北海道大学

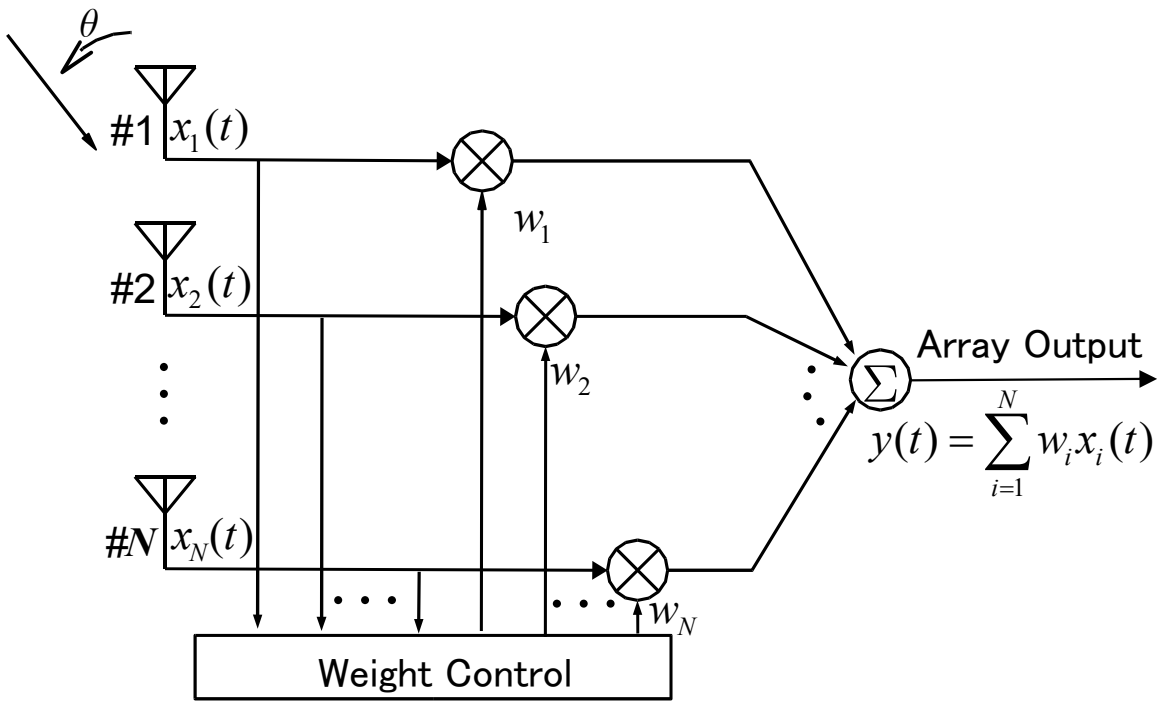
移動通信における信号処理アンテナの進展
― アダプティブアンテナからMIMOシステムへ ―

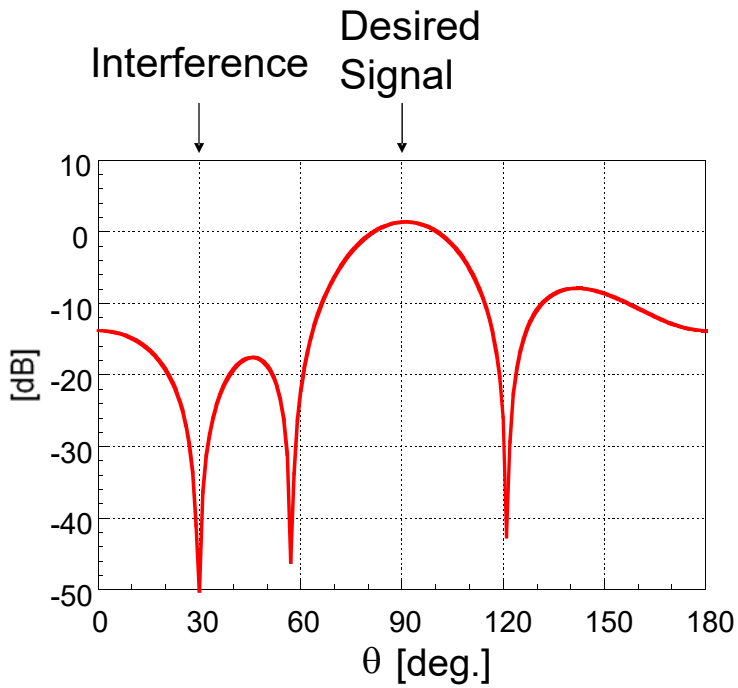
小川恭孝

A・P研「アンテナの歴史」委員会 特別講演／北海道大学／2018.07.19

小川，西村，大鐘，“移動通信における信号処理アンテナの進展，”信学論 B, vol. J100-B, no. 9, pp. 658-672, Sept. 2017.

アダプティブアンテナの基本概念





初期のアダプティブアンテナの研究

1950年代

レトロディレクティブ・アレー
セルフ・スティアリング・アレー
} ビーム形成

1960年代

サイドローブキャンセラ （GE）
MSNアダプティブアレー （GE）
MMSEアダプティブアンテナ（Stanford Univ. ）
ジャミングの抑圧（軍用）
} ヌル形成による干渉抑圧

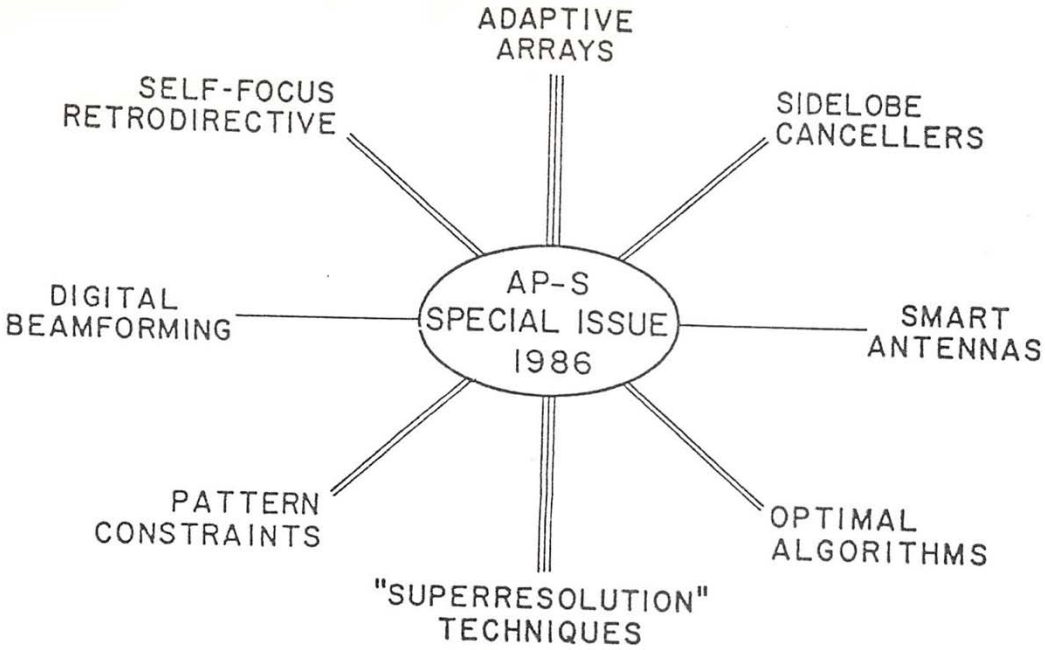
1970年代

高分解の到来方向推定の登場

IEEE Trans. Antennas Propagation Special Issues (1)

IEEE APS, Newsletter, April 1984 / Call for Papers

IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter, April 1984



IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION

Call for Papers

A special issue devoted to the rapidly expanding new technology area of adaptive processing antenna systems is planned for publication in January 1986. Contributions are solicited within the topic areas given in the diagram above, and may include theory/analysis, algorithms/techniques

Paper Deadline Date

March 31, 1985

IEEE Trans. Antennas Propagation Special Issues (2)

Active and Adaptive Antennas, March 1964

- Retrodirective and self-steering array systems

Adaptive Antennas, Sept. 1976

- Adaptive interference nulling

Adaptive Processing Antenna Systems, March 1986

- High-resolution spatial spectrum estimation
- Adaptive look-direction constraints
- Adaptive algorithms/techniques
- Applications oriented contributions

IEEE Trans. Antennas Propagation Special Issues (3)

Introduction, vol.AP-34, no.3, March 1986

Guest Editor W.F. Gabriel

In summary, adaptive processing antenna systems have undergone enormous growth and progress in this past decade. Coupled with the phenomenal advances in digital processing [12], the future looks very bright indeed. Implementation of the more sophisticated estimation algorithms is becoming quite practical, and so-called "digital beamforming" systems are under serious consideration as analog-to-digital (A/D) converter performance steadily improves.

