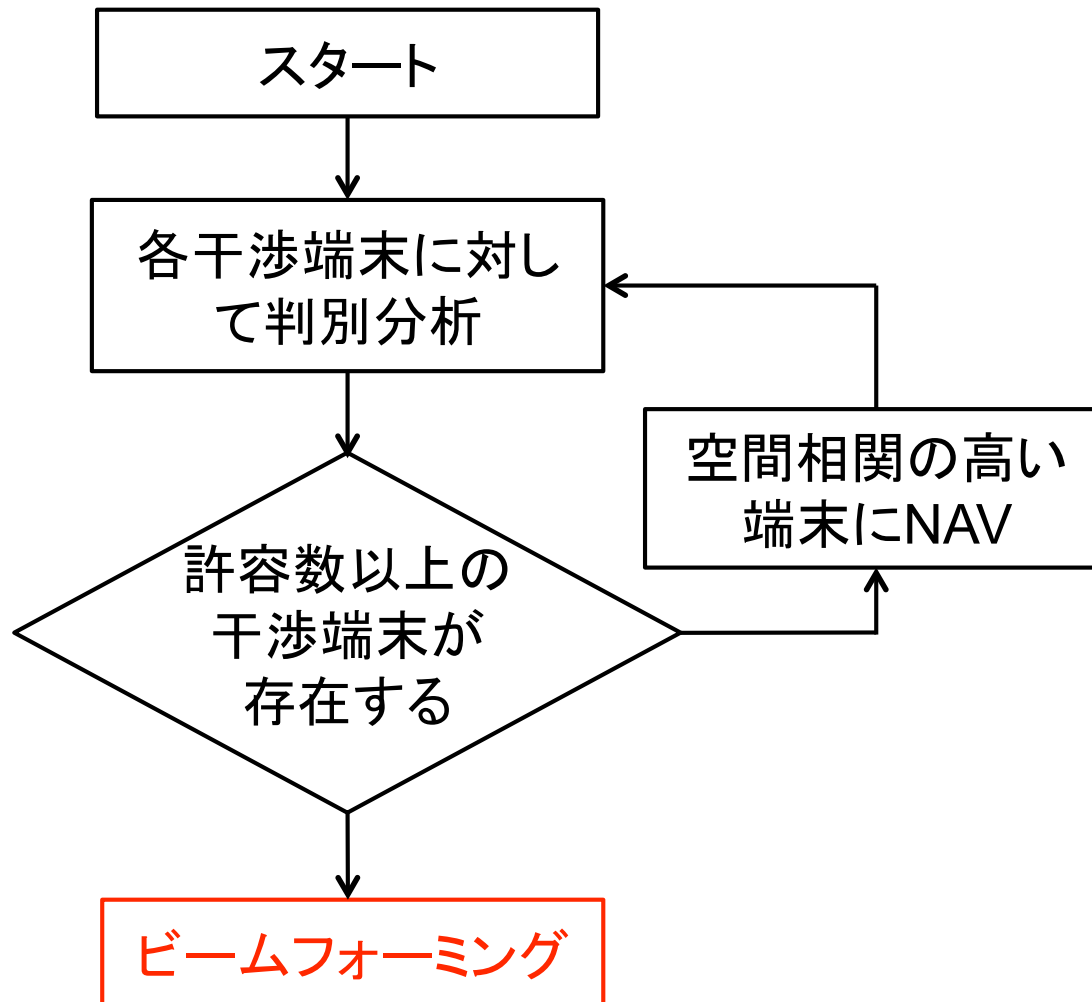
# 提案手法 – 適用手順



# 提案手法 – 適用手順



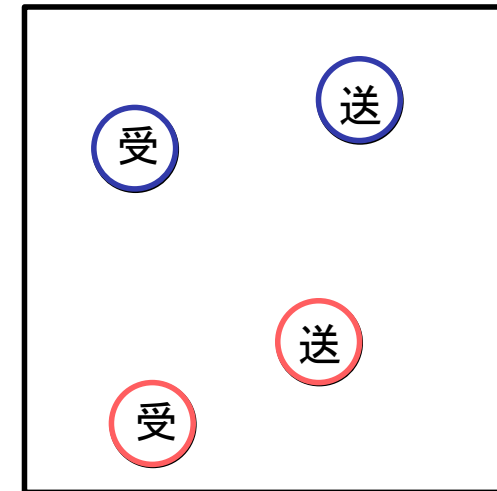
# 提案手法 – 適用手順



# シミュレーション諸元

複数の通信ペアが存在する環境において提案手法を用いることによる空間利用効率を評価

伝搬路	自由空間
	1次反射マルチパス
周波数	2.484 GHz
マップサイズ	20 m × 20 m
通信ペア数	1～8ペア
通信範囲	マップ全域
アンテナ	7素子エスパアンテナ
試行回数	100回
許容干渉端末数	シングルパス環境: 12端末
	マルチパス環境: 6端末



