

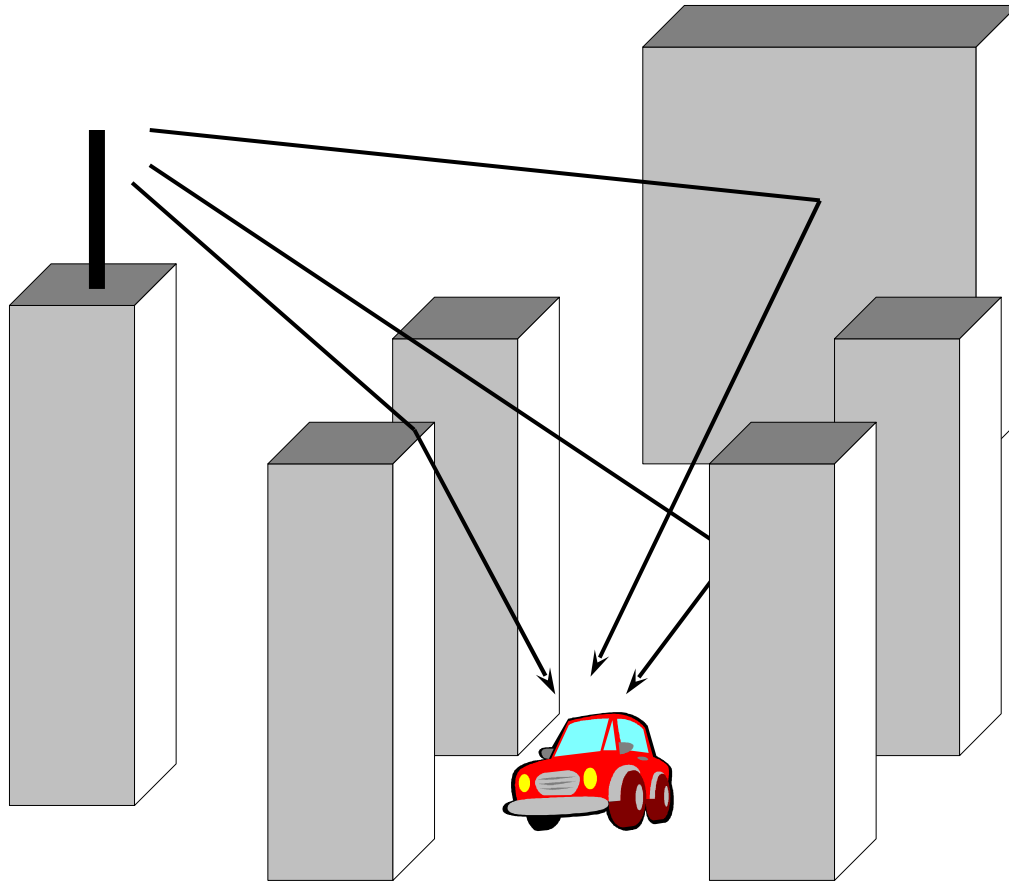
無線通信の電波伝搬 — 高田研の過去・現在・未来 —

移動通信研究グループ合同輪講

2006年5月25日

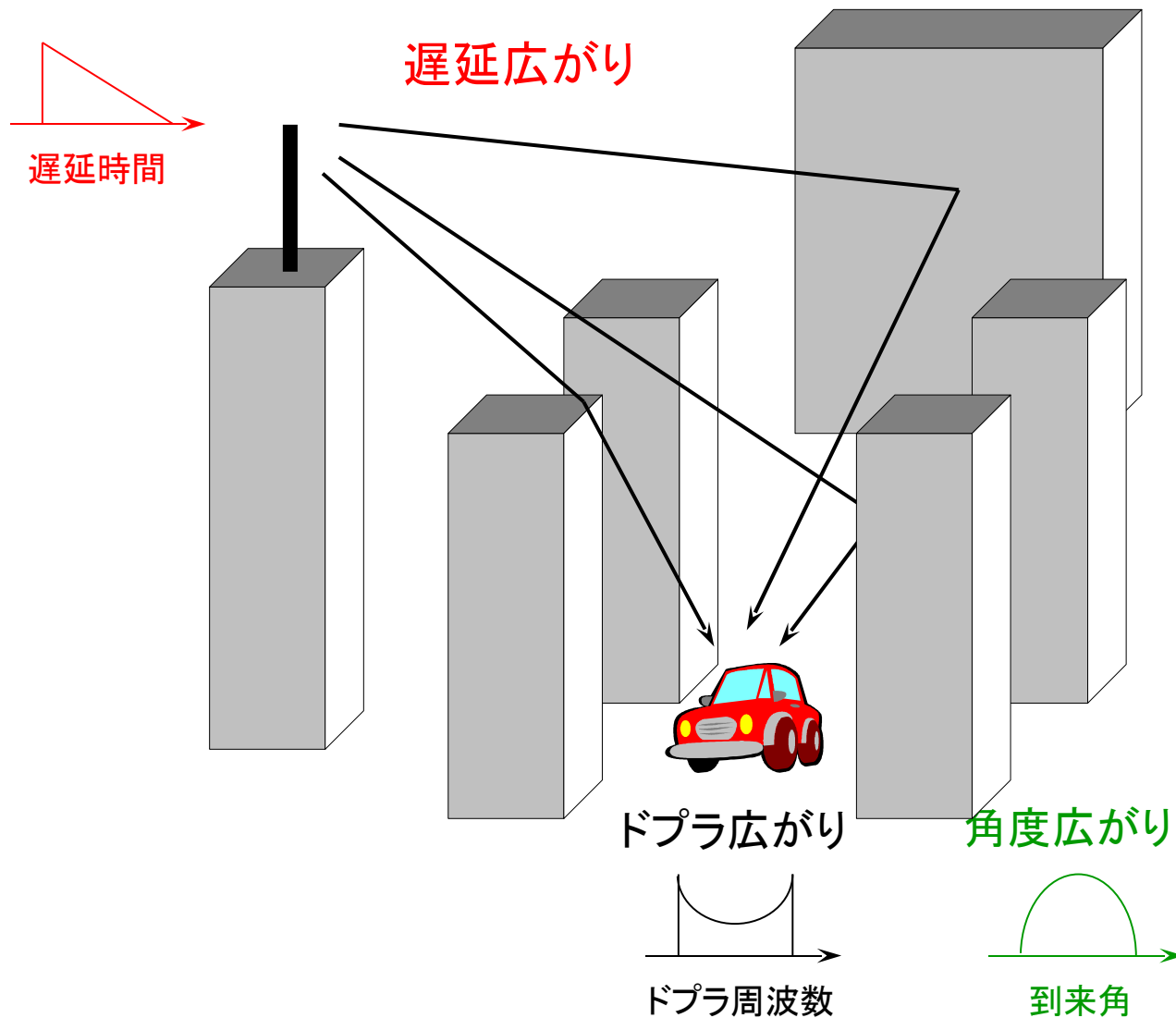
高田潤一

無線通信における電波伝搬

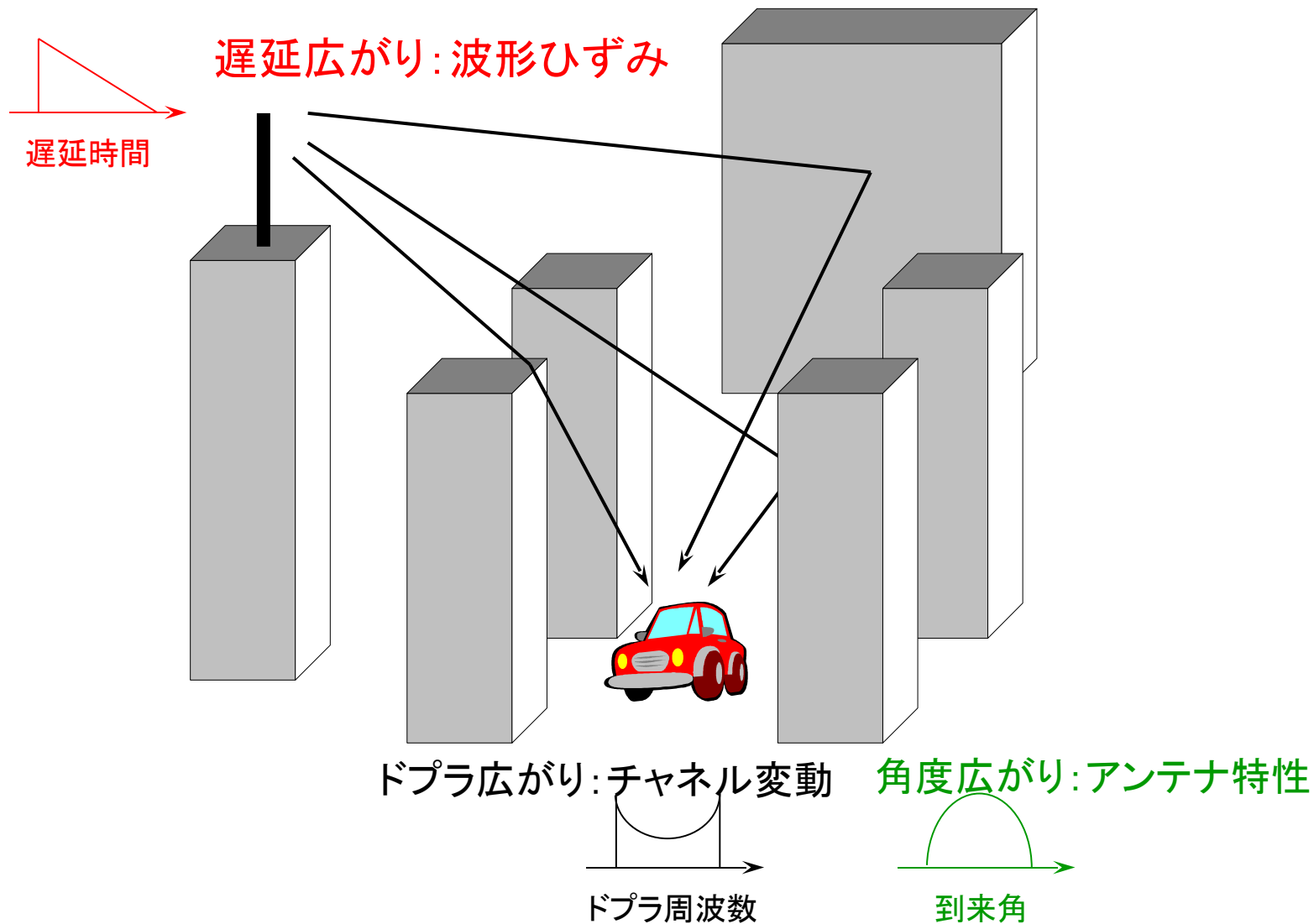


送信アンテナと受信アンテナの間の通信路
(電磁波そのものではなく情報伝送の媒体と捉える)