- ディジタル処理の驚異的進展 → 未来は明るい
- 高度な（到来方向）推定が現実的に
- ディジタルビームフォーミングの真剣な検討

  ∵ A/D変換器の特性が着実に改善

アレー信号処理の将来を見据えていた

アダプティブアンテナへの期待

電子通信学会誌　1983年3月号

技術展望B

無線通信はいかにしてフェージングを克服できるか

—変貌する対策技術の本質と動向—

池上　文夫

池上文夫：正員　京都大学工学部電子工学教室

アダプティブアレーアンテナ　　アレーアンテナの振幅，位相を制御し指向性合成を行うもので，現在は妨害波除去の研究が行われているが，フェージング対策にも利用の可能性がある．

移動通信への応用

ディジタル移動通信研究当初

・長遅延マルチパスによる「伝搬歪み」が深刻な問題

「16kbpsの伝送は可能との見通しを得ているが，256kbpsについてはほとんど絶望的….」

・時間領域等化技術は遅延時間差が長いほど複雑

広帯域伝送ほど演算量が増える

→ 空間領域信号処理（アダプティブアンテナ）

アダプティブアンテナによる遅延波の抑圧

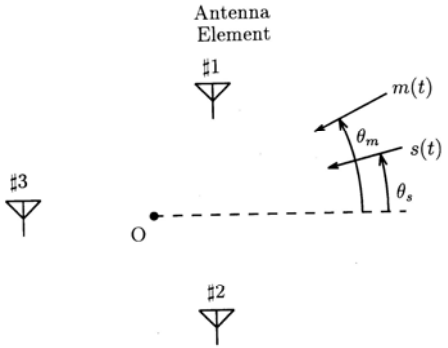


Fig. 2 Array configuration and multipath environment.

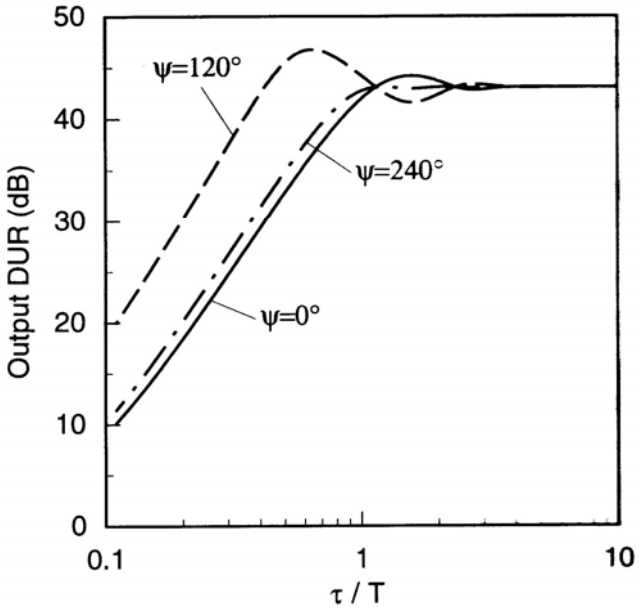


Fig. 3 Output DUR versus τ/T.
$\theta_s = 0°$, $\theta_m = 30°$, $S_i/N_i = M_i/N_i = 20$ dB.

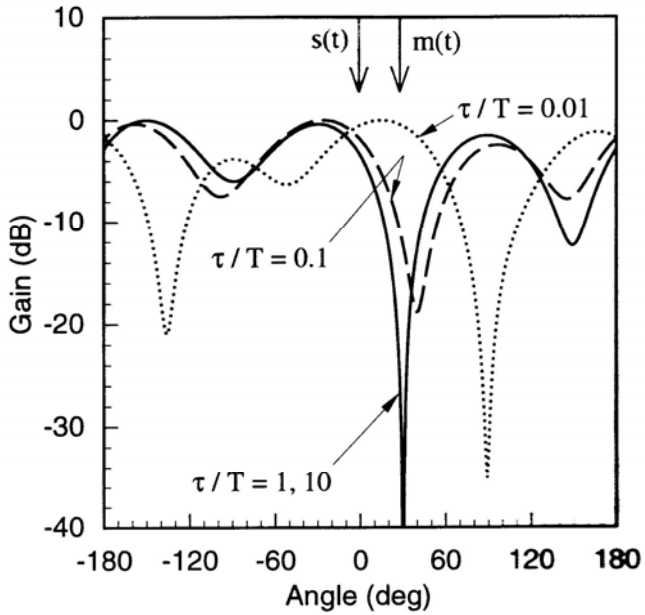


Fig. 4 Array pattern.
$\theta_s = 0°$, $\theta_m = 30°$, $S_i/N_i = M_i/N_i = 20$ dB, $\Psi = 0°$

遅延時間差が長いほど，抑圧効果が大きい

→ 高速ディジタル伝送に有効

Y. Ogawa, M. Ohmiya, and K. Itoh, “Fading Equalization Using an Adaptive Antenna for High-Speed Digital Mobile Communications,” Proc. ISAP'89, vol. 4, 4A2-3, pp. 857-860, Aug. 1989.

通信総合研究所（当時）による都内での実験（1）

TABLE I
SPECIFICATIONS OF THE SYSTEM

Item	Specification
Radio Channel	
Center frequency	1431.5 MHz
TX power	37 dBm
Modulation	GMSK ($B_bT = 0.25$)
Modulation bit rate	256 kbps
Channel Access	
Multiplexing	TDM
Channel bit rate	8 kbps
Number of slots	24
Slot length	512 bits
Adaptive Array	
Number of elements	4
Update algorithm	CMA
Processor	TI320C25
Sampling frequency	1 MHz

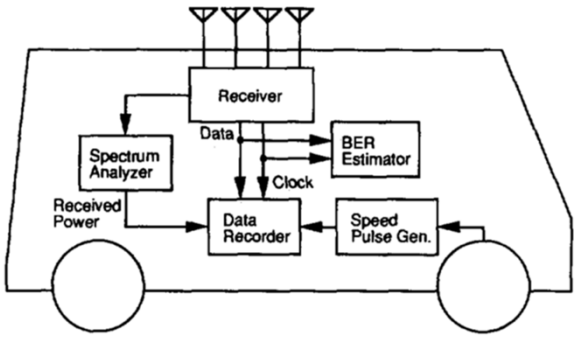


Fig. 1. Experimental system.

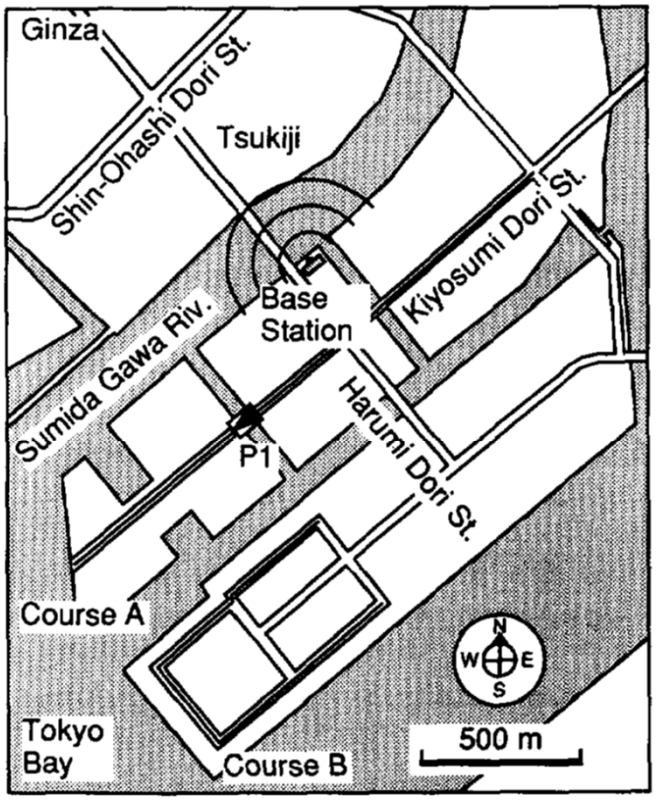


Fig. 4. Measurement area.

T. Ohgane, et al., “BER performance of CMA adaptive array for high-speed GMSK mobile communication —A description of measurements in central Tokyo,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.42, no.4, pp.484–490, Nov. 1993.