- 端末をランダムに配置し、通信相手として最も近い端末を選択
- 各受信端末に提案手法を適用し、NAVの設定により通信抑制されていないペアが同時に通信開始



# シミュレーション - 評価指標

- 同時通信成功ペア数

受信SINRが20 dBを越えた通信ペアの数

- 通信成功ペアの通信容量

$$C = \log_2(1 + SINR)[\text{bps/Hz}]$$

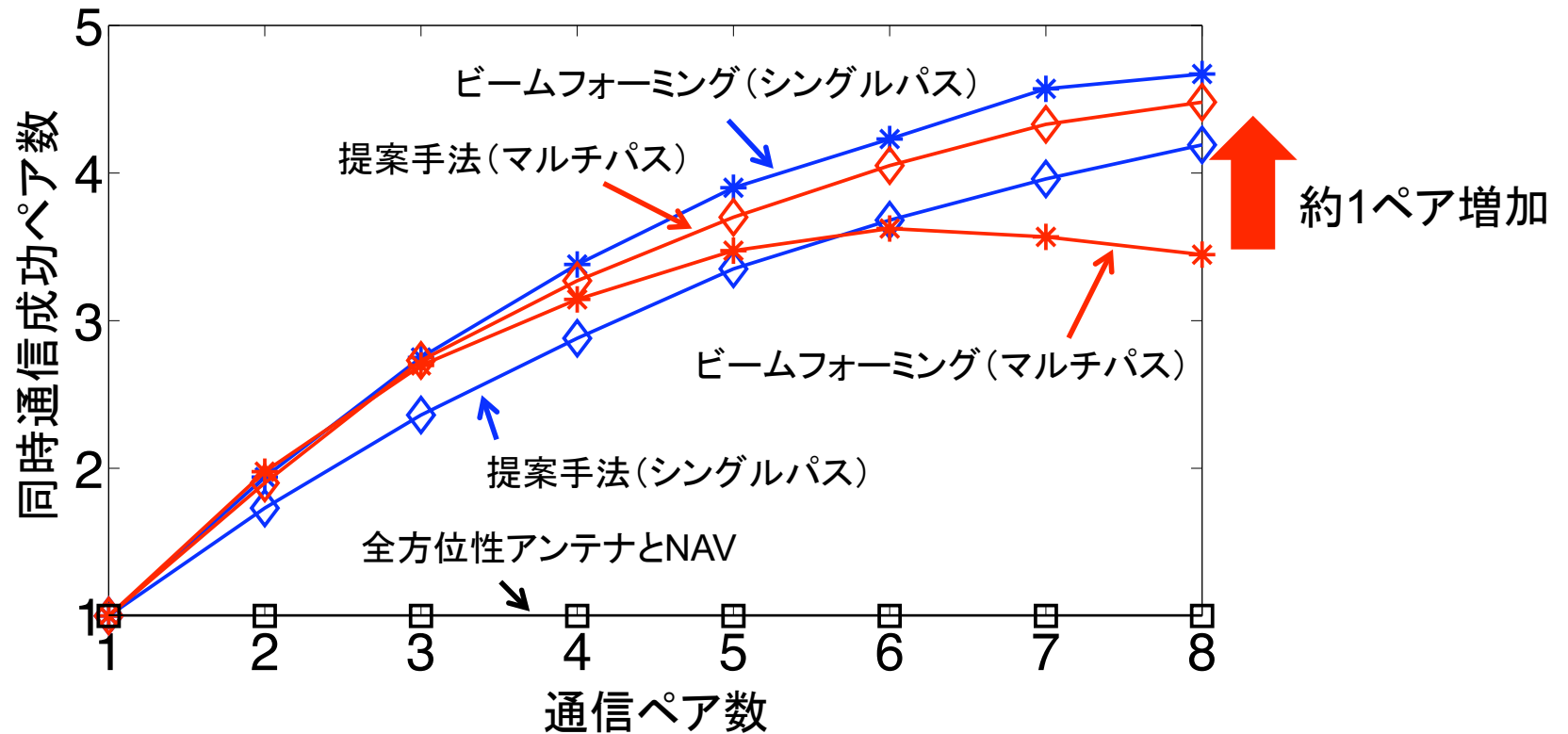
通信に成功したペアの総通信容量を評価

- 通信成功率

$$\frac{\text{通信に成功したペア数}}{\text{同時通信を試みたペア数}}$$

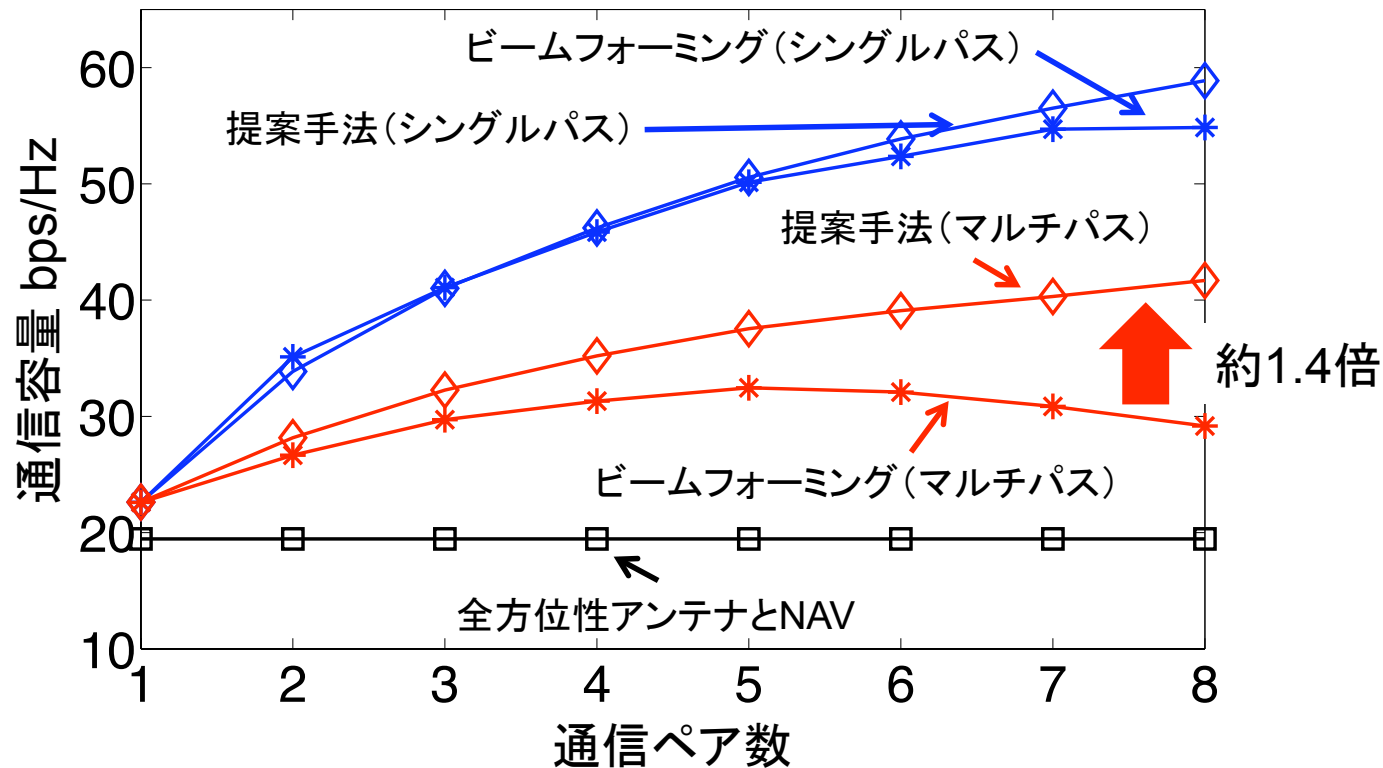
20 [dB] = BPSK変調において $BER=10^{-5}$ を満たすために必要なSINR

# シミュレーション結果 -同時通信成功ペア数



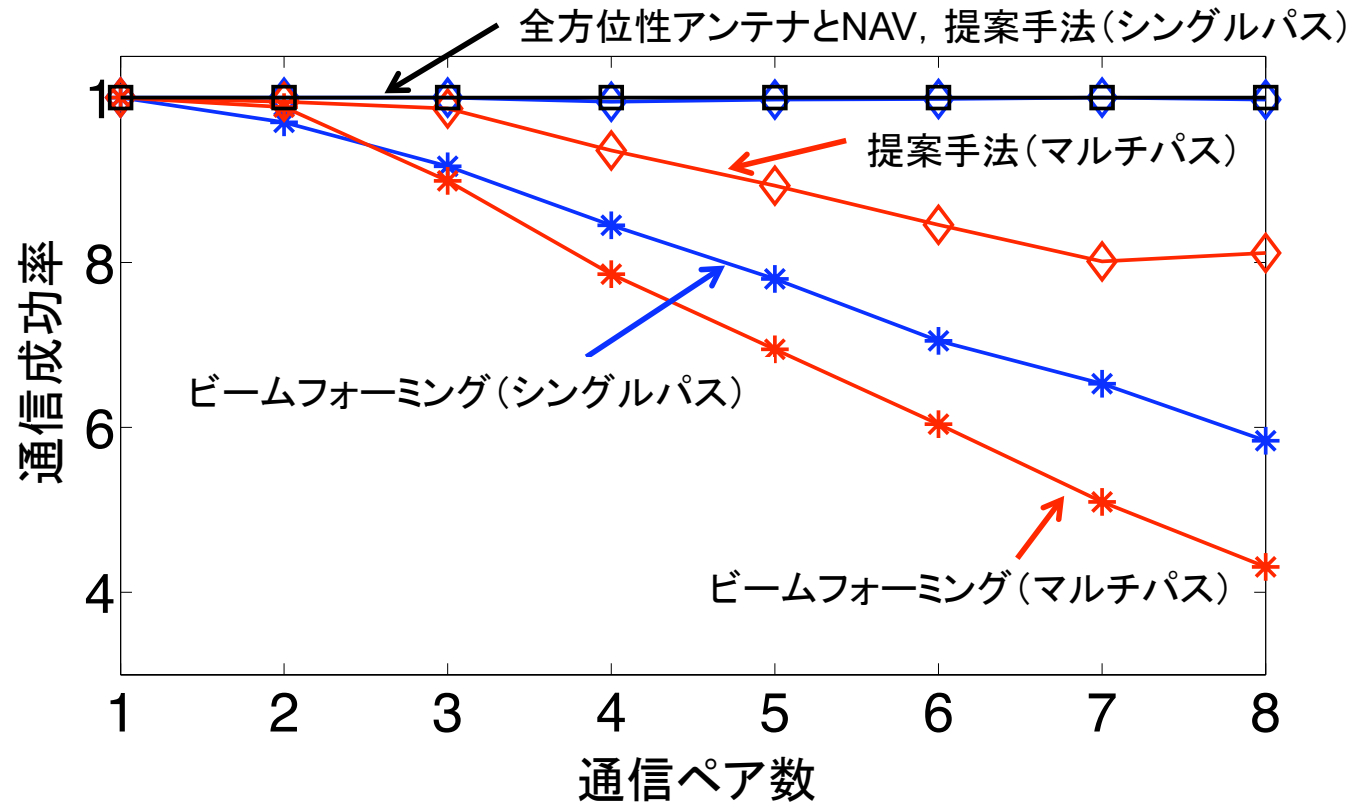
- シングルパス環境では提案手法を用いるとNAVを設定しすぎることにより同時通信成功ペア数減少
- マルチパス環境では従来のビームフォーミング手法は減少し始めるが、提案手法を用いることにより**最大約1ペア増加**

# シミュレーション結果 – 通信容量



- シングルパス環境では同時通信成功ペア数は減少していたが、通信成功ペアの総通信容量は同等
- マルチパス環境では従来のビームフォーミング手法に比べて、  
最大約1.4倍に増加

# シミュレーション結果 - 通信成功率



- 従来のビームフォーミング手法では, 通信ペアが増えることでお互いの干渉が増加し, 通信成功率が低下
- 提案手法を用いることで通信成功率が向上し, 再送回数の削減が期待できる

# まとめ

- ビームフォーミングとNAVを組み合わせた干渉回避機構を提案
- 従来対処されていなかった状況へ対処
- シングルパス環境では同時通信成功ペア数は減少したが、通信成功率が大幅に向上
- マルチパス環境では同時通信成功ペア数が約1ペア増加、通信容量が約1.4倍に増加、80%以上の通信成功率を実現



# 空間相関の計算方法

全方位	0Ω	0Ω	0Ω	0Ω	0Ω	0Ω
0°セクタ	-90Ω	0Ω	0Ω	0Ω	0Ω	0Ω
60°セクタ	0Ω	-90Ω	0Ω	0Ω	0Ω	0Ω
120°セクタ	0Ω	0Ω	-90Ω	0Ω	0Ω	0Ω
180°セクタ	0Ω	0Ω	0Ω	-90Ω	0Ω	0Ω
240°セクタ	0Ω	0Ω	0Ω	0Ω	-90Ω	0Ω
300°セクタ	0Ω	0Ω	0Ω	0Ω	0Ω	-90Ω

$\mathbf{w}_m$  : ウェイトベクトル  
 $\mathbf{a}(\theta)$  : ステアリングベクトル  
 $h_m$  : 伝搬路特性  
 $u(t)$  : 送信信号  
 $n(t)$  : 熱雑音

7種類の指向性ビームで受信信号を取得

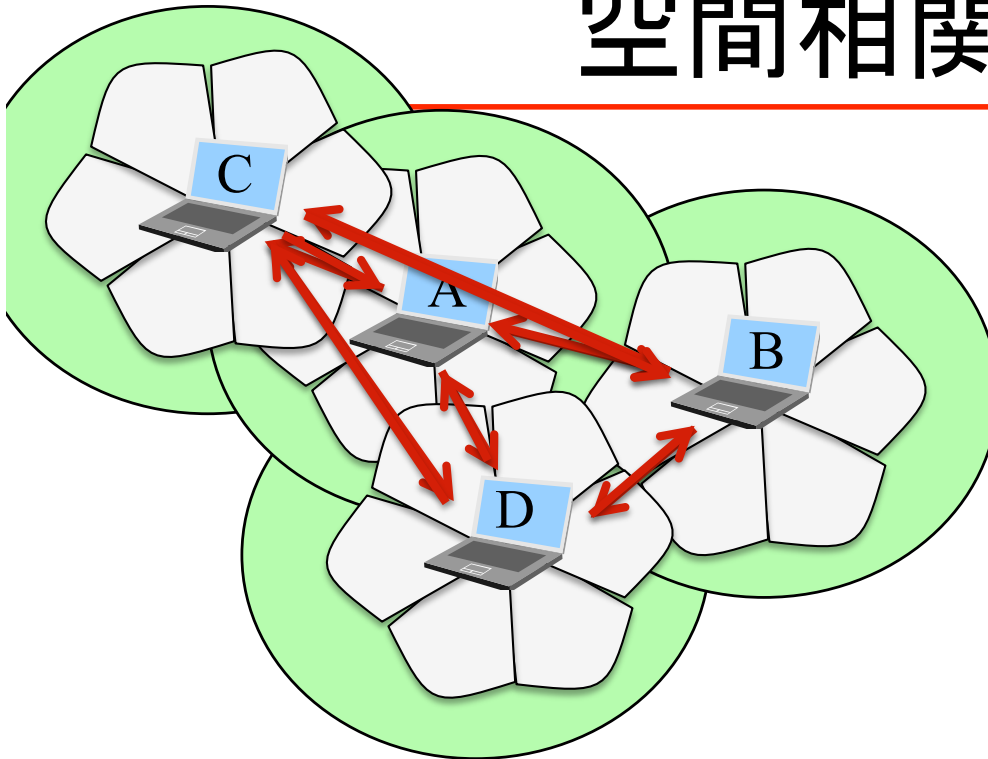
$$y_m(t) = \mathbf{w}_m^T \mathbf{a}(\theta) h_m u(t) + n(t)$$