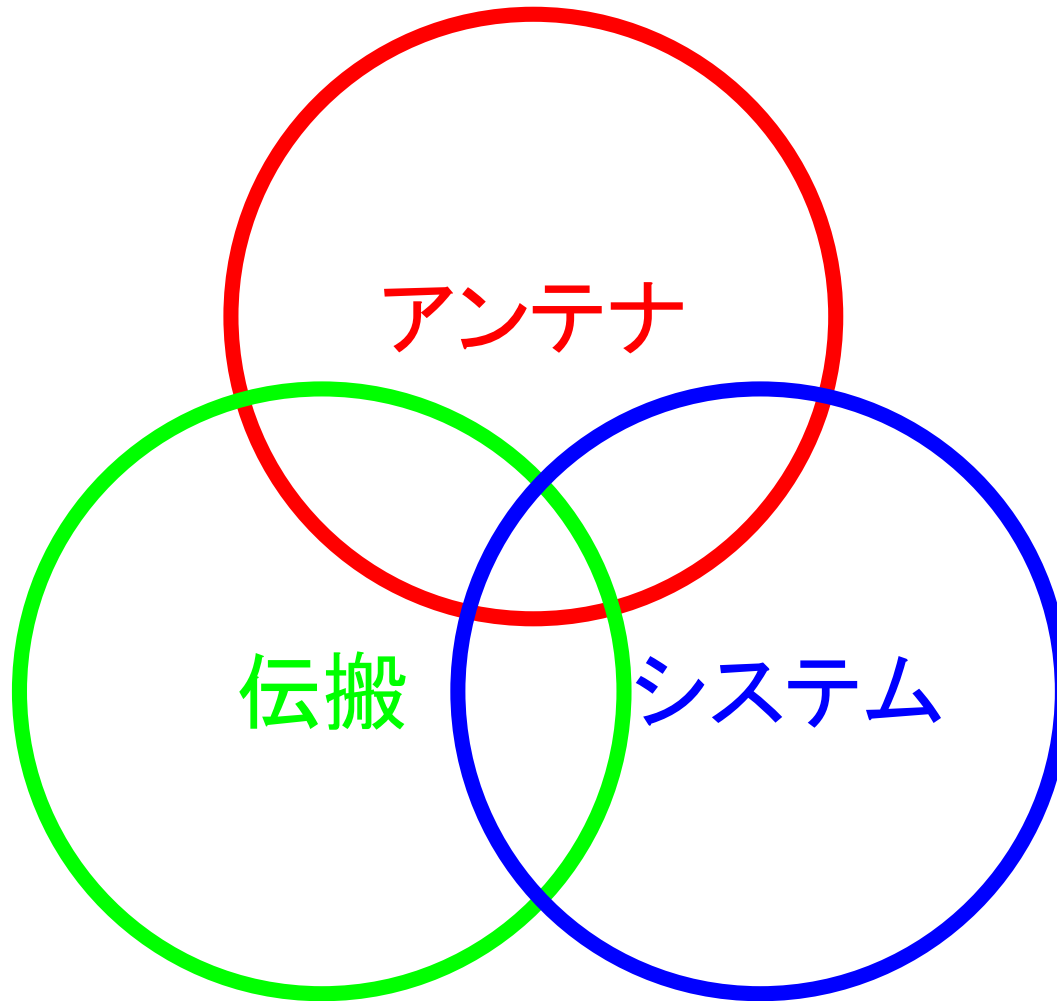
多重波伝搬 — 3つの広がり —



多重波伝搬 — 広がりの影響 —

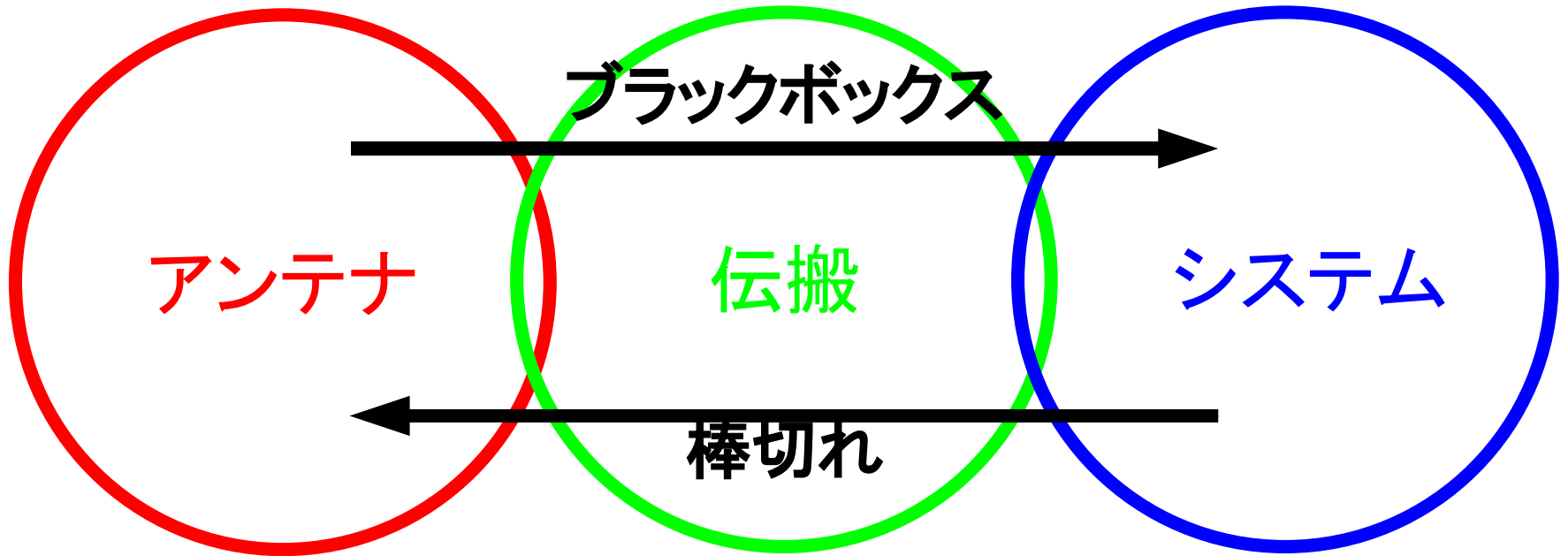


三位一体説

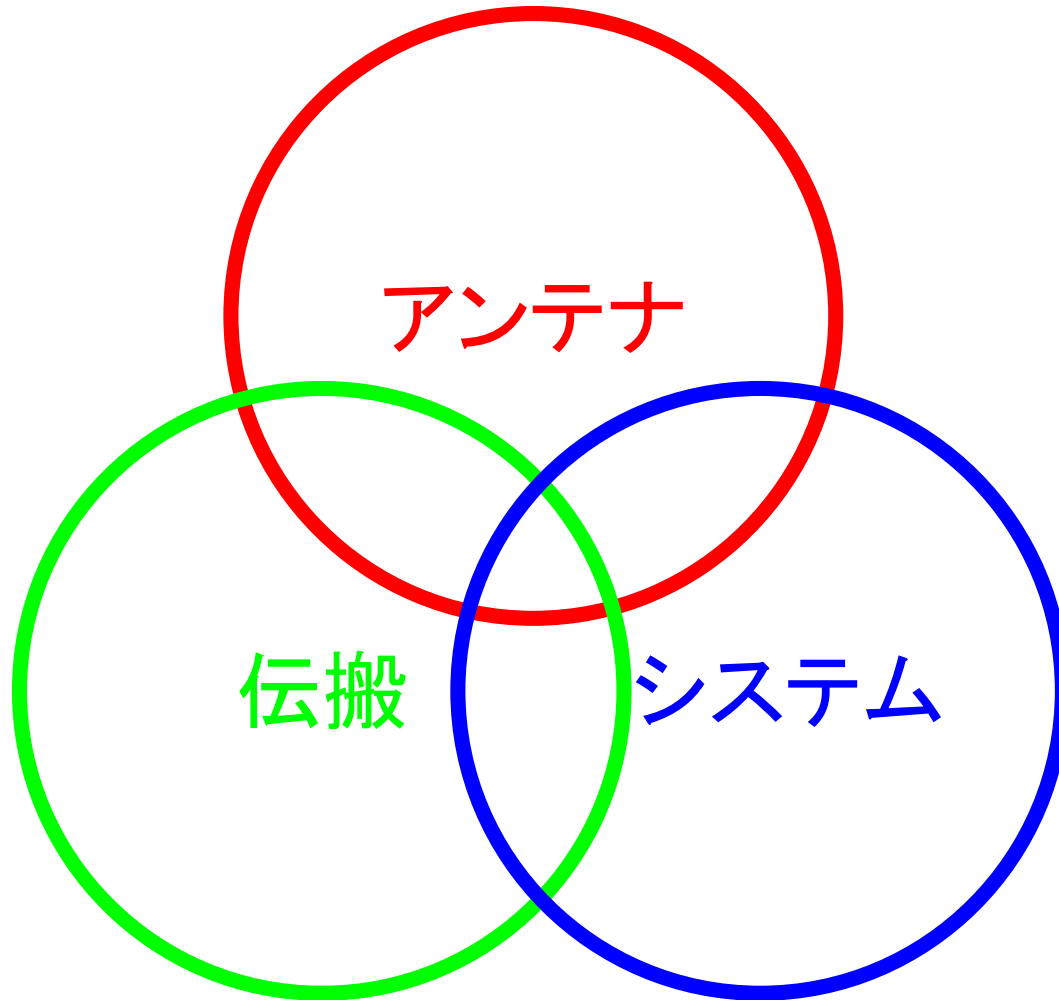


京大名誉教授池上文夫先生による

日本での実態は？



欧州では？



- 相互の壁が低い
- 互いを尊重し互いに利益

そもそもシステムって？

伝送系

- RF回路
- モデム
- コーデック

サービス

- カバレッジ
- アウテージ

アクセス方式

- 多重
- 多元接続
- ハンドオーバ



システム

システムと一口で言っても様々な観点がある

目的別分類

- 方式のための伝搬
 - 標準化のためのチャネルモデル
- 装置評価のための伝搬
 - 装置稼働率の評価
- サービスのための伝搬
 - 置局とカバレッジの設計