通信総合研究所（当時）による都内での実験（2）

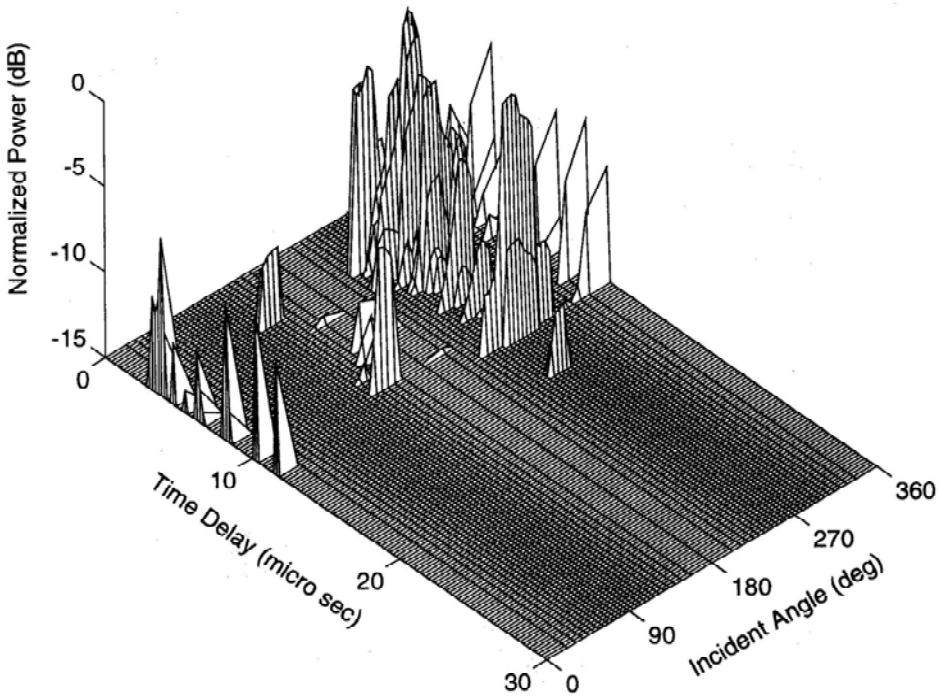


Fig. 7 Delay-angle spectra at P1.
アダプティブアンテナ使用せず

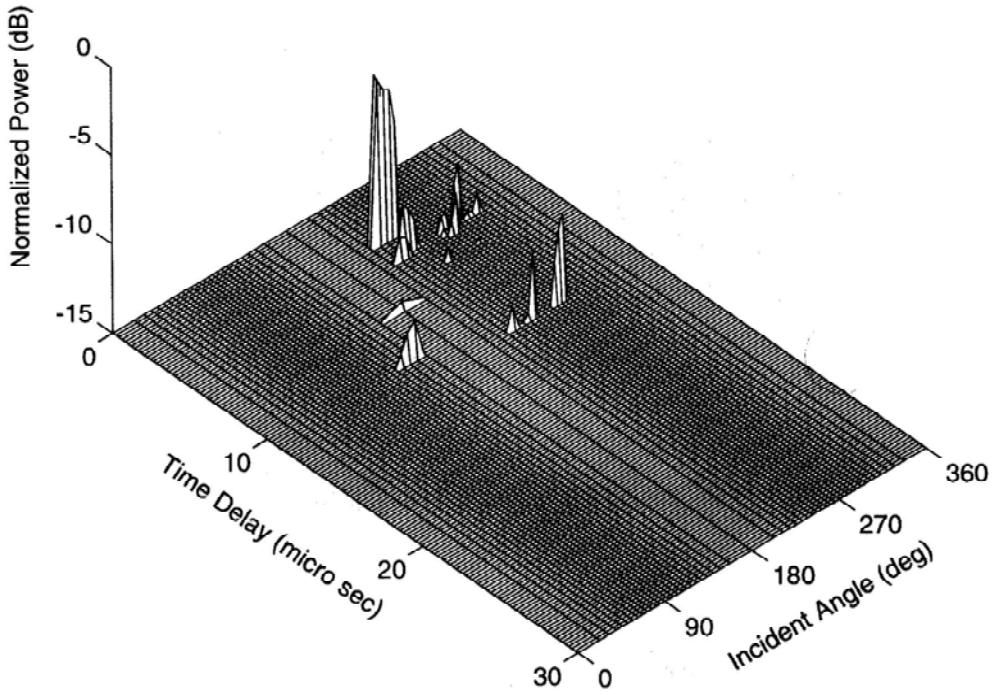
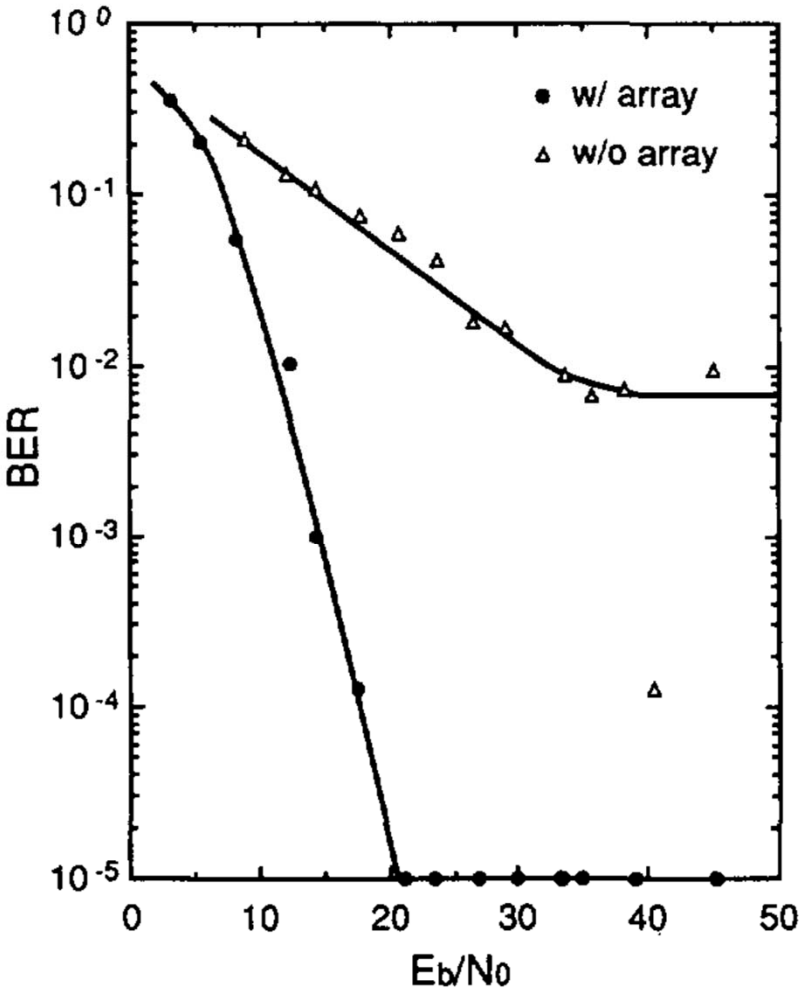


Fig. 9 Delay-angle spectra at P1 after multiplying by the array pattern.
アダプティブアンテナ使用

T. Ohgane, et al., “BER performance of CMA adaptive array for high-speed GMSK mobile communication —A description of measurements in central Tokyo,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.42, no.4, pp.484–490, Nov. 1993.

通信総合研究所（当時）による都内での実験（3）



(a)

Fig. 13. **The BER performance with optimal array parameters compared with the single antenna system. (a) Course A. (b) Course B.**

T. Ohgane, et al., “BER performance of CMA adaptive array for high-speed GMSK mobile communication —A description of measurements in central Tokyo,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.42, no.4, pp.484–490, Nov. 1993.

アダプティブアンテナの移動通信への応用(初期)

北大グループ

小川，大宮，伊藤，“LMSアダプティブアンテナを用いた相関性妨害波の抑圧，−アダプティブアンテナのフェージング軽減への応用−，”信学技報，A・P83-54, Aug. 1983.