各受信信号から  $r_m = E[y_m(t)u(t)^*]$  を計算し、受信信号ベクトル  $\mathbf{r} = [r_0, r_1, \dots, r_6]$  を取得

所望波と干渉波の受信信号ベクトル( $\mathbf{r}_d, \mathbf{r}_i$ )の相互相関係数が空間相関となる

$$\rho = \left| \mathbf{r}_d^H \mathbf{r}_i \right| / \left( \sqrt{\mathbf{r}_d^H \mathbf{r}_d} \sqrt{\mathbf{r}_i^H \mathbf{r}_i} \right)$$

# 空間相関テーブル



Cの持つ空間相関テーブル

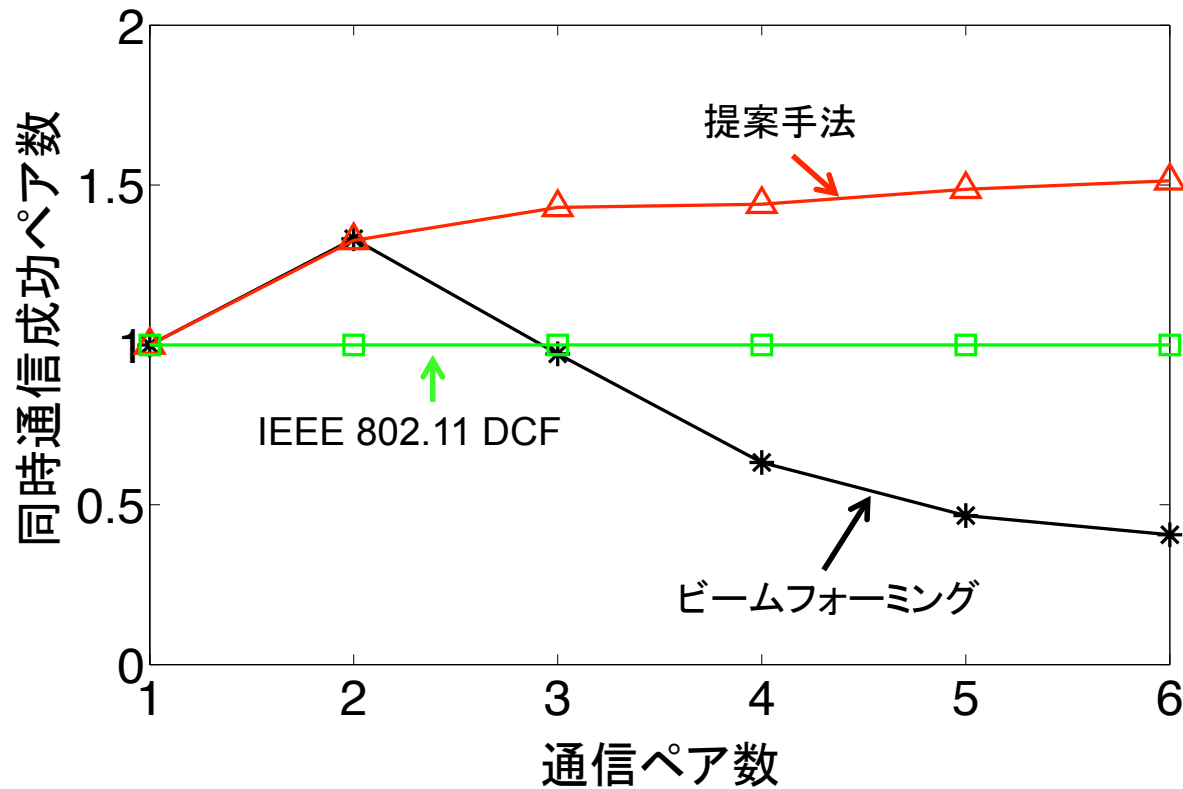
	A	B	D
A		0.8	0.2
B	0.8		0.2
D	0.2	0.2	

## 手順

1. 端末AはSETUP信号を送信後、既知信号を送信
2. 端末B,C,Dは6種類の指向性パターンと無指向性パターンでAからの信号を受信
3. Aが送信終了後、Bも既知信号を送信し、A,C,Dが受信
4. この時点でC,DはAとBの空間相関を計算可能
5. 他端末も同様に既知信号送信

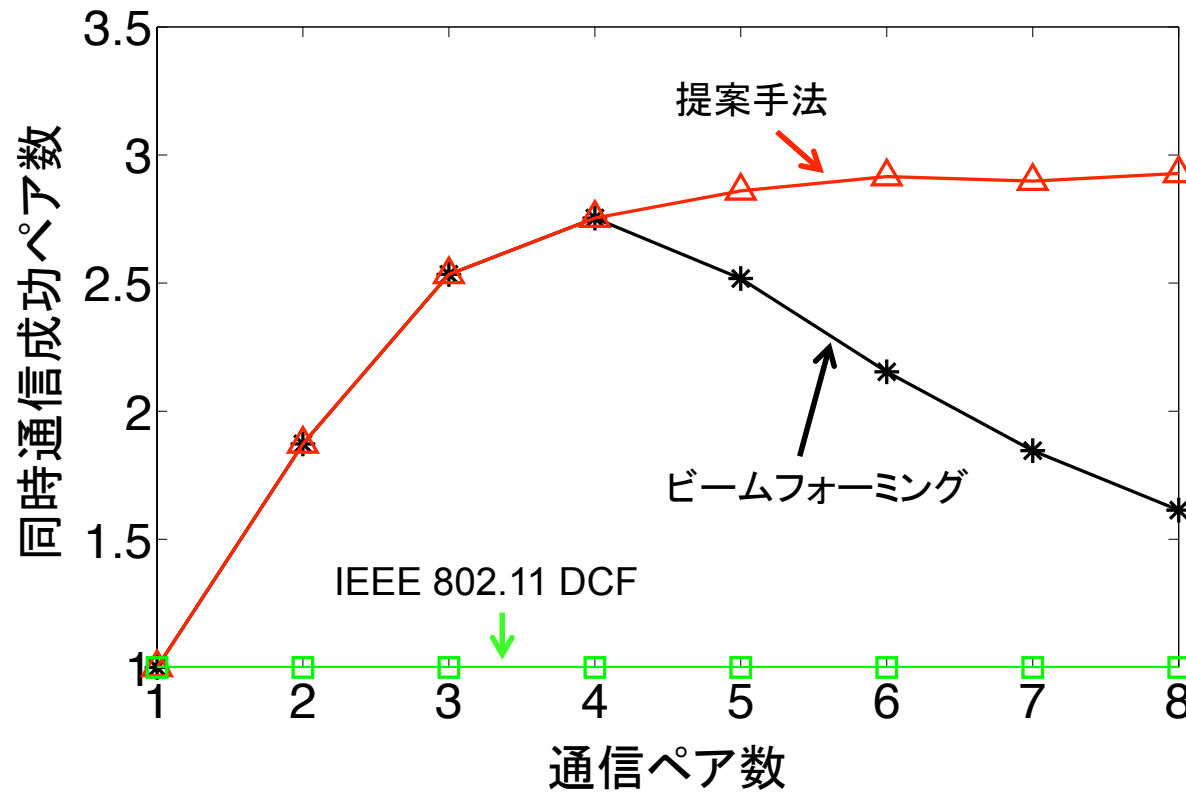


# 判別分析のみの結果



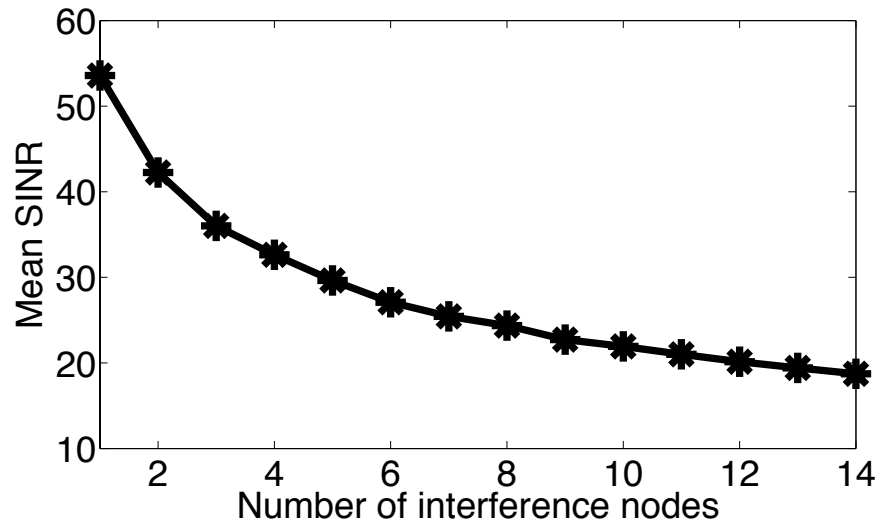
ランダムトポロジ, マルチパス環境  
従来のビームフォーミング手法より**向上**