汎用・抽象的
一般論重視

最初は違いさえ解っていなかった

サイト固有
各論重視

目的別分類

- 方式のための伝搬
 - 標準化のためのチャンネルモデル

- 装置評価のための伝搬
 - 装置稼働率の評価

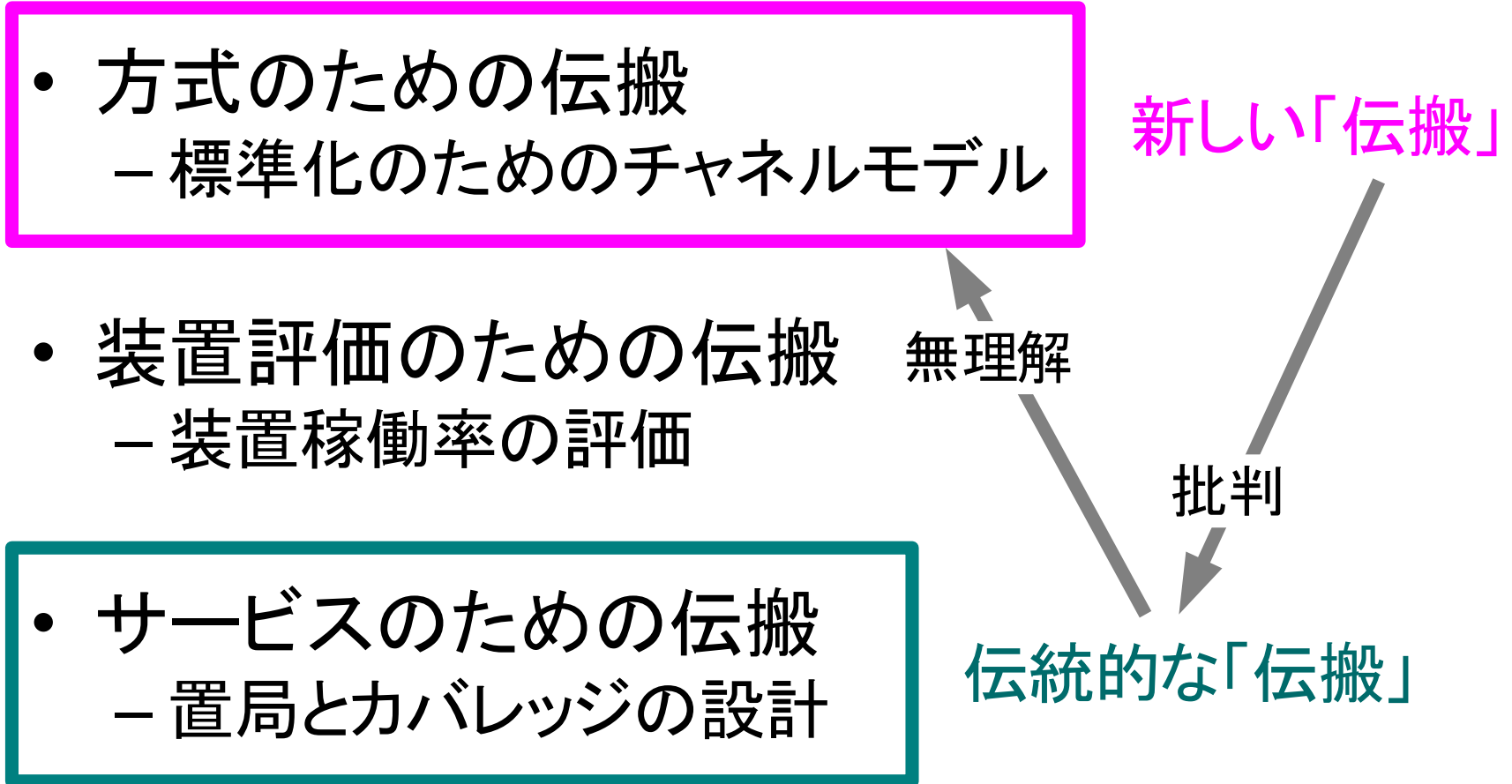
- サービスのための伝搬
 - 置局とカバレッジの設計

新しい「伝搬」

無理解

批判

伝統的な「伝搬」



無線通信の電波伝搬 おさらい

- 伝搬変動の3つのスケール
- WSSUSモデル
- 角度領域への拡張
- 時空間マルチパスチャネル(double-directional)とMIMOチャネル

伝搬変動の3つのスケール

- 距離減衰：距離による減衰

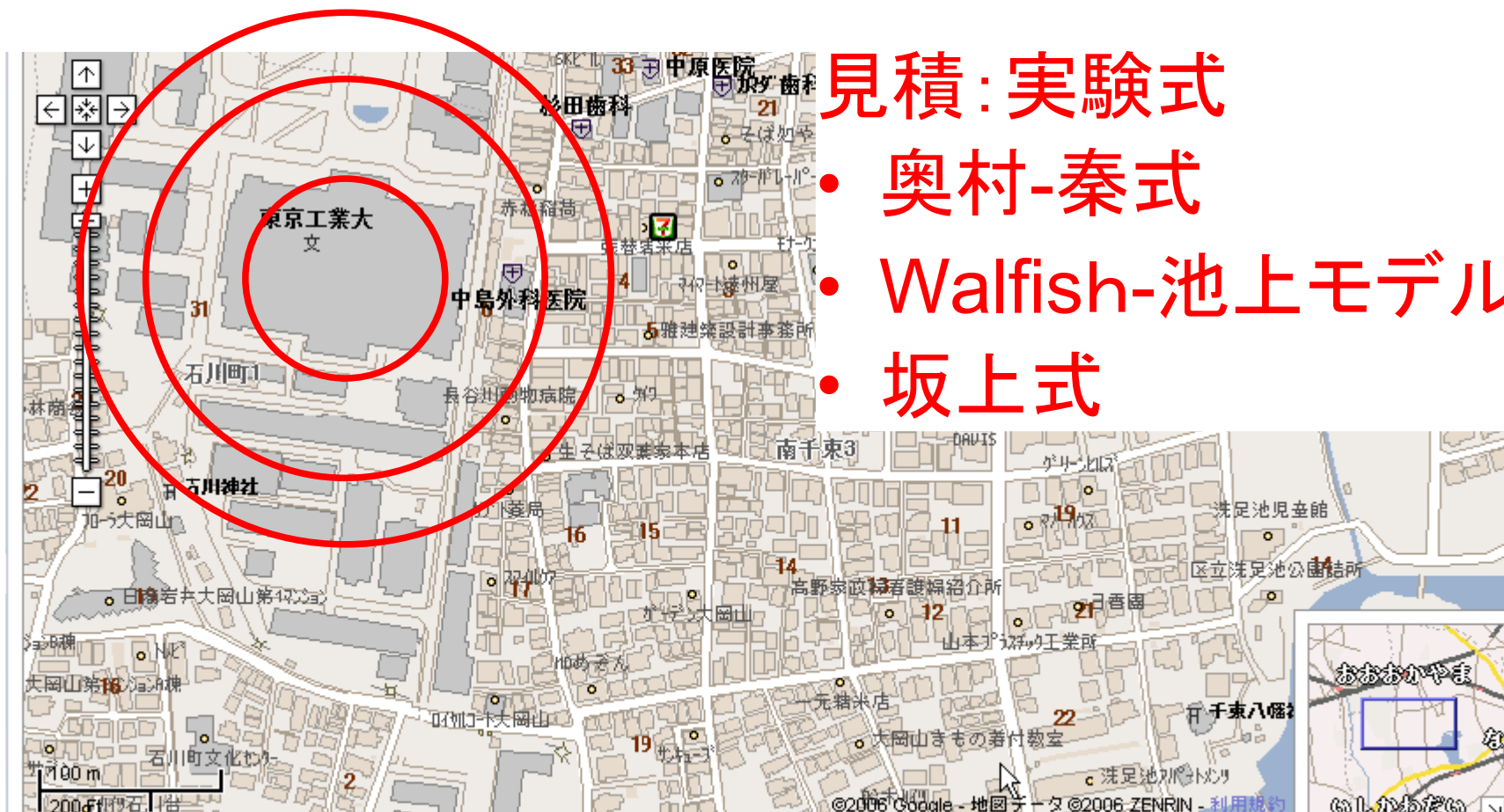