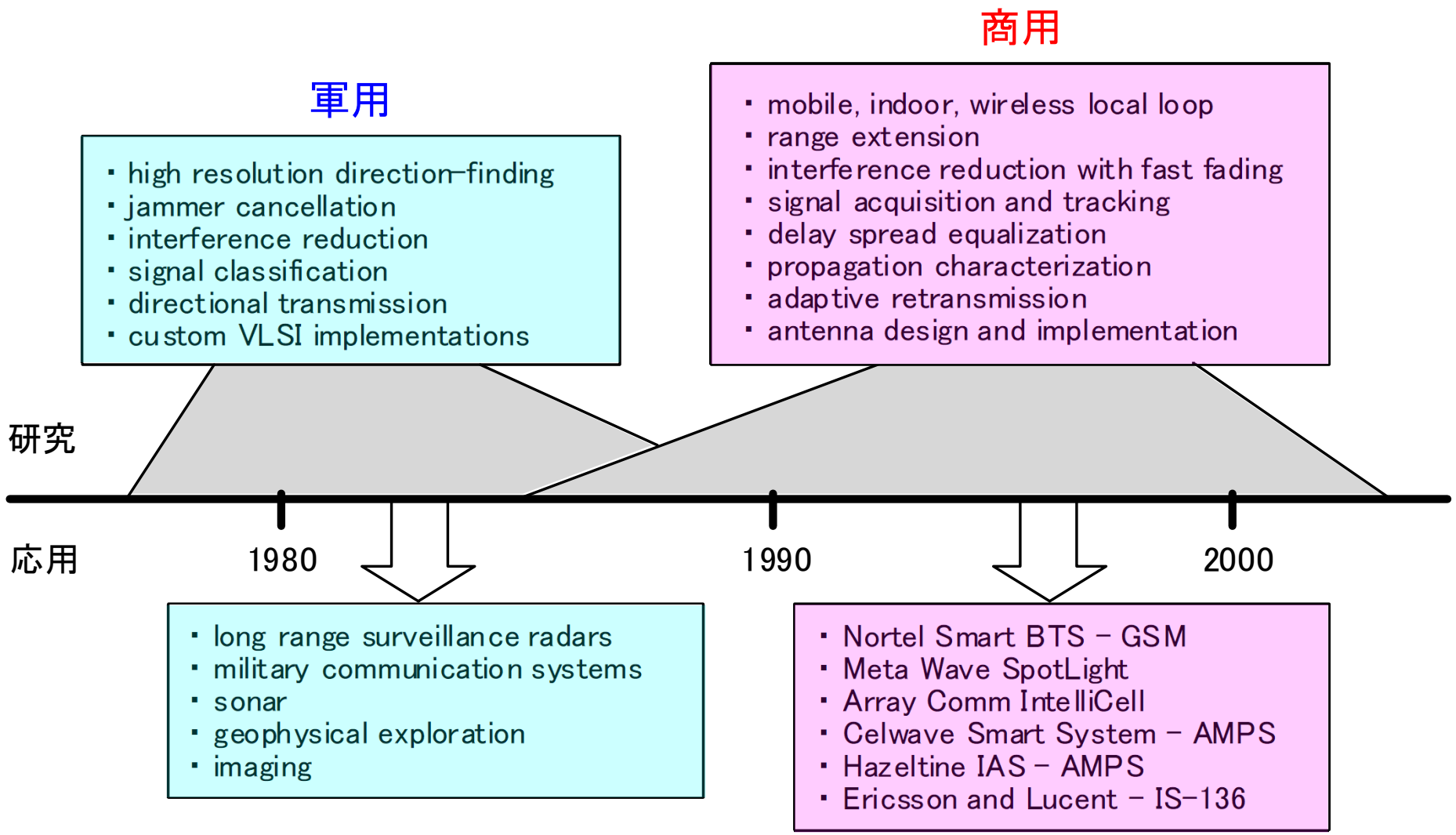
ヨーロッパにおけるプロジェクト

TSUNAMI (Technology in Smart antennas for the UNiversal Advanced Mobile Infrastructure) (1994.1～1995.12)

- Delay spread reduction
- Range extension
- Interference reduction
  - Lower cell repeat pattern
  - Same channel reuse (SDMA)

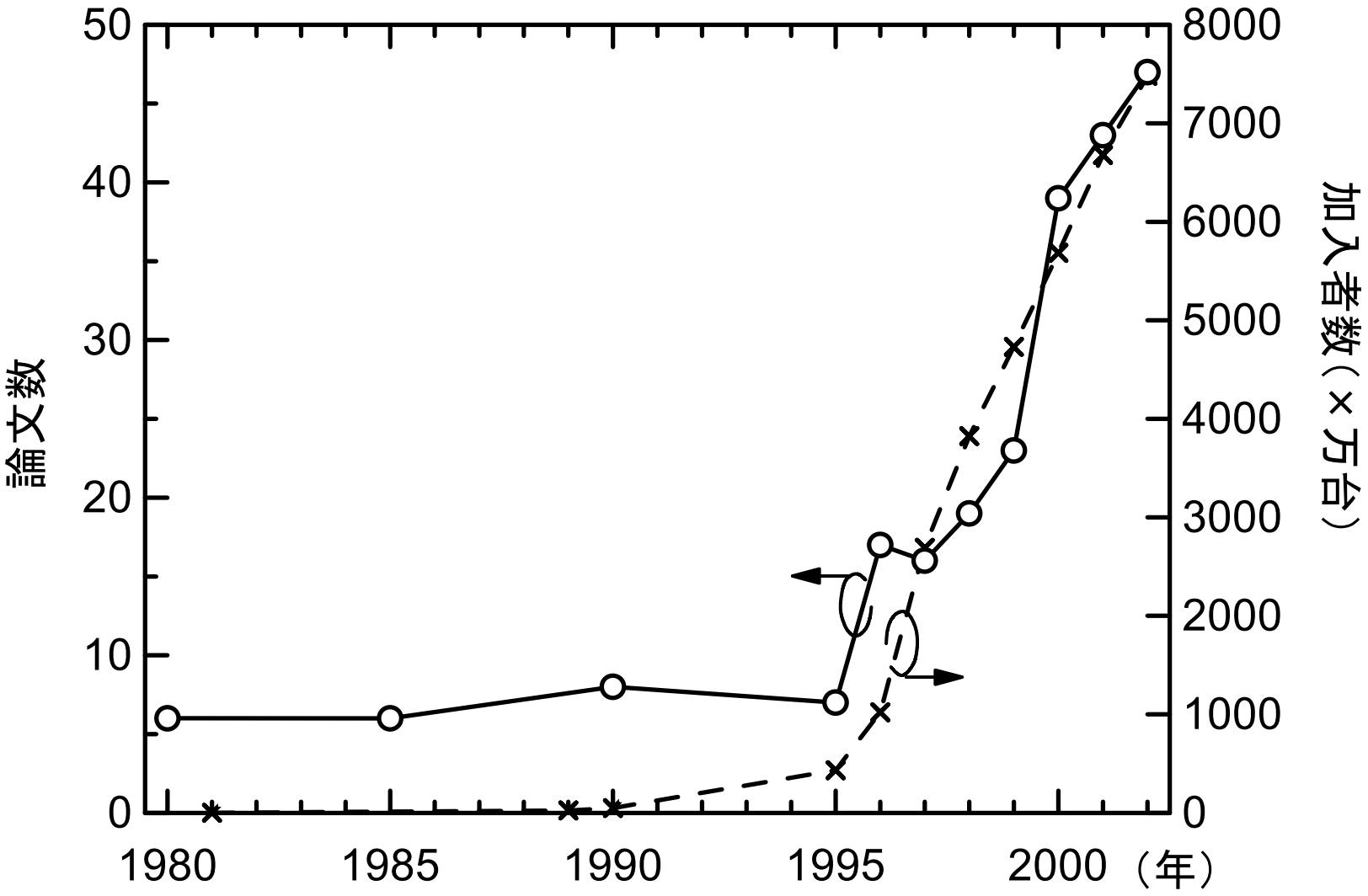
University of Bristol, Aalborg University, Alcatel SEL, Hagenuk GMBH, …

米国におけるアダプティブアンテナの研究



J. H. Winters, “Smart antennas for wireless systems,” IEEE VTC2000-Fall Tutorial, Sept. 2000.

総合大会におけるアダプティブアンテナの論文数と移動通信加入者数



他セル干渉抑圧による周波数有効利用（PHS）

東京都内でのフィールド試験

Figure 3 BS allocation of field test

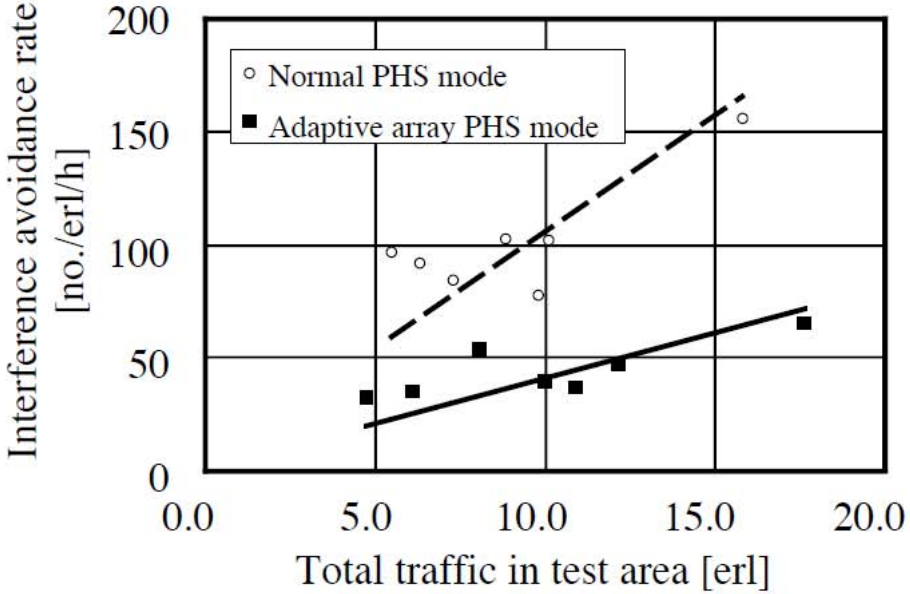
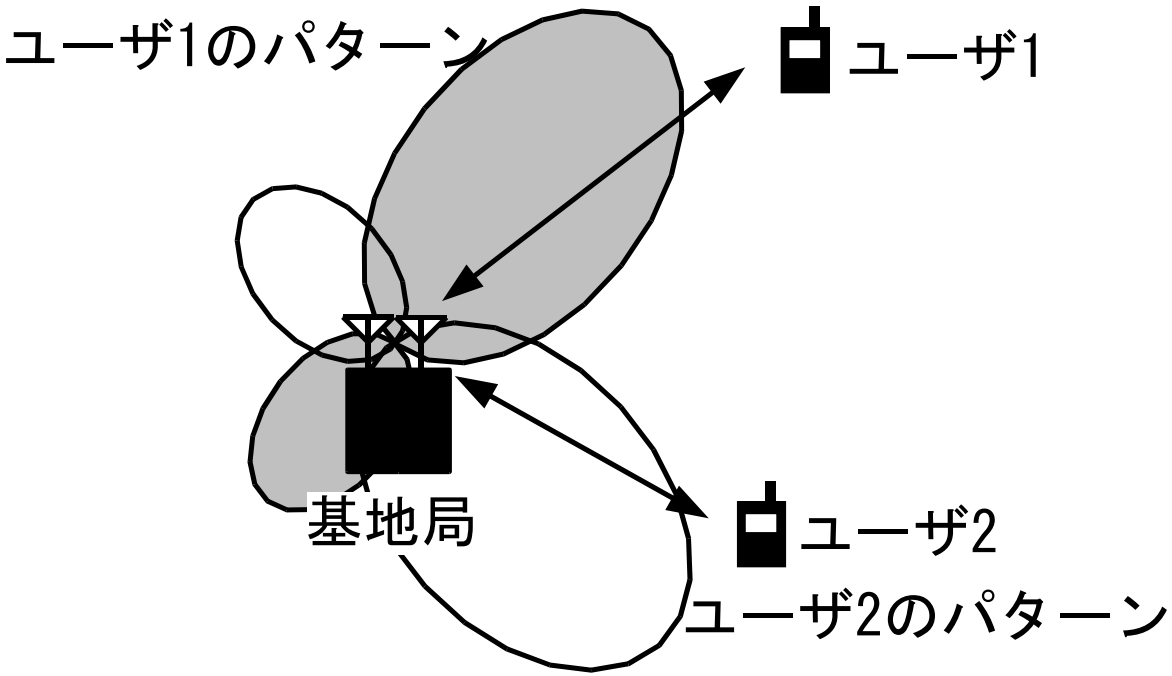