# 干渉端末数ベースのみの結果

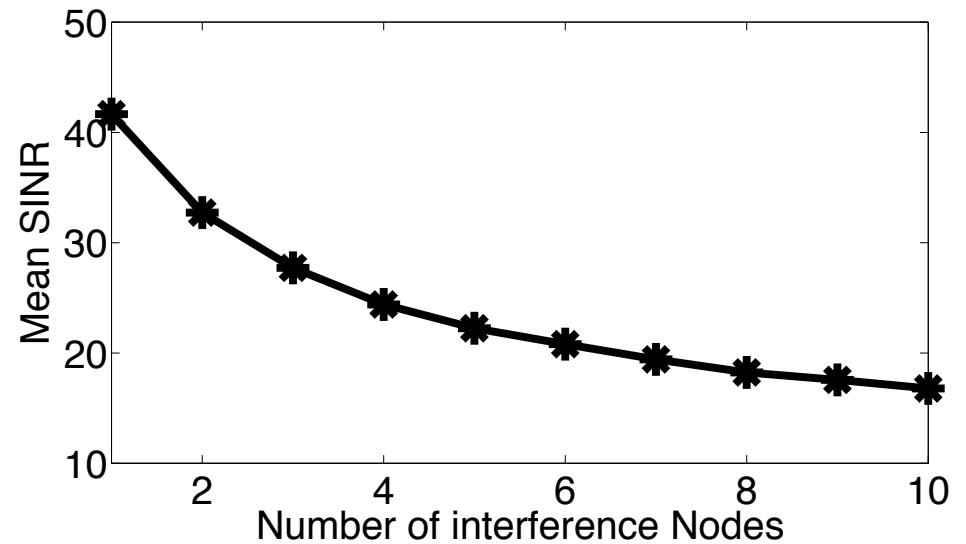


干渉の小さいトポロジ, マルチパス環境  
従来のビームフォーミング手法より**向上**

# 許容干渉端末数の導出



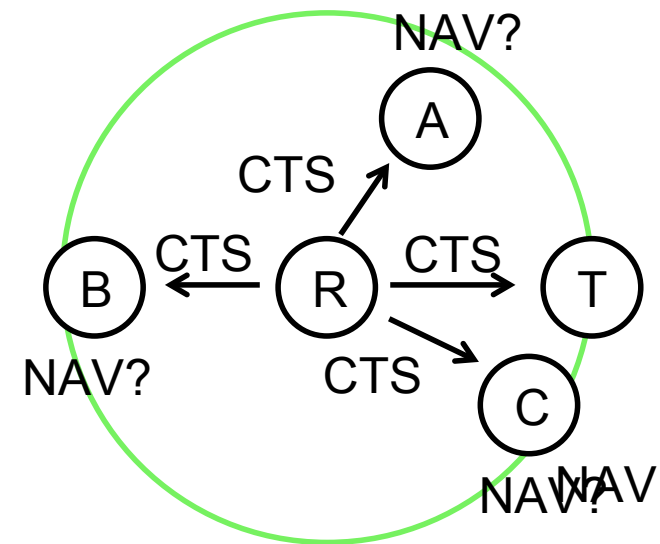
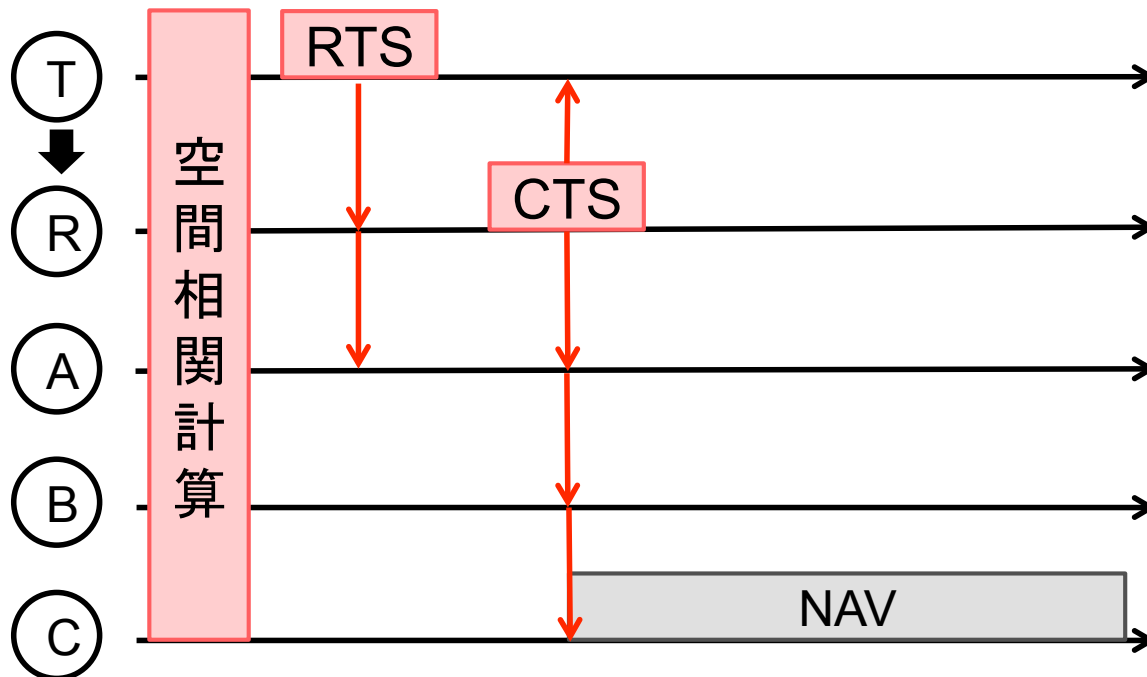
シングルパス



マルチパス

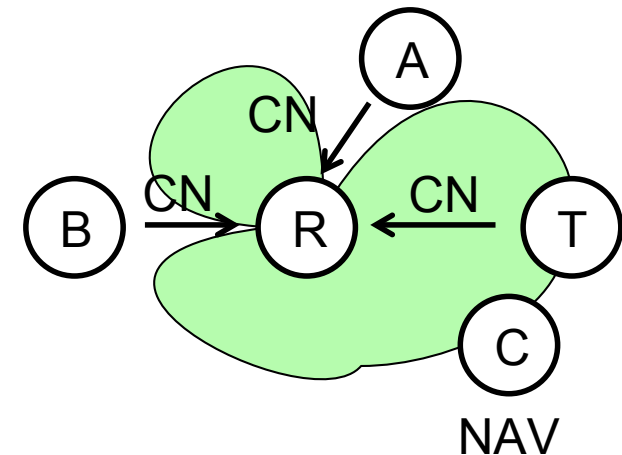
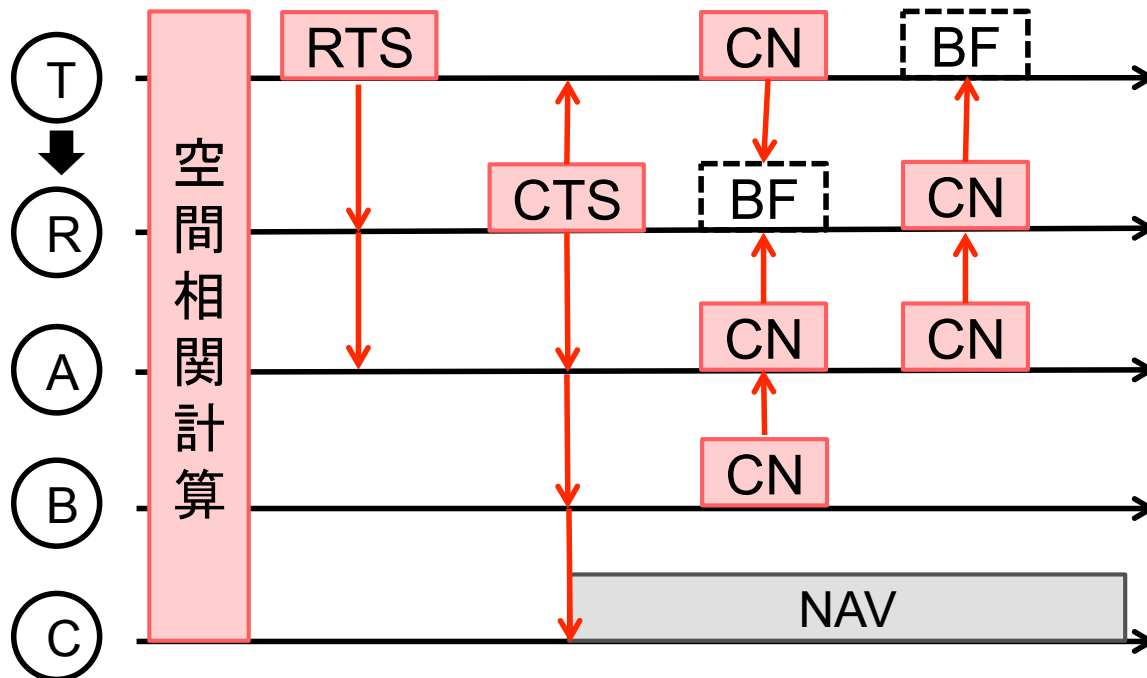
# MACとしての提案手法の流れ

1. 通信開始前に空間相関と初期SIRを計算
2. NAV設定基準に基づき、各周辺端末に対しNAVを設定すべきか否か判断
3. RTS/CTS packetsにNAVを設定する端末の情報を付加
4. NAVを設定しない周辺端末はCN packetsを送信

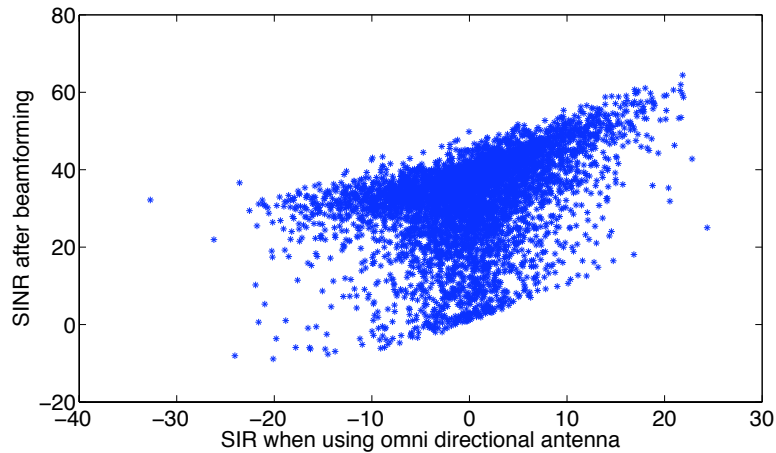


# MACとしての提案手法の流れ

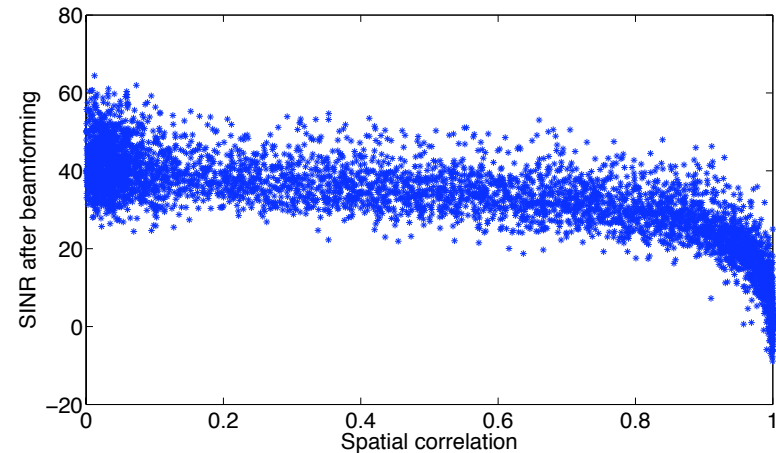
1. 通信開始前に空間相関と初期SIRを計算
2. NAV設定基準に基づき、各周辺端末に対しNAVを設定すべきか否か判断
3. RTS/CTS packetsにNAVを設定する端末の情報を付加
4. NAVを設定しない周辺端末はCN packetsを送信