置局設計

- シャドウイング：建物スケールの変動

- フェージング：多重波干渉

方式設計

距離減衰



シャドウイング

移動に伴う周囲散乱体の変化

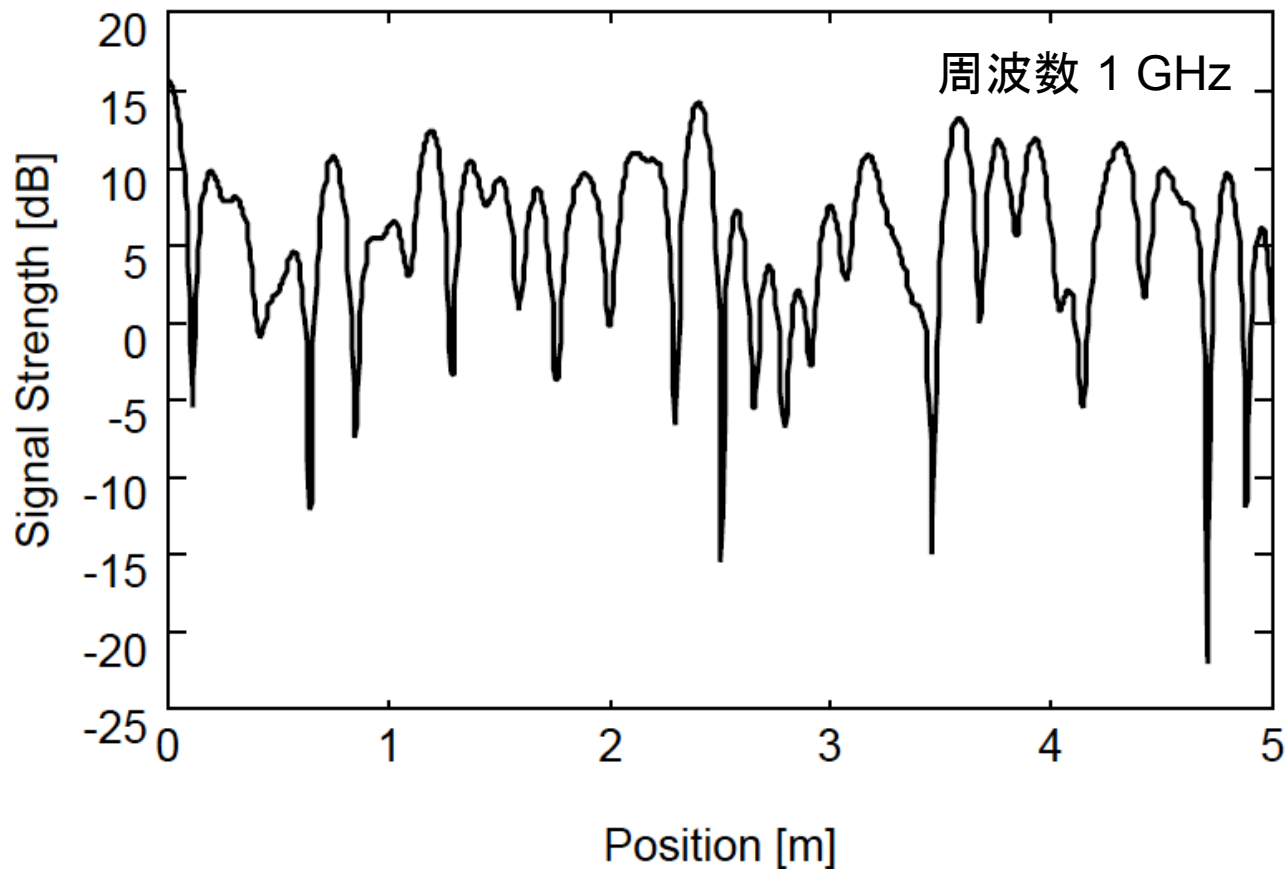
- 見え隠れ

非定常フェーディング

- 建物スケールで変動

フェージング

- 多重波の干渉～複雑な定在波分布



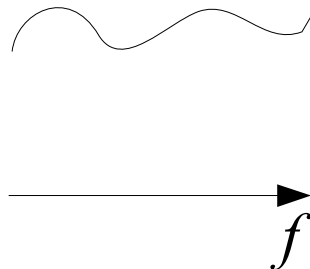
WSSUSモデル

シャドウイングの影響がない定常確率過程で表現されるフェージングのモデル化

- 広義定常 (Wide-Sense Stationary)
- 無相関散乱 (Uncorrelated Scattering)