Figure 4 Results of field test

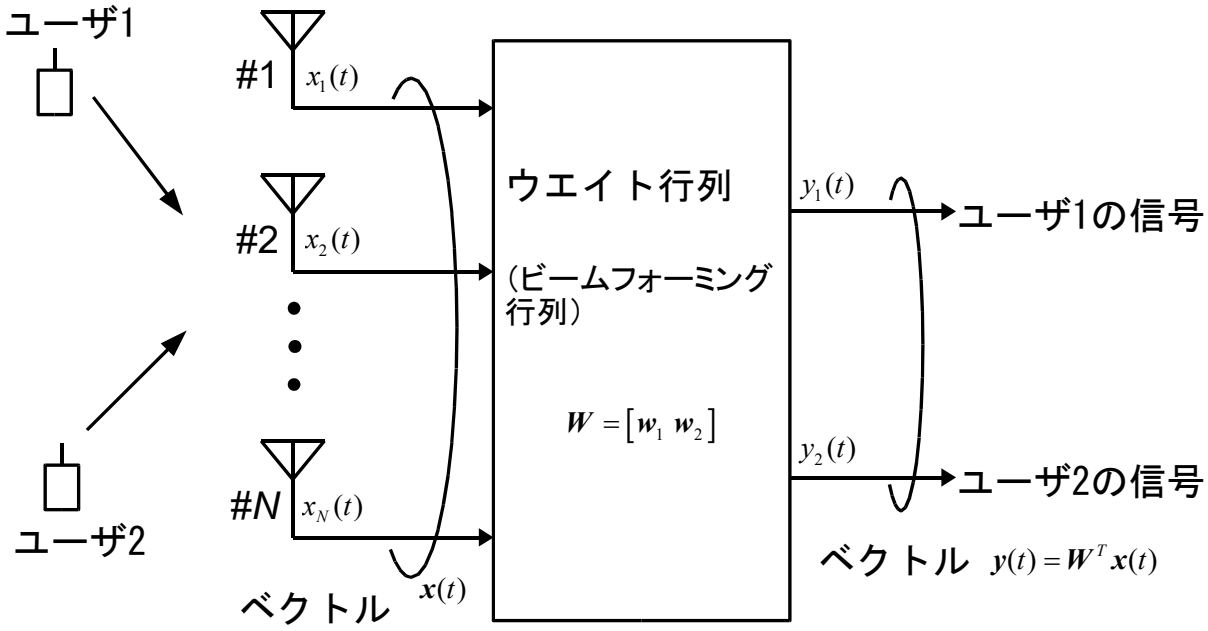
Y. Doi, S. Nakao, Y. Tanaka, T. Ohgane, Y. Ogawa, "A review of the applications and the new trends — Base station of cellular system and consumer product —," Proc. JINA2004, pp. 263–267, Nov. 2004.

マルチビームアダプティブアンテナによるSDMA

・複数の希望波を分離して送受信
・同一セル内の同一チャネルに複数ユーザ収容可能
・空間分割多元接続　SDMA (Space Division Multiple Access)



2ユーザ分離の例



$$\boldsymbol{y}(t)=\left[y_1(t)\ \ y_2(t)\right]^T \quad \text{（出力ベクトル）}$$

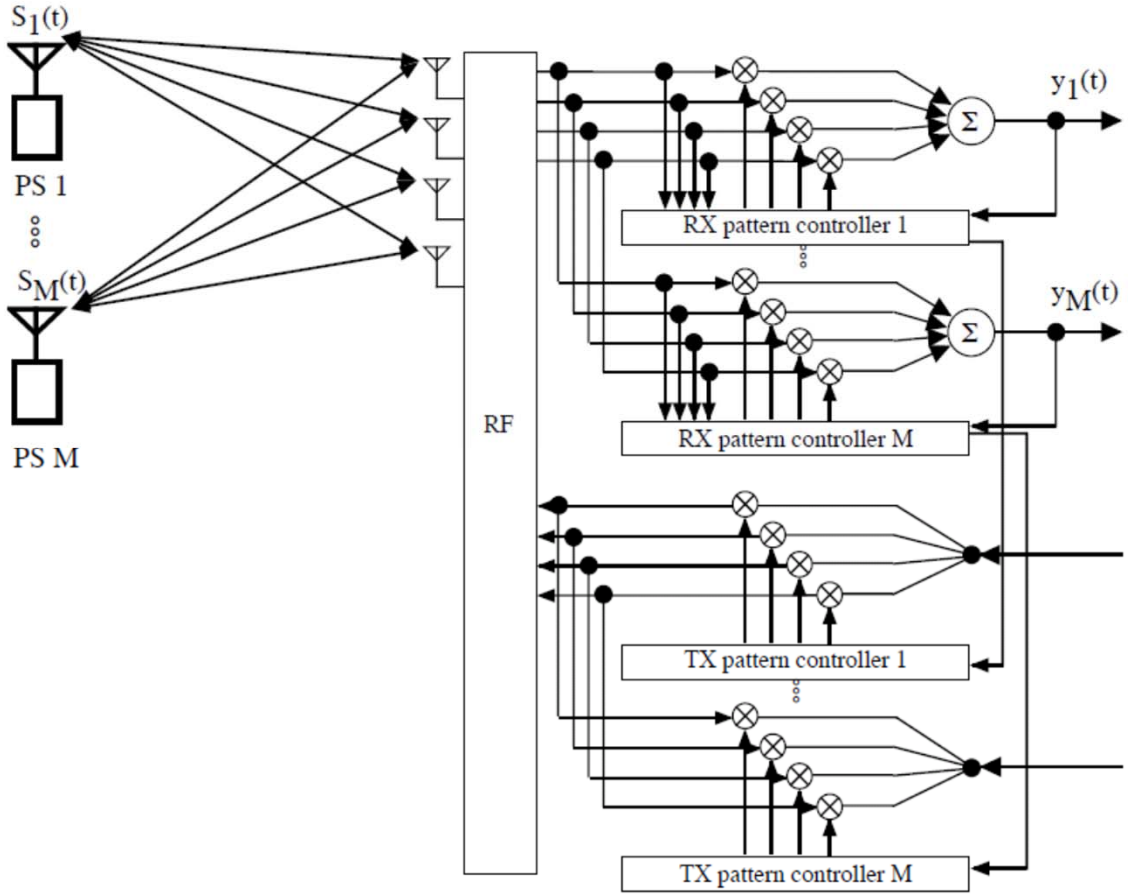
$$=\boldsymbol{W}^T\boldsymbol{x}(t)$$

$$\boldsymbol{W}=\left[\boldsymbol{w}_1\ \boldsymbol{w}_2\right] \quad \text{（ウエイト行列）}$$