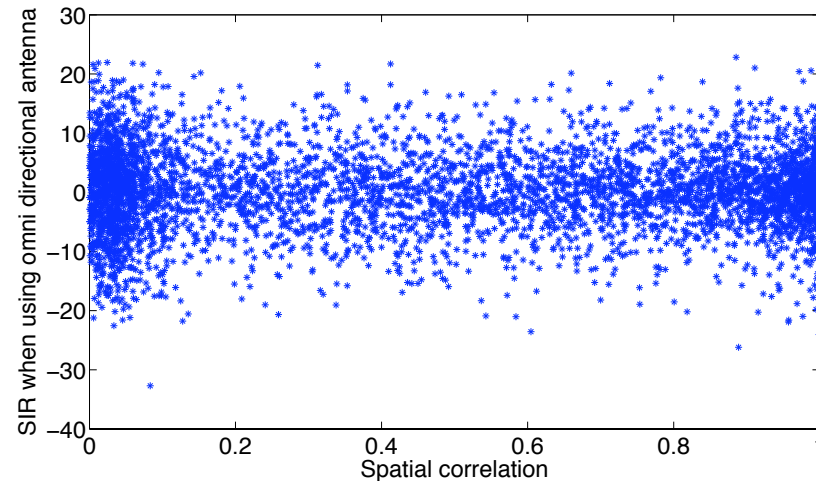
# 各相関係数(シングルパス)



初期SIR 対 出力SINR(相関係数=0.4188)

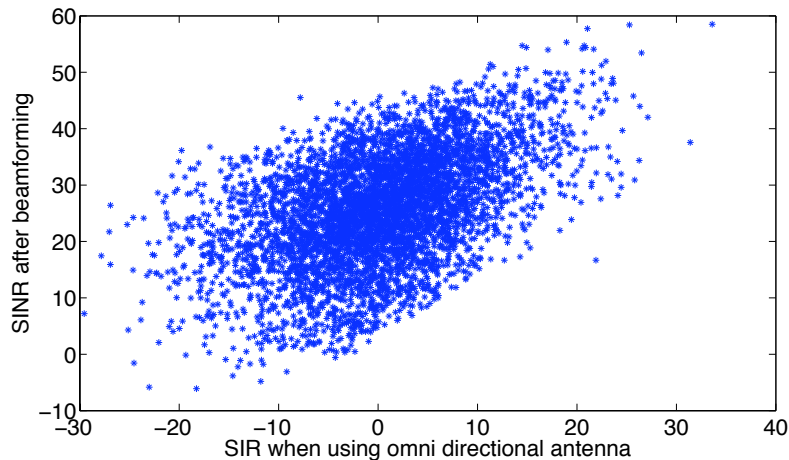


空間相関 対 出力SINR(相関係数=-0.7714)

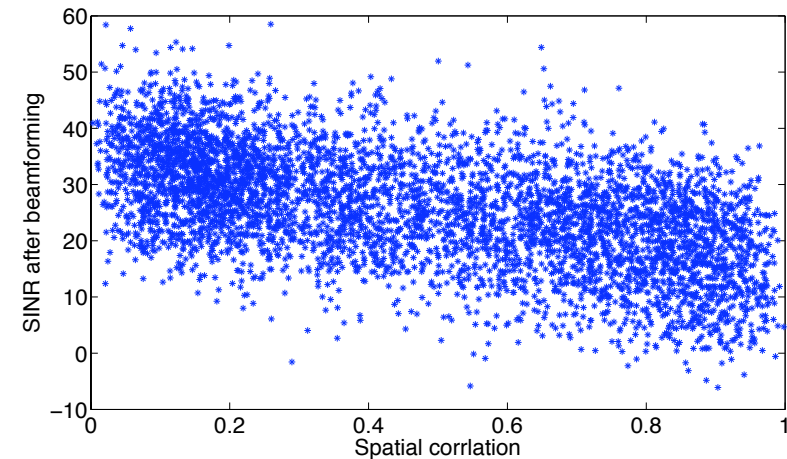


空間相関 対 初期SIR  
(相関係数=-0.0013)

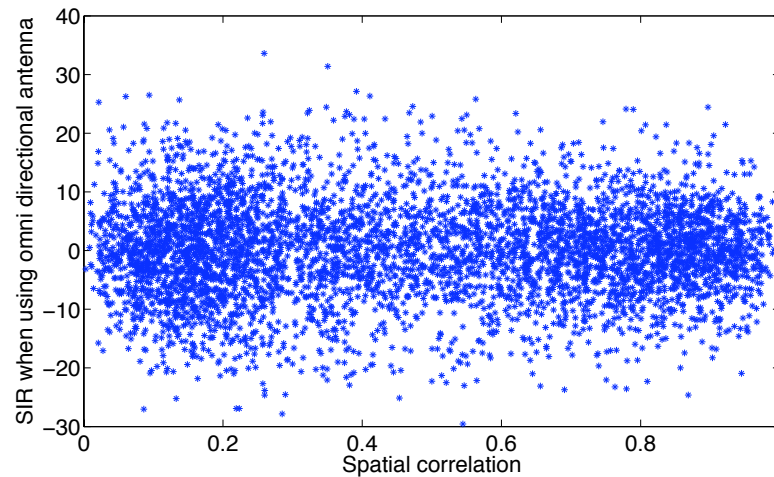
# 各相関係数(マルチパス)



初期SIR 対 出力SINR(相関係数=0.5180)



空間相関 対 出力SINR(相関係数=-0.5563)



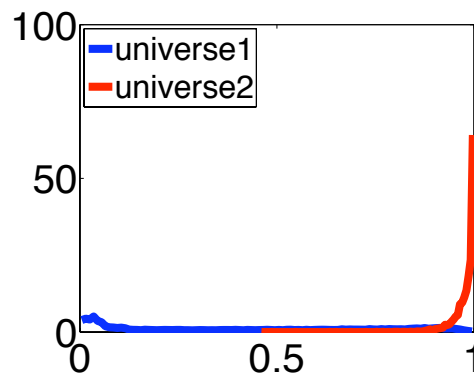
空間相関 対 初期SIR  
(相関係数=-0.01)