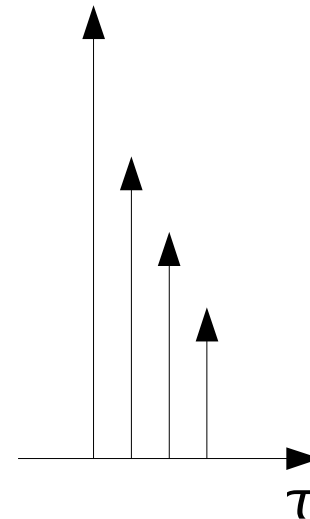
伝達関数

・周波数に対して広義定常(WSS)



インパルス応答

・異なる遅延の到来波は互いに無相関(US)



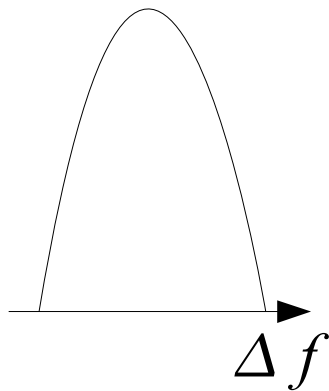
実現値

WSSUSモデル

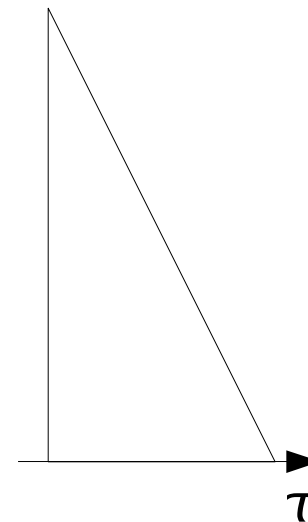
シャドウイングの影響がない定常確率過程で表現されるフェージングのモデル化

- 広義定常 (Wide-Sense Stationary)
- 無相関散乱 (Uncorrelated Scattering)

周波数相関関数



遅延電カスペクトル



フーリエ変換



(ウィナー・ヒンチンの定理)

電力平均値

WSSUSモデルの空間への拡張

遅延-周波数特性

- WSS: 周波数
- US: 遅延時間

波数-位置特性

- WSS: 位置
- US: 波数(到来方向)

注: 動的なフェージングの理論では移動速度を用いてドプラ-時刻特性として表現する.

WSSUSモデル

シャドウイングの影響がない定常確率過程で表現されるフェージングのモデル化

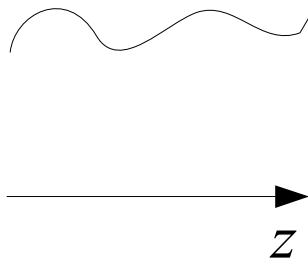
- 広義定常 (Wide-Sense Stationary)
- 無相関散乱 (Uncorrelated Scattering)

空間フェージング分布

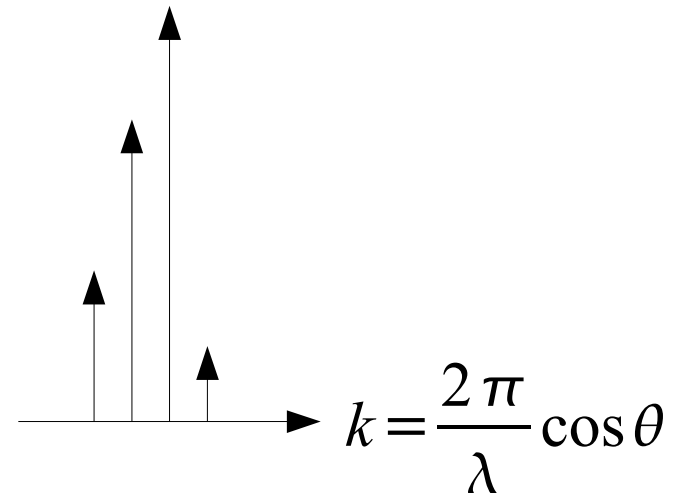
・周波数に対して広義定常(WSS)

到来方向分布

・異なる方向の到来波は互いに無相関(US)



実現値

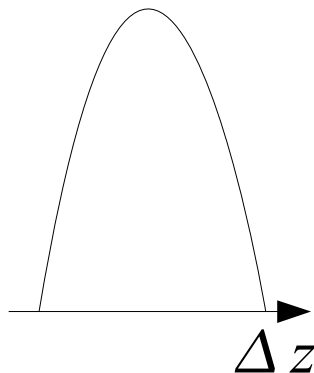


WSSUSモデル

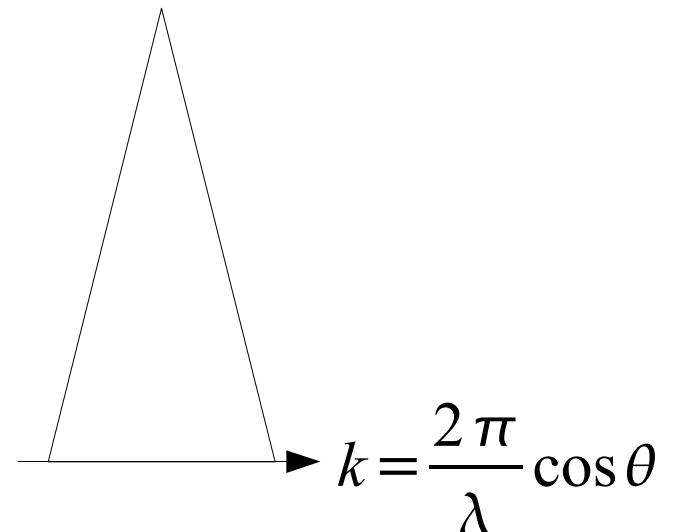
シャドウイングの影響がない定常確率過程で表現されるフェージングのモデル化

- 広義定常 (Wide-Sense Stationary)
- 無相関散乱 (Uncorrelated Scattering)

空間相関関数



波数電カスペクトル



フーリエ変換

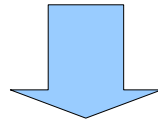


(ウィナー・ヒンチンの定理)