SDMAマルチビームアダプティブアンテナ

・端末には干渉抑圧機能なし

・基地局アダプティブアンテナで上下回線の干渉除去

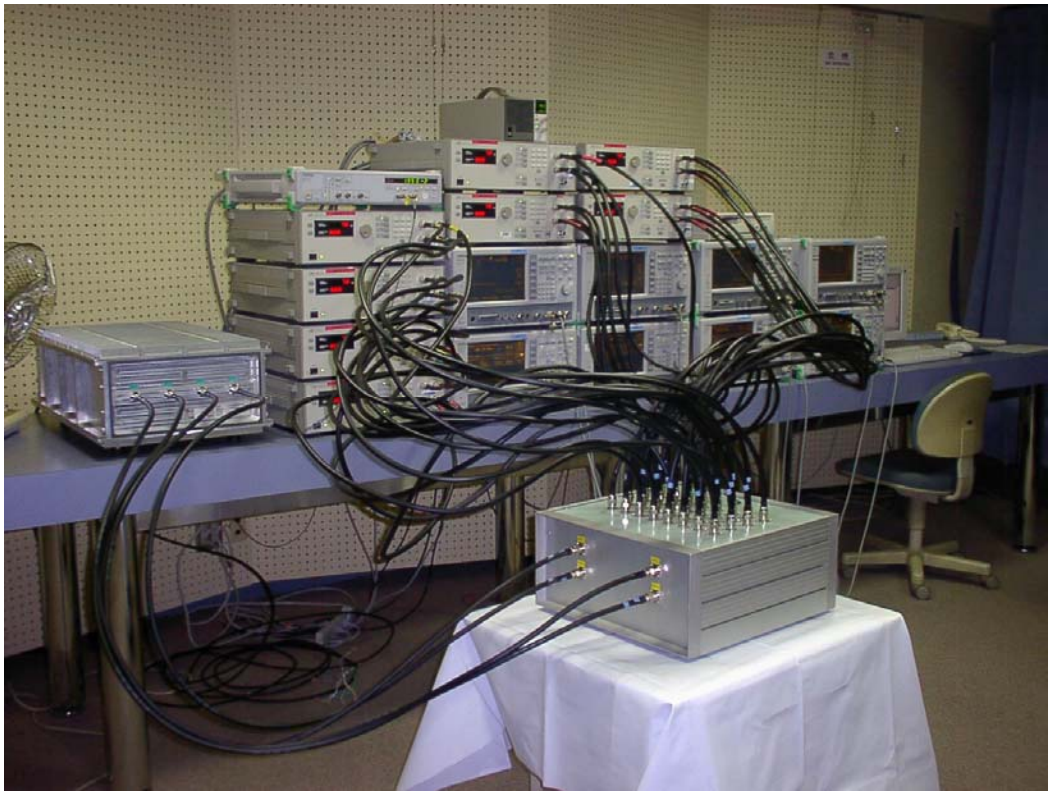


ARIBにおける調査検討会

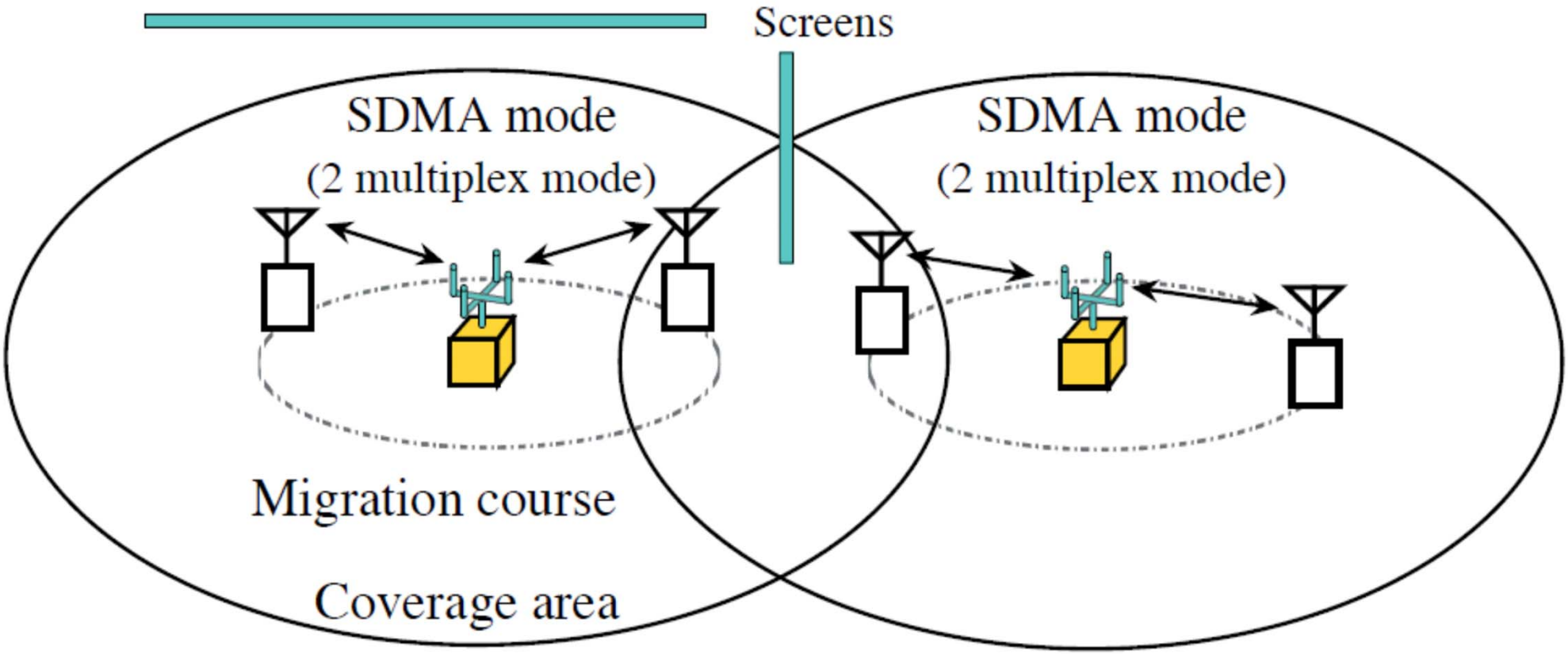
平成12年度～平成13年度

PDMA無線通信技術に関する調査検討会

PHSへのSDMAの適用

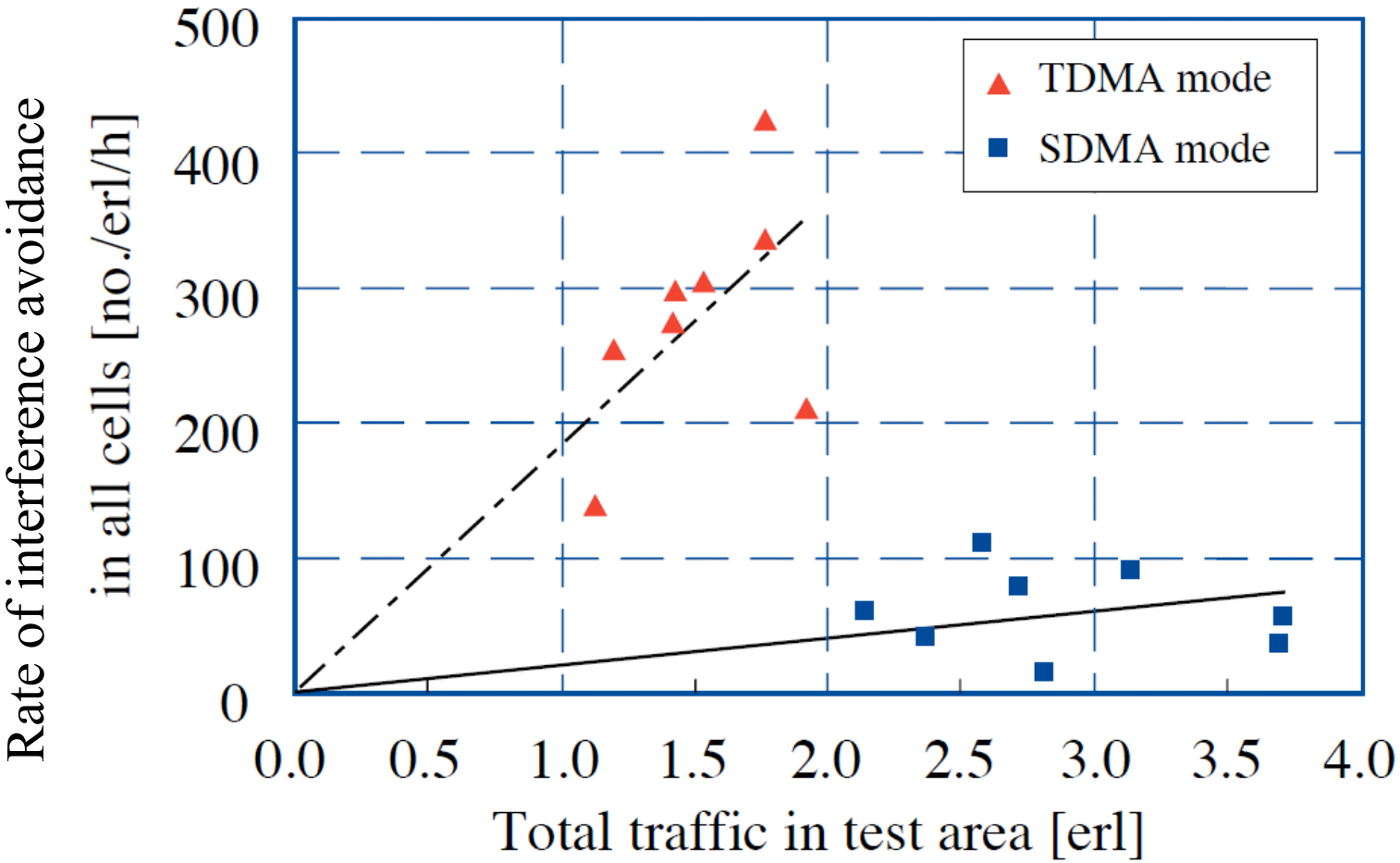


SDMAのテストフィールド



Y. Doi, J. Kitakado, T. Ito, T. Miyata, S. Nakao, T. Ohgane, and Y. Ogawa, “Development and evaluation of the SDMA test bed for PHS in the field,” IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, no.12, pp.3433–3440, Dec. 2003.