# 判別誤差について

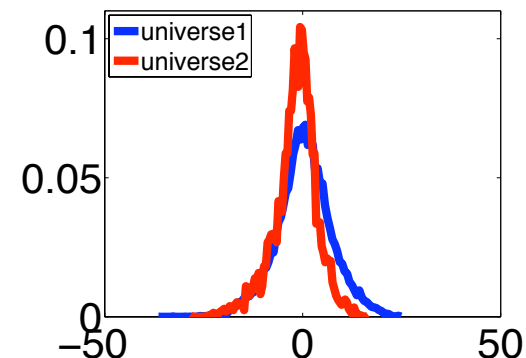
## シングルパス

母集団1の誤判別確率: 27.69%

母集団2の誤判別確率: 0.043%



空間相関

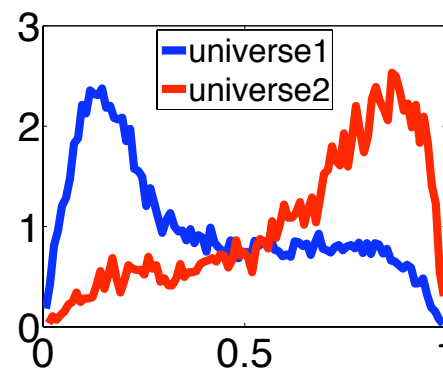


初期SIR

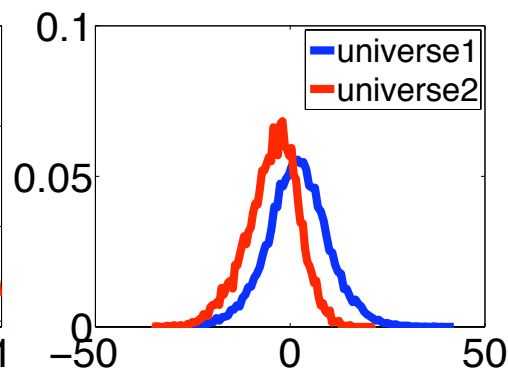
## マルチパス

母集団1の誤判別確率: 25.64%

母集団2の誤判別確率: 17.12%



空間相関



初期SIR



# 変数選択

## シングルパス

空間相関を取り入れた場合のF0値	=12938
初期SIRを取り入れた場合のF0値	=378.89
両方取り入れた場合のF0値	=538.24

## マルチパス

空間相関を取り入れた場合のF0値	=6965.6
初期SIRを取り入れた場合のF0値	=4504.7
両方取り入れた場合のF0値	=5589.1

よって、両変数を用いることは有効

F0・・・解析にその変数を用いるか判断する指標  
2以上あればその変数を取り入れる

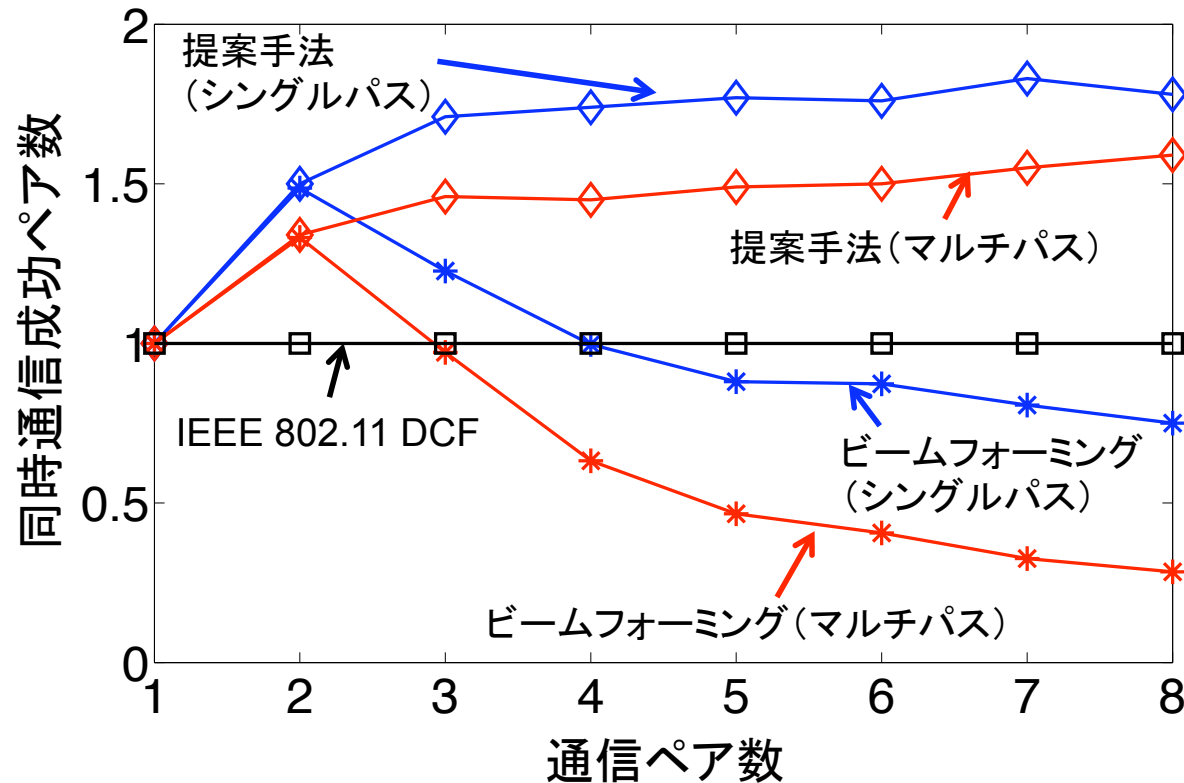
# 重回帰分析によるSINRの推定

真値	推定値	誤差
24.8243	23.8477	0.9766
13.5753	16.8928	3.3175
17.406	22.1472	4.7412
31.1875	20.624	10.5635
15.5564	33.8825	18.3261

寄与率=0.572

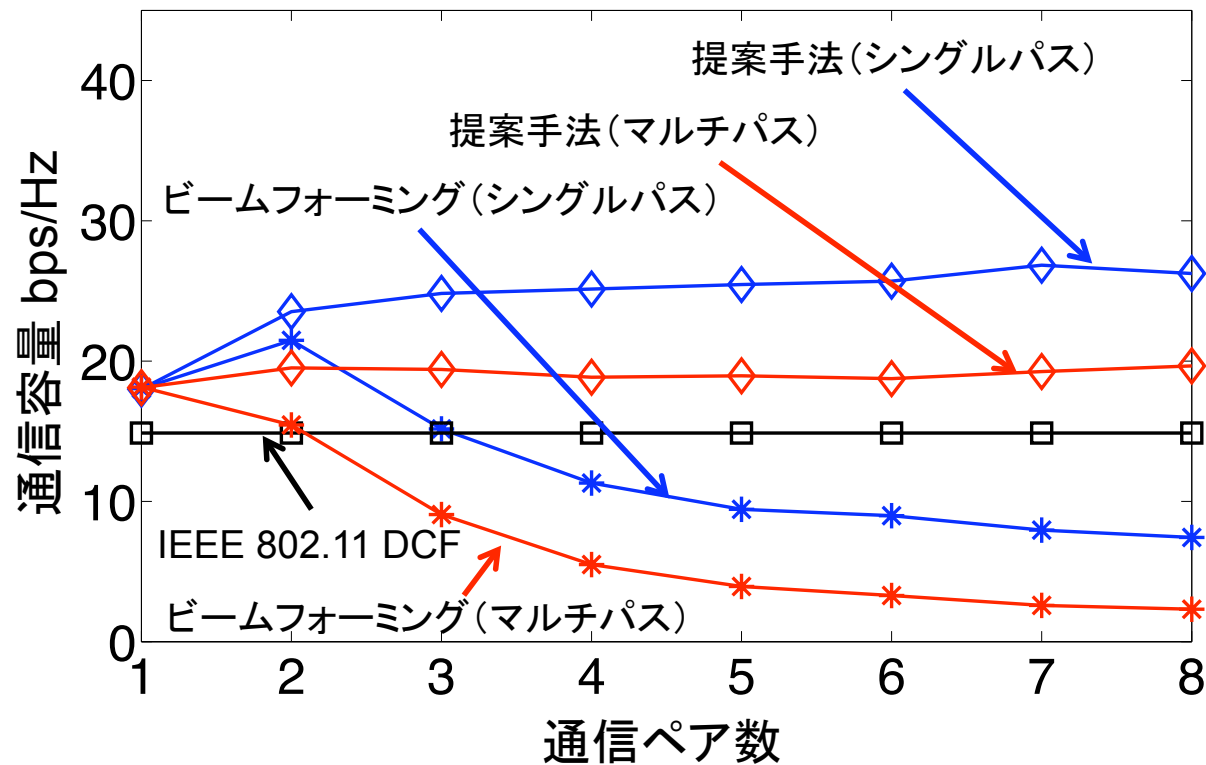
寄与率が小さく誤差が大きいため妥当ではない

# シミュレーション結果 - 同時通信成功ペア数



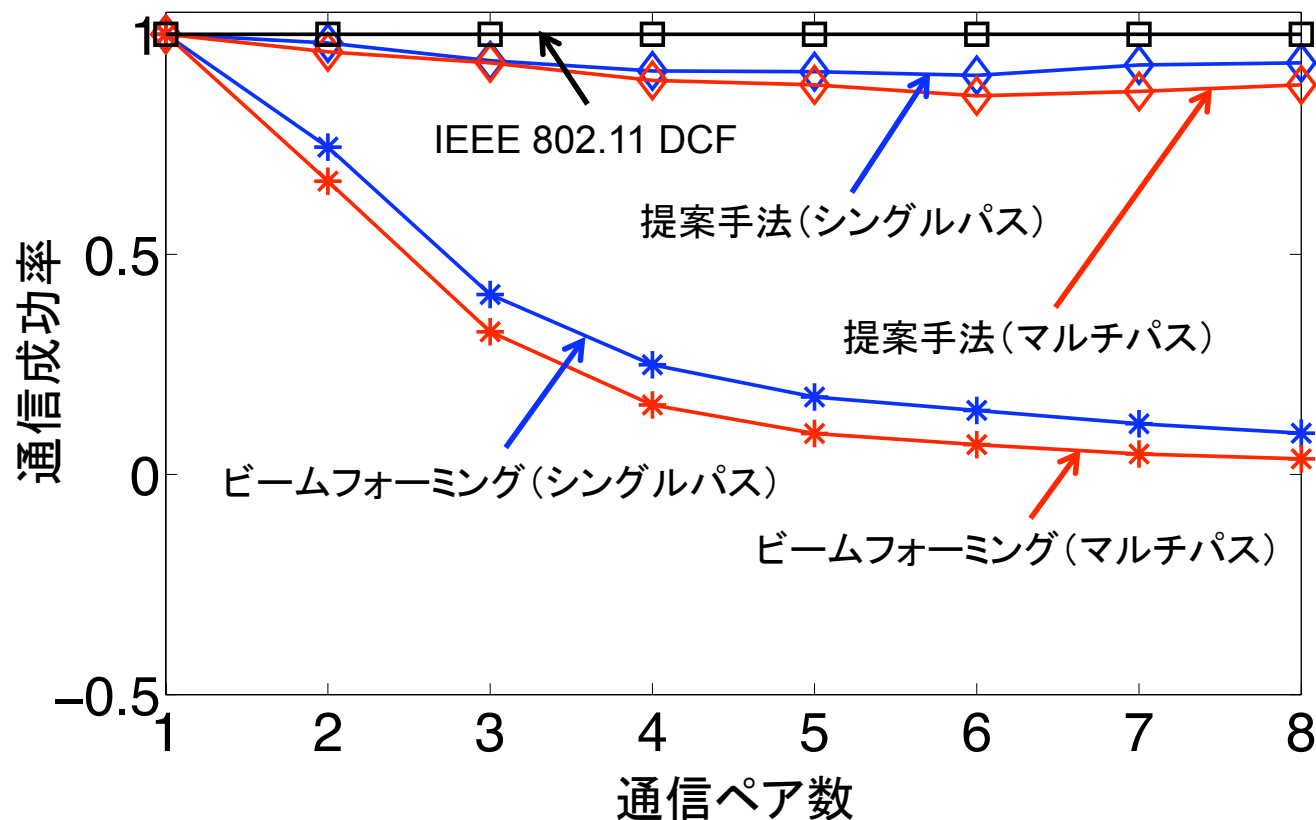
- ビームフォーミングだけでは通信ペアが増えると干渉を軽減しきれなくなり、同時通信成功ペア数減少
- 提案手法を用いることで同時通信ペア数向上  
シングルパス環境: 平均1.8ペア, マルチパス環境: 平均1.6ペア