電力平均値

WSSUSに基づくチャネルモデル

遅延/角度電カスペクトルに対しUS仮定を適用



素波をランダムに生成

WSSUSモデルのバリエーション

- WSS～モデル化に自由度

1. 遅延/角度ランダム

- 遅延/角度のPDF: 角度電力スペクトル
- 振幅: 一定
- 位相: 一様乱数

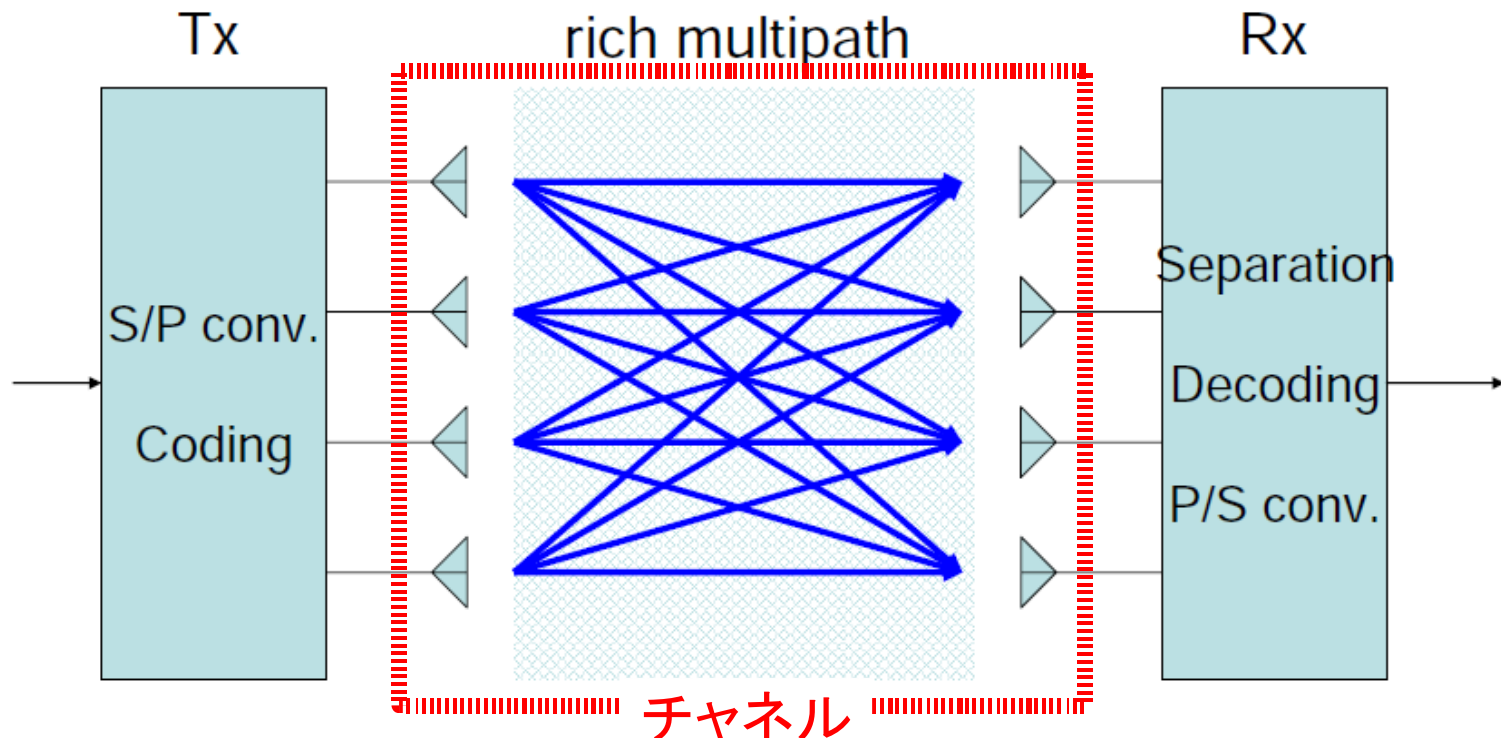
2. 遅延/角度固定

- 到来角: 等間隔
- 振幅: 角度電力スペクトルの平方根
- 位相: 一様乱数

振幅は固定する代わりにレイリー分布としてもOK

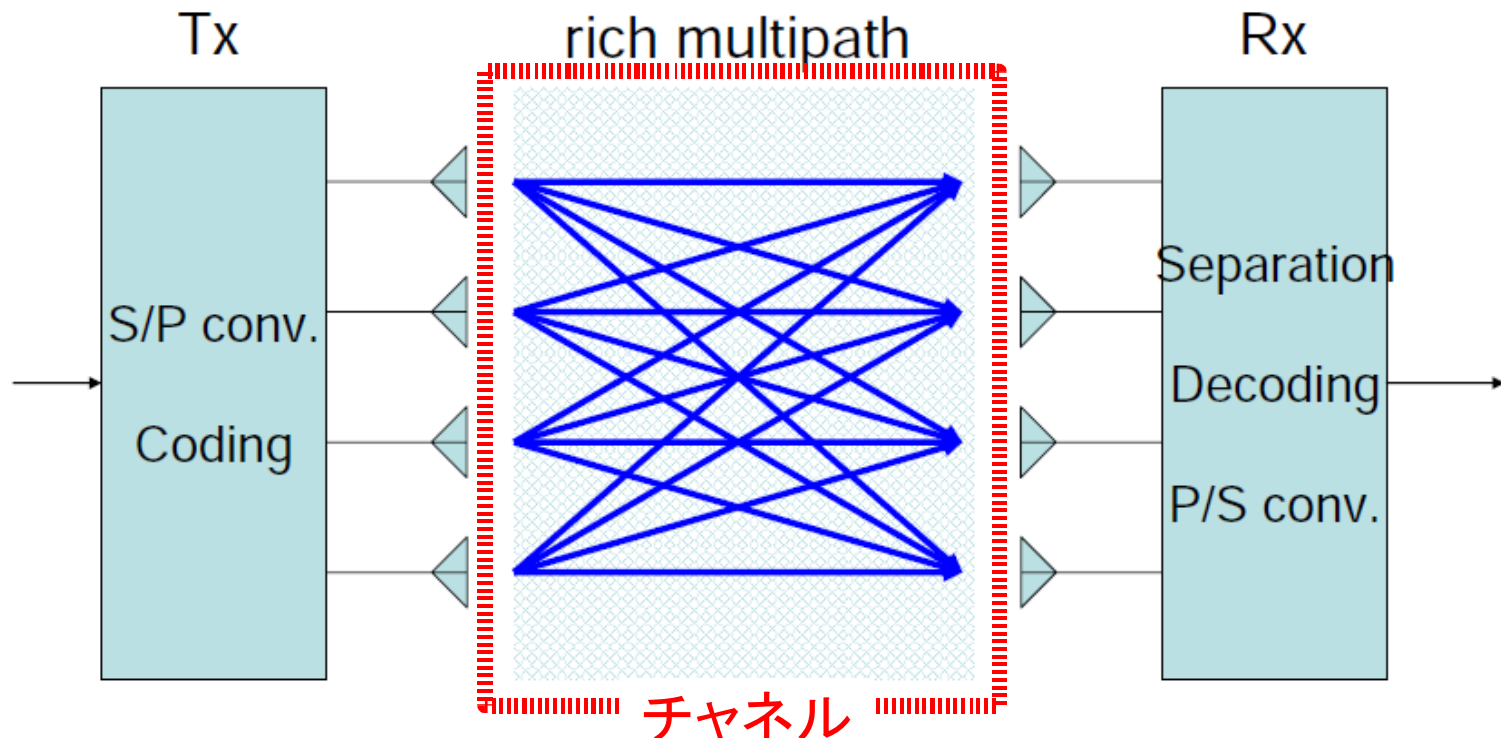
MIMOチャネルの測定

- 特定のMIMOアンテナを使用する
 - アンテナはチャネルの一部
 - アンテナ構成の影響は再測定しなければ不明



時空間マルチパスチャネルの測定

- 到来波の角度分布を推定する
 - アンテナを含まない～デバイスと環境の分離
 - アンテナ構成の影響は指向性関数で考慮可



標準化

無線通信の伝搬研究の出口

伝搬損失の標準

- ITU-R Pシリーズ (SG3)

チャンネルモデルの標準

- かつてはITU-R (例えばM.1225)
 - 3GPP/3GPP2
 - IEEE 802シリーズ (11, 15, 16, 20, 22)
 - COST 207/231/259/273/XYZ
- 正確さ・網羅性
より
早さ・単純さ