ARIB調査検討会の屋外試験結果

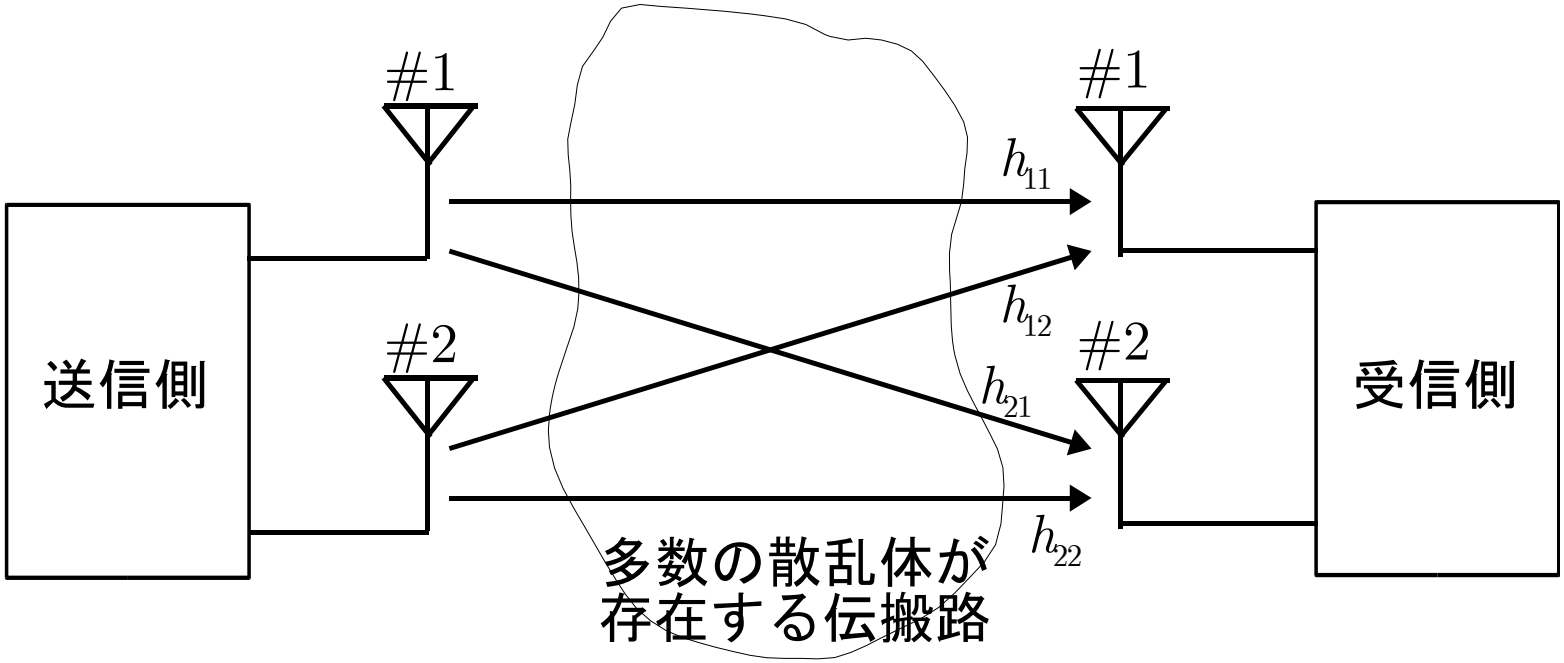


Y. Doi, J. Kitakado, T. Ito, T. Miyata, S. Nakao, T. Ohgane, and Y. Ogawa, “Development and evaluation of the SDMA test bed for PHS in the field,” IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, no.12, pp.3433–3440, Dec. 2003.

実用化されたSDMA-PHS基地局

MIMOシステム

- 送信側･受信側　双方に複数アンテナ
- 伝搬路に多数の散乱体



なぜMIMO技術か？

送信電力とチャネル容量

送信電力 P

送信信号 → channel $\frac{S}{N}$

通信路容量

$$C = \log_2\left(\frac{S}{N}+1\right)$$

$$\simeq \log_2 \frac{S}{N} \quad (\text{bps/Hz}) \qquad \left(\frac{S}{N} \gg 1\right)$$

送信電力 $2P$

送信信号 → channel $\frac{2S}{N}$

$$C' = \log_2\left(\frac{2S}{N}+1\right)$$

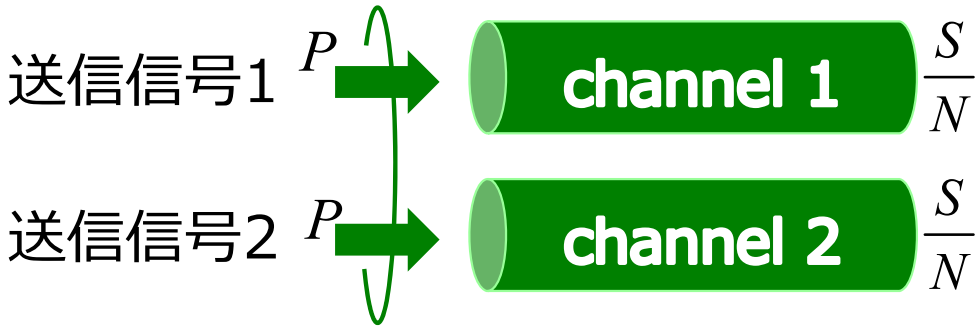
$$\simeq \log_2 \frac{2S}{N}$$

$$= C + 1 \quad (\text{bps/Hz})$$

送信電力を2倍にしても通信路容量は1bps/Hzしか増えない！

MIMO技術の導入

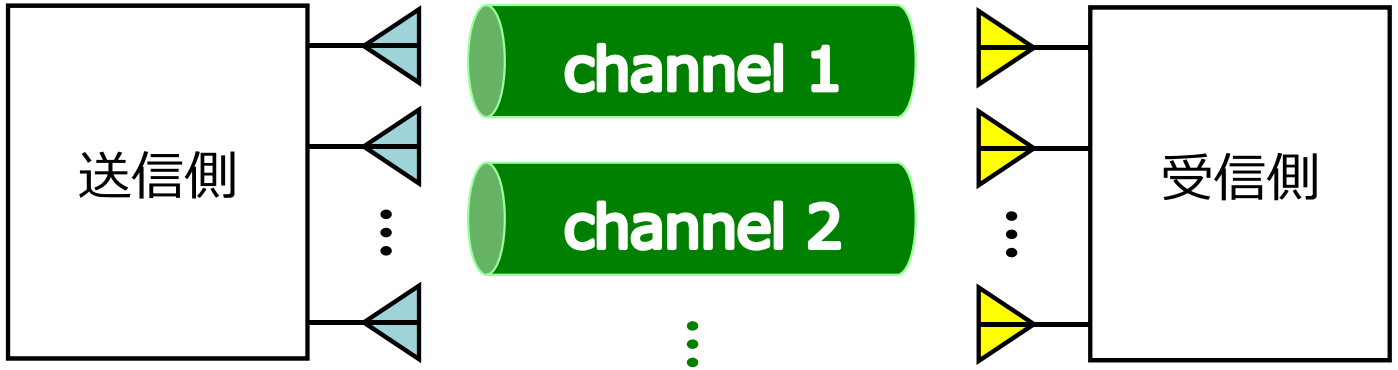
送信電力 $2P$



$$C'' = 2\log_2\left(\frac{S}{N}+1\right)$$
$$\simeq 2\log_2\frac{S}{N}$$
$$= 2C \qquad (bps/Hz)$$