# シミュレーション結果 – 通信容量



- 複数ペアの同時通信により通信容量が増加していることを確認  
 シングルパス環境: 約1.7倍,    マルチパス環境: 約1.3倍

# シミュレーション結果 - 通信成功率



シングルパス, マルチパス両環境で**80%以上**の通信成功率を実現

# ビームフォーミングMACプロトコルの種類

## 与干渉回避型プロトコル

- 後から通信を開始する端末が既存通信中端末に対してヌル形成
- 受信中端末へのヌル形成方法が課題

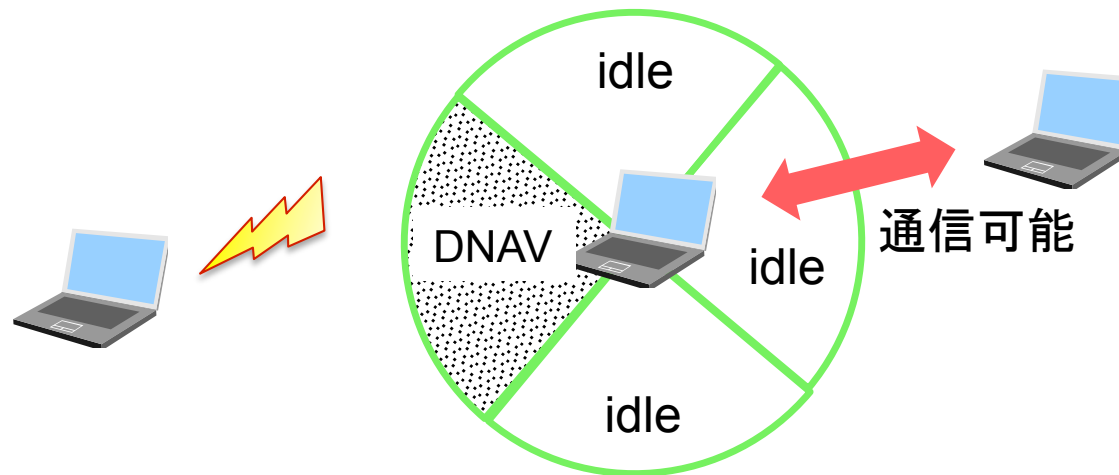
## 被干渉回避型プロトコル

- 先に通信する端末が周辺端末に対してヌル形成
- あらかじめ周辺端末へヌルを形成しておくことで自分の通信を保証

# 可変指向性アンテナを用いた干渉回避

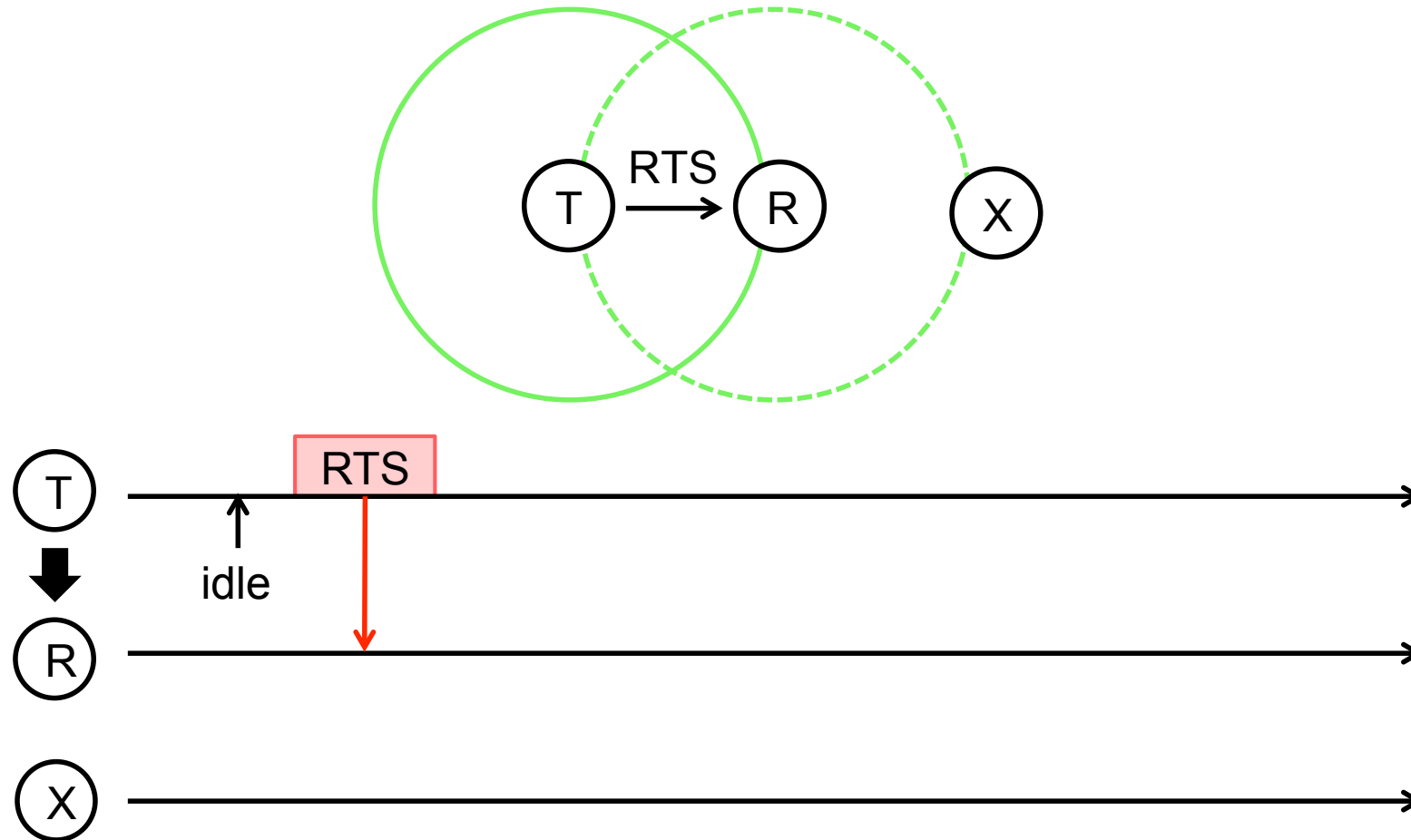
## 指向性仮想キャリアセンス

- ・NAVを拡張したDNAV (Directional NAV)を使用
- ・DNAVによって特定の方向のみ通信を抑制することで空間分割が可能