高田研における伝搬研究

- レイトレース・シミュレーション
- チャンネルサウンディング
- 伝搬メカニズムの解明
- モデルの使い道
- セレンディピティ
- 変わる無線通信システム

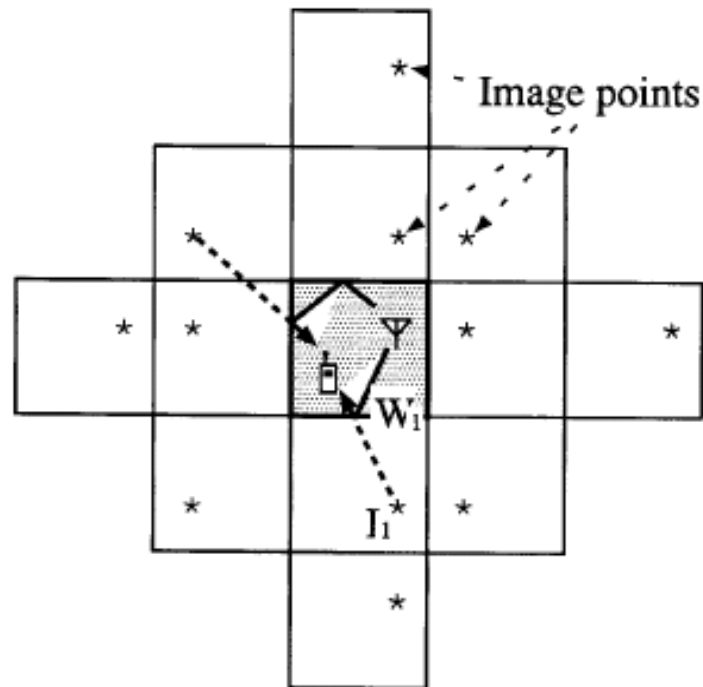
レイトレース・シミュレーション

- 決定論的なアプローチ
- 高周波問題
 - 対象は波長より何桁も大きい
 - Maxwellの方程式を直接解くことは無理
- 資産がなければシミュレーションしかできない

- 電磁界問題を解くという意識
 - チャンネルという意識の欠如
 - 使い方まで考えていなかった

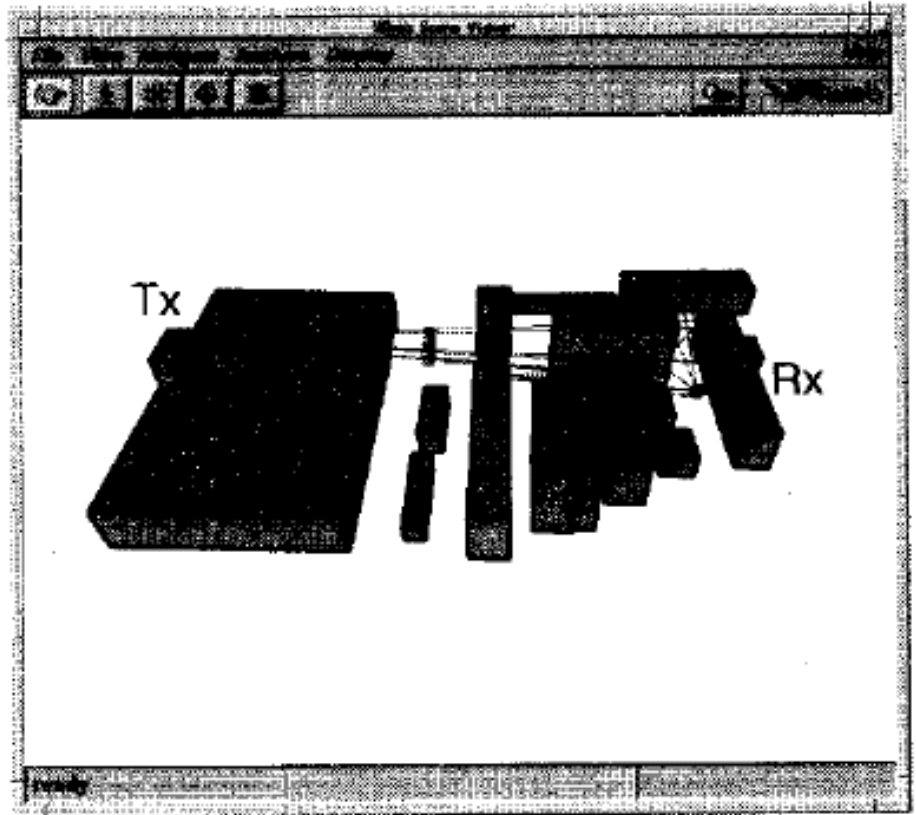
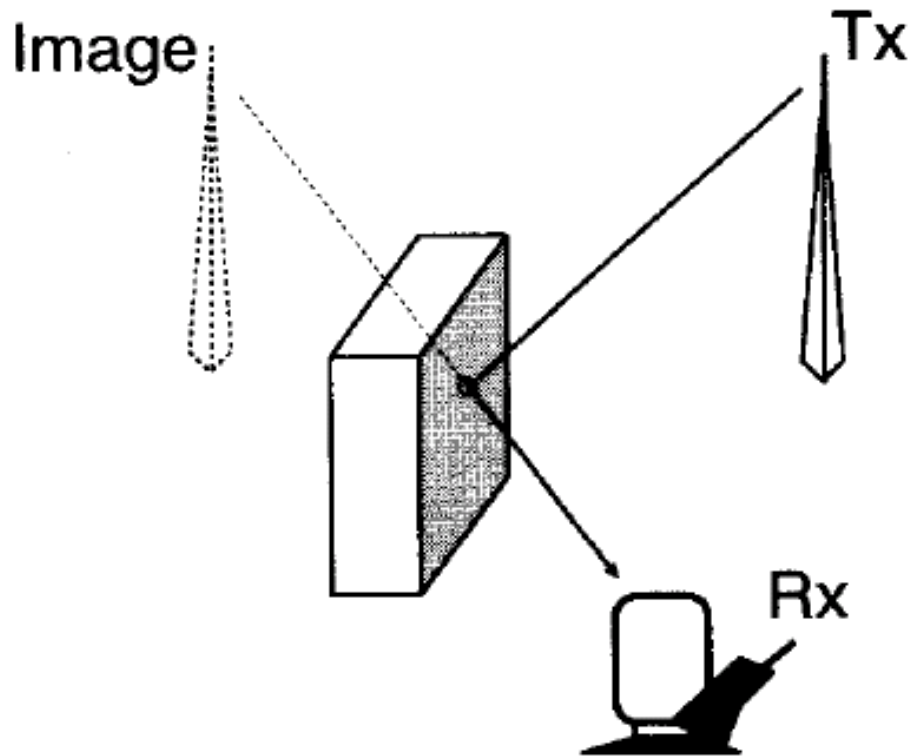
イメージ法

- まずは直方体の部屋から



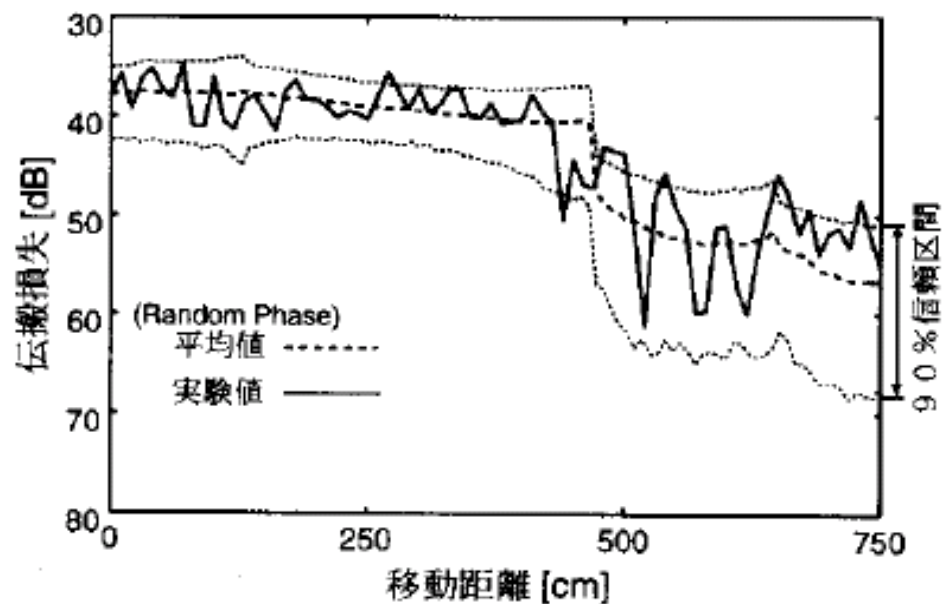
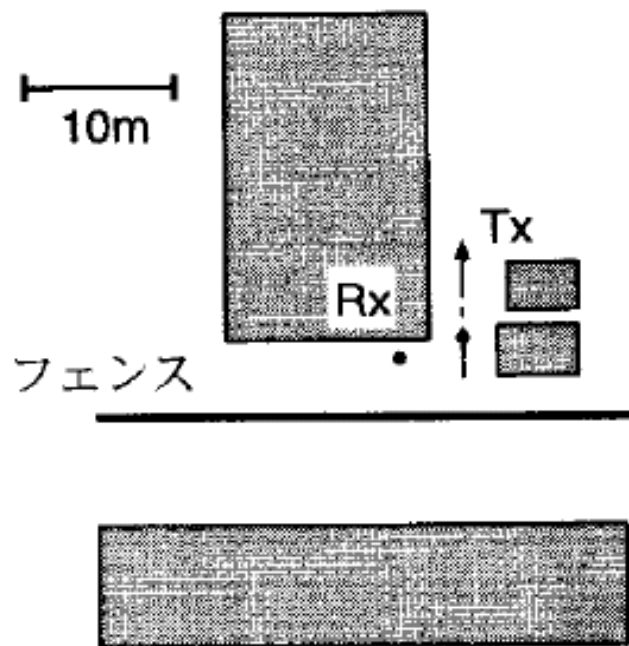
イメージ法