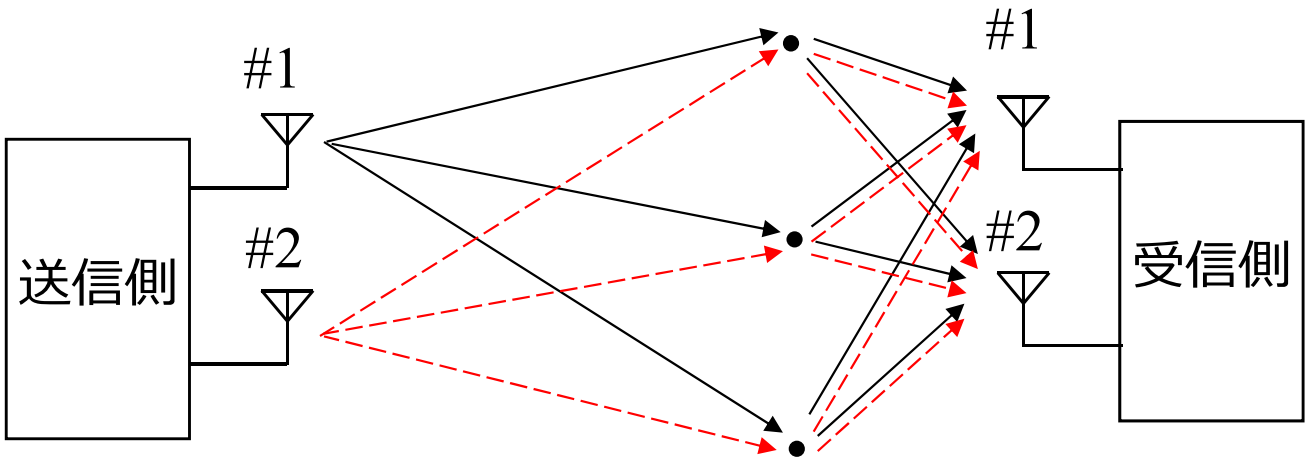
（通信路容量2倍を達成！）

MIMOシステム



- MIMOシステムは空間的に並列な伝送路を実現
- 通信路容量を増加
- 干渉は信号処理技術で抑圧

マルチパス伝搬環境



- 各チャネル（$h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$）は周囲散乱体によるマルチパスの寄与
- 各チャネルの相関低下 → 空間分割多重可能
- SDMAと同じコンセプト

パラダイムシフト

「マルチパスの影響軽減からマルチパス利用へ（MIMO）」

MIMOの概念を述べた最初の論文（1）

J. H. Winters, “On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. SAC-5, no. 5, pp. 871-878, June 1987.

“… the communication channels between multiple transmit and/or receive antennas can have low cross correlation even when the transmit or receive antennas are closely spaced.”

MIMOという用語は使われていないが，その概念は述べられている

Fig. 6. Radio system consisting of two users, …

MIMOの概念を述べた最初の論文(2)

Optimum Transmitter/Receiver Processing

The total normalized capacity is given by

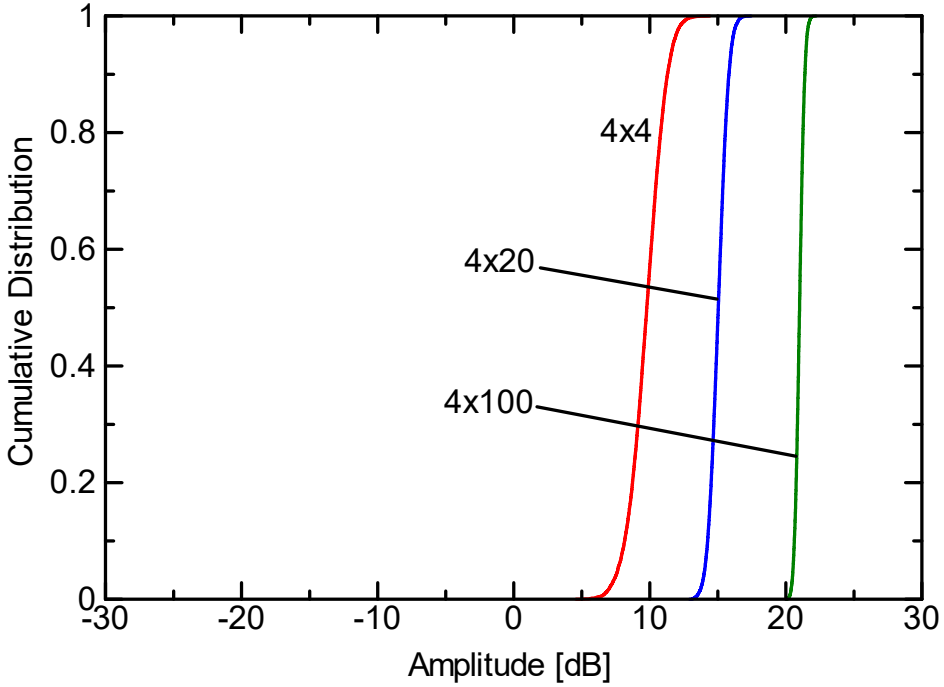
$$I_s = \Sigma \log_2 (1 + \rho \lambda_i P_i)$$

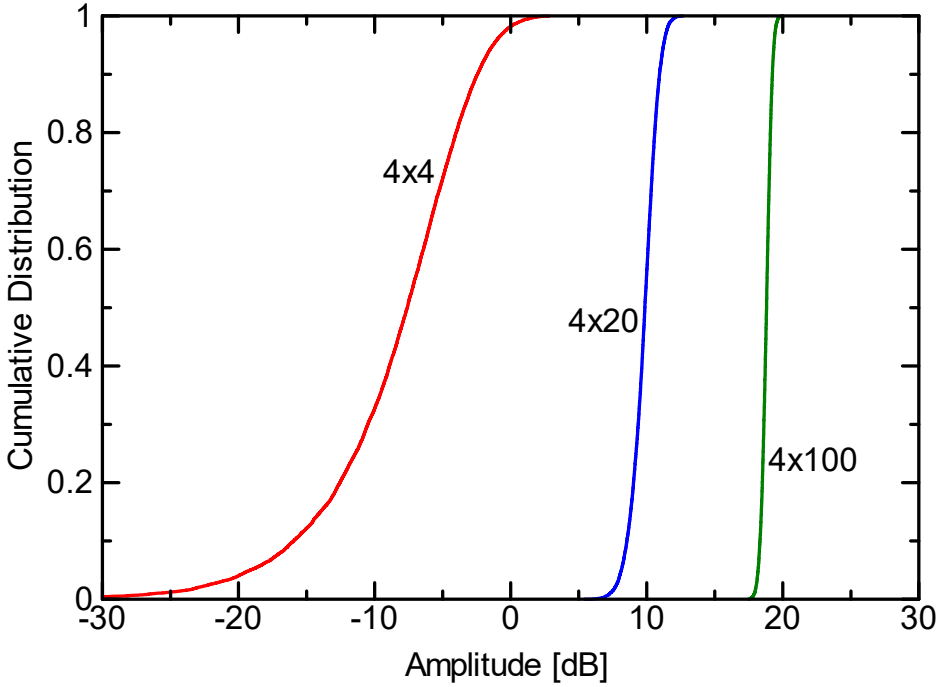
The P_i's that maximize I_s can be found by using the water fill analogy …

固有モード伝送による最適化

マルチパスは敵か味方か？

複数のチャネルを形成：　味方
フェージングを引き起こす：　敵





- 最大固有値に対応するチャネルにはほとんどフェージングなし
- 大規模 MIMO では最小固有値のチャネルにもほとんどフェージングなし → マルチパスを味方にした

3GPP LTEにおけるMIMO技術

- 要求条件：100Mbps/20MHz（下り回線，OFDMA）
- シングルストリームとすると

帯域幅：　20MHz　ガードバンド（上下各1MHz）除くと 18MHz

多値変調：　64QAMが最高．6bps/Hz

最大符号化率：約0.92

オーバーヘッド：　CP 約6.7%　RS，制御チャネル 約19%

18MHz×6bps/Hz×0.92×0.93×0.81 → 約75Mbps < 100Mbps

要求条件満たさない → MIMO空間多重

- 下り回線：2×2 MIMOで最高150Mbps
  4×4 MIMOで最高300Mbps
  閉ループMIMOにはコードブック使用
- 上り回線：送信ダイバーシチ
  (SC-FDMA)

MIMO現代史

MIMOにマルチパスは必須か？

- 送受信機が近傍界にあるときマルチパスなしで動作
- ミリ波のような高周波帯では現実的

  LOS-MIMO

  OAM（軌道角運動量）モード多重

D. Lee, H. Sasaki, H. Fukumoto, K. Hiraga, and T. Nakagawa, “Orbital angular momentum (OAM) multiplexing: An enabler of a new era of wireless communications,” IEICE Trans. Commun., vol. E100-B, no. 7, pp. 1044–1063, July 2017.

まとめに変えて

歴史の教訓

常識に捕らわれると怖い

以前は…	それが今は…
アダプティブアンテナは不要	MIMOを前提に設計
複数の無線機はコスト高	大規模MIMOが現実に
マルチパスは有害	MIMOシステムでは チャネル容量を増加
長遅延マルチパスは大敵	周波数ダイバーシチ実現