多くのMACプロトコルでは、理想的なアンテナと指向性ビームを想定  
実際のアンテナではサイドローブによって干渉発生の可能性

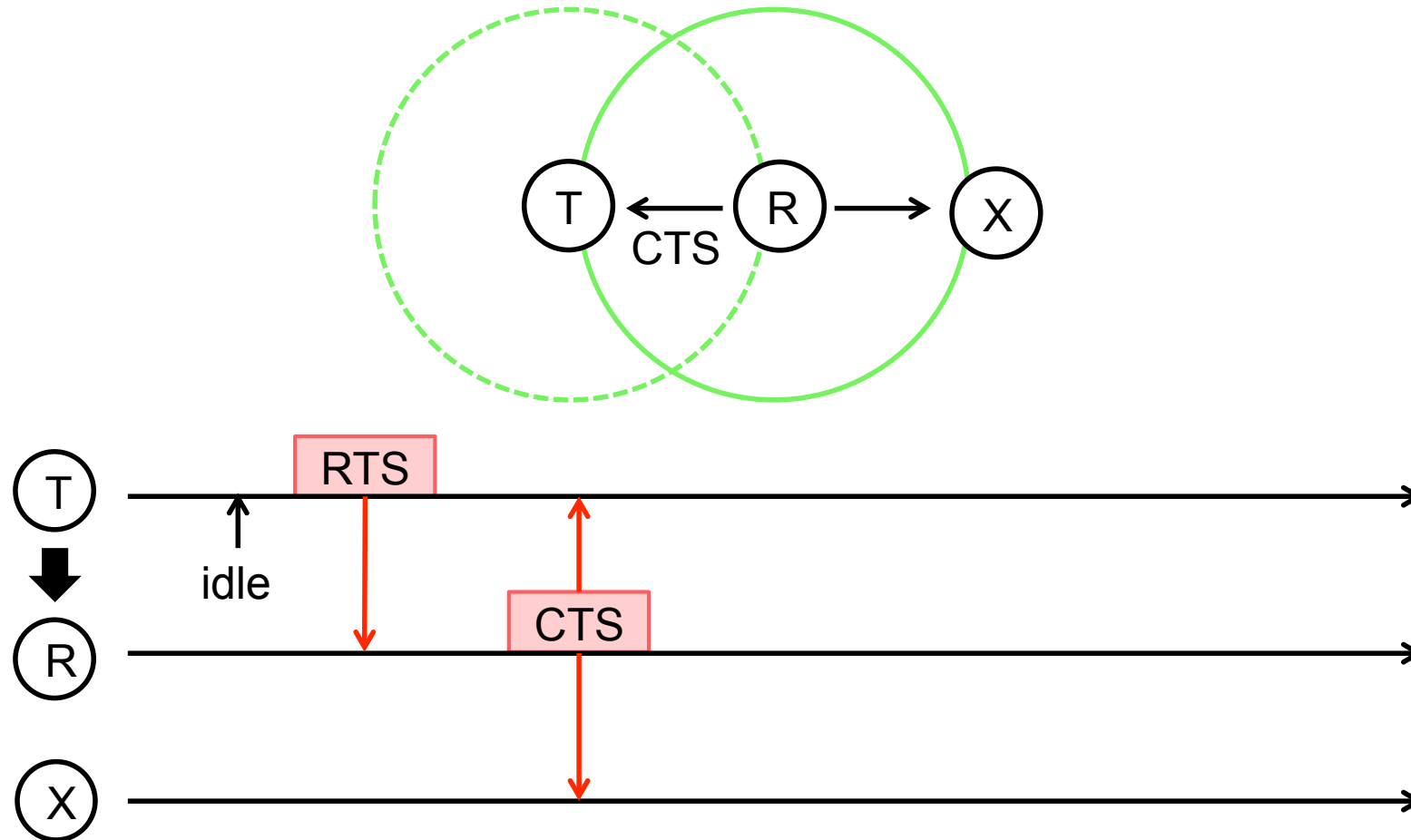
# 背景 -IEEE 802.11 DCF



送信端末はチャネルがアイドル状態であることを確認すると, RTSパケットを送信

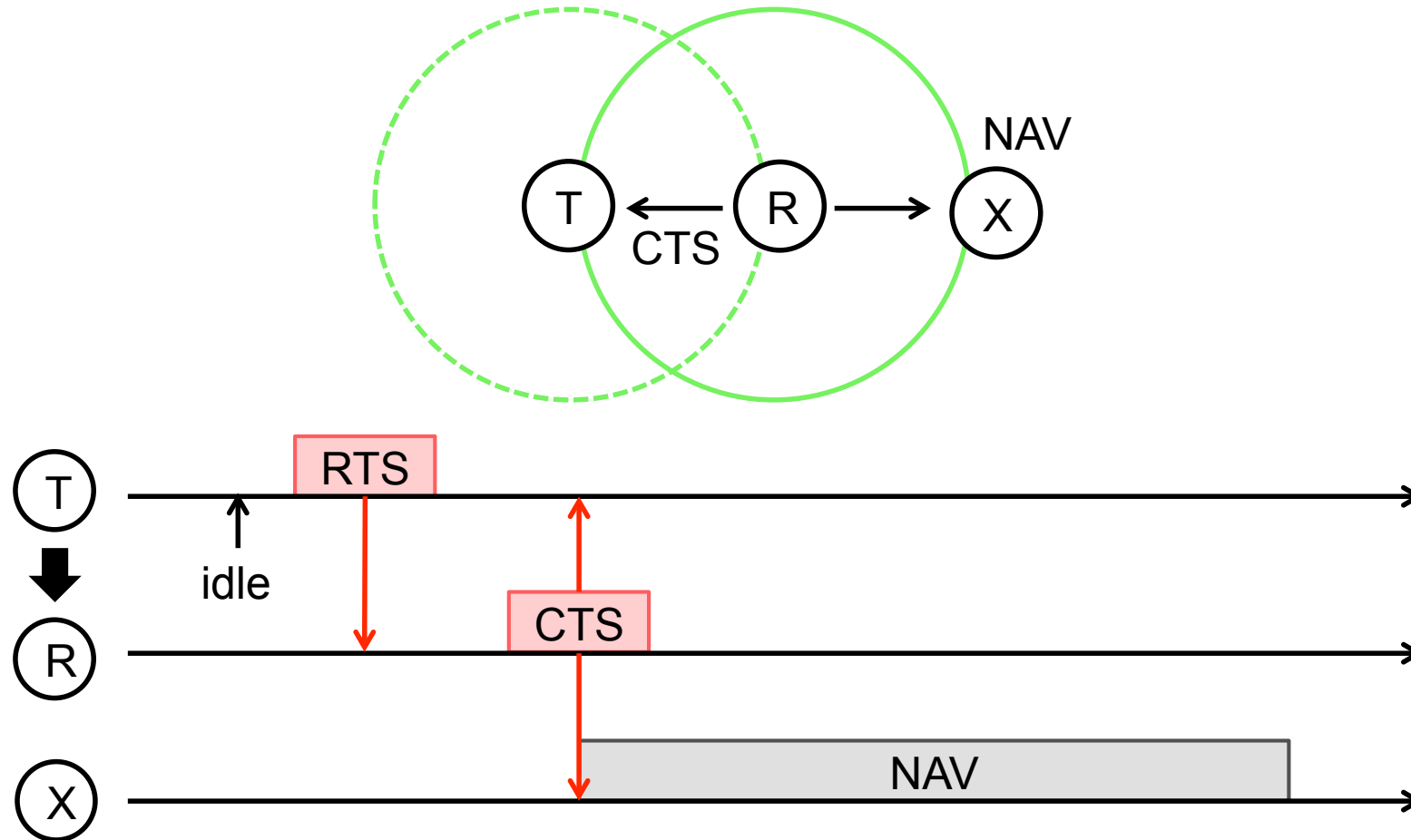


## 背景 -IEEE 802.11 DCF



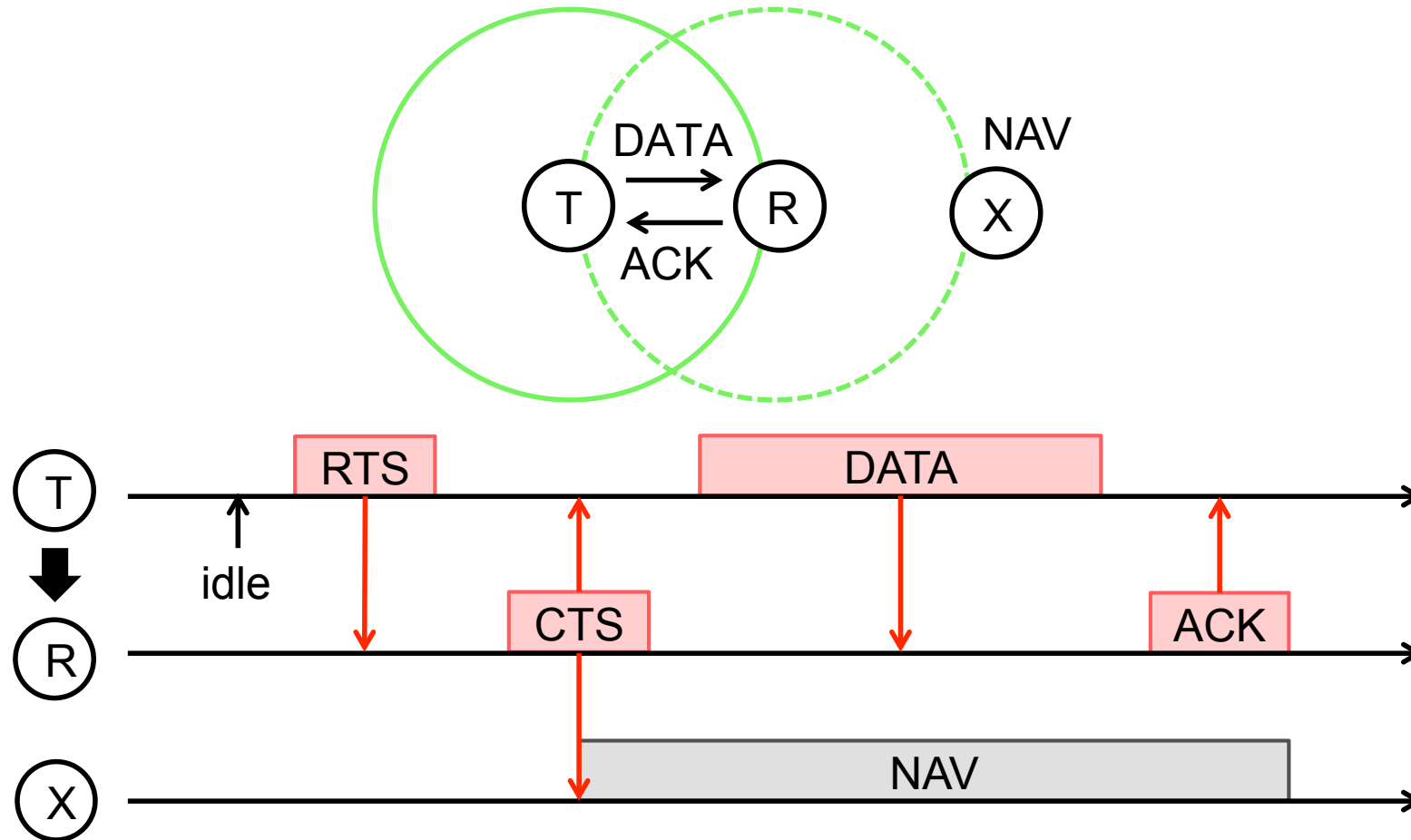
RTSを受信した受信端末はCTSを返信

# 背景 -IEEE 802.11 DCF



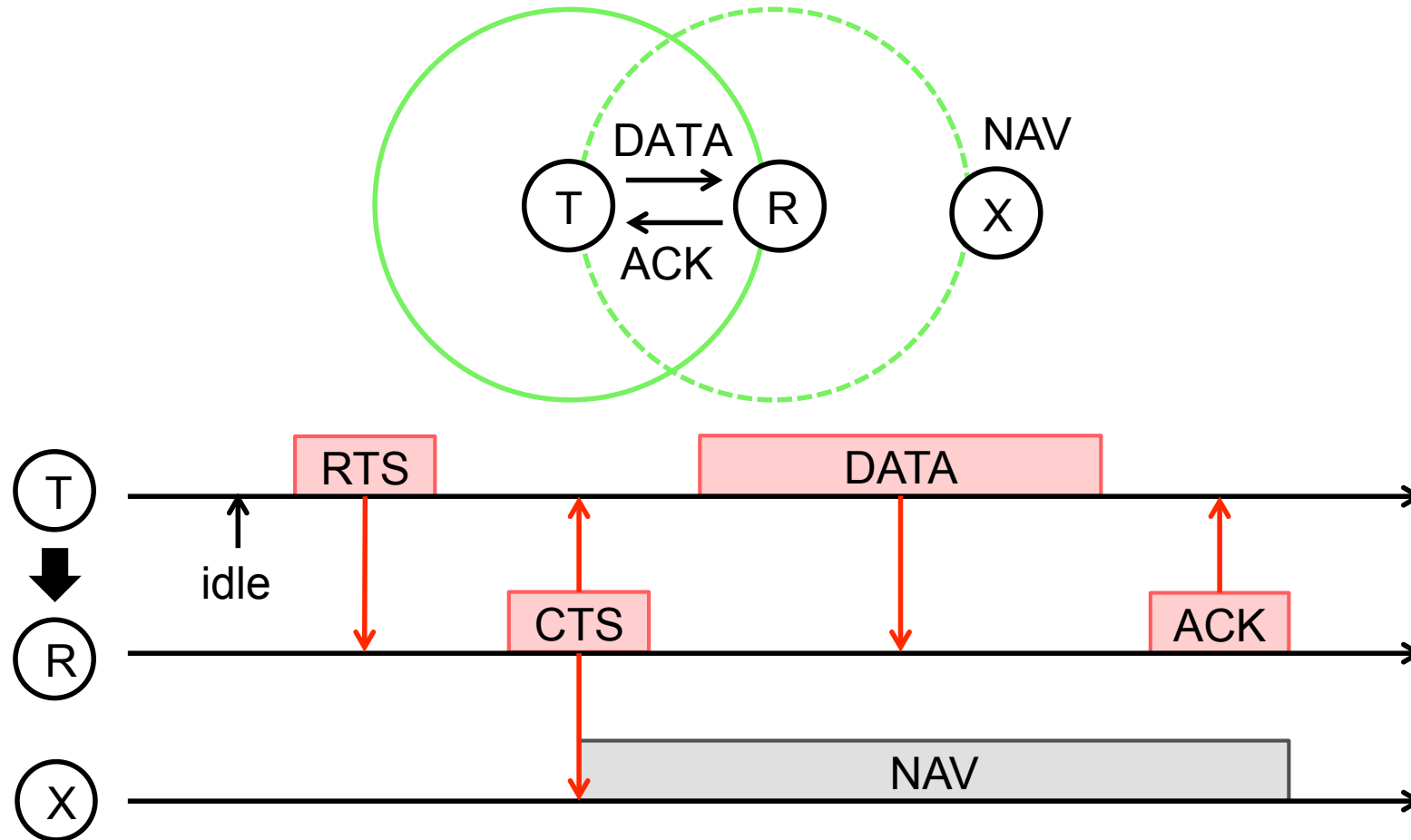
RTSを受信した周辺端末はNAVを設定し通信を抑制

# 背景 -IEEE 802.11 DCF



送信端末はDATAの送信を開始

# 背景 -IEEE 802.11 DCF



欠点: 全方位性アンテナを用いていることによる過剰なNAV設定