- 屋外環境への一般化



検証実験

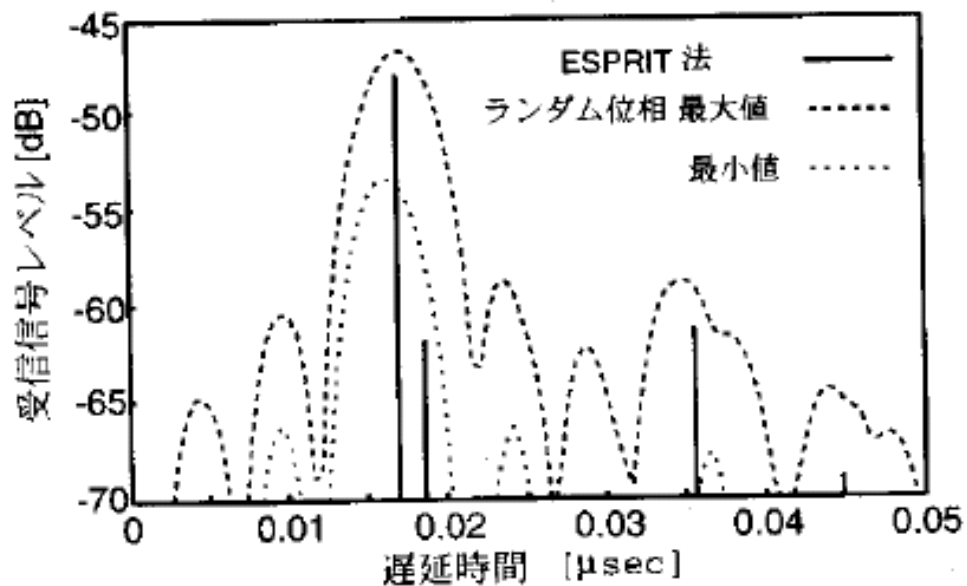
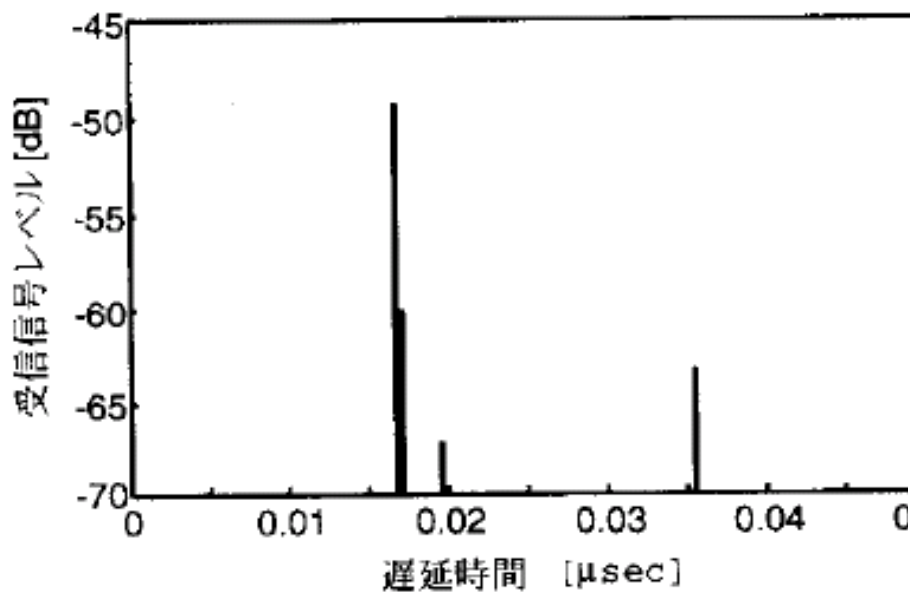
- 信号発生器 + スペクトラムアナライザ



検証実験

- ベクトルネットワークアナライザ+ESPRIT

(某社より5万円で払い下げ)



イメージ法から レイ・ローンチング法へ

イメージ法

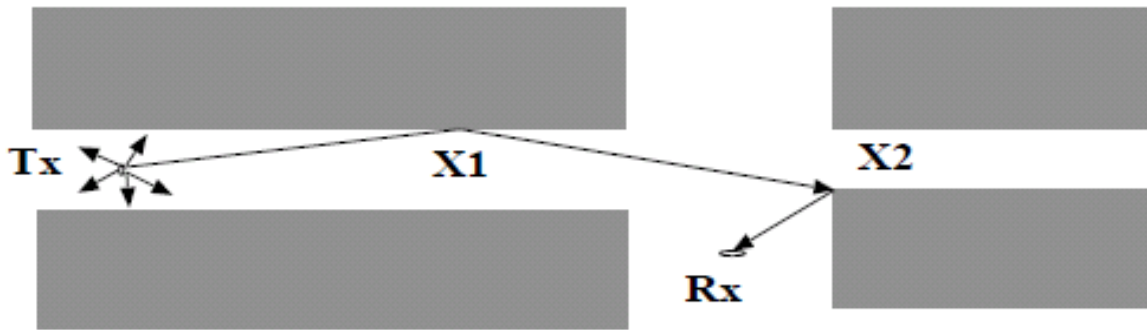
- オブジェクト数に対し計算量が指数関数的に増大

レイ・ローンチング法

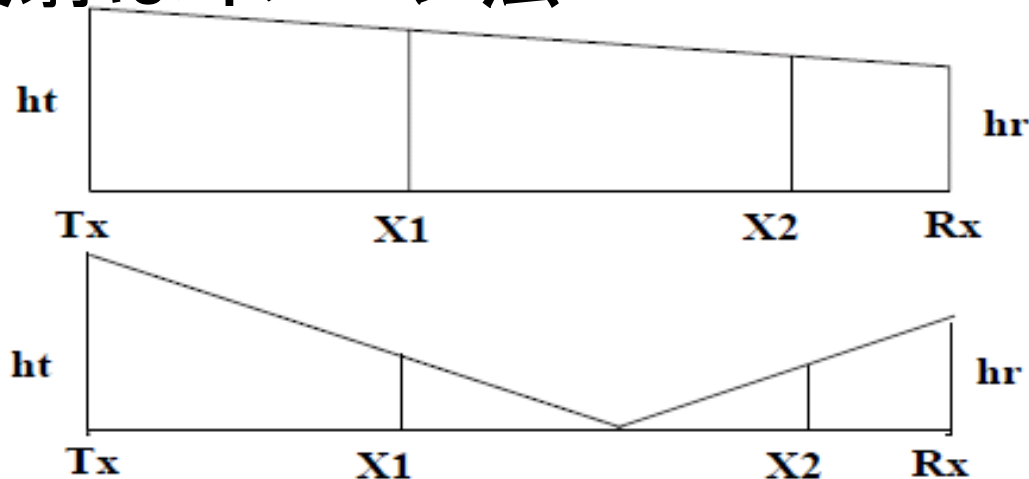
- 送信点から十分密な間隔でレイを出射
- 規定の散乱回数内に受信店に到達した波をカウント

レイ・ローンチング法

- 建物反射はレイ・ローンチング法



- 大地反射はイメージ法



シミュレーションの検証

- 資産はVNAだけ
 - 本格的な移動通信環境における測定は絶望的
- 独力でチャンネルサウンダの製作開始
 - 阪口助手の博士課程でのテーマだった
- YRP基盤研との共同研究
 - ようやくサウンダ所有機関との共同研究開始

チャンネルサウンダの製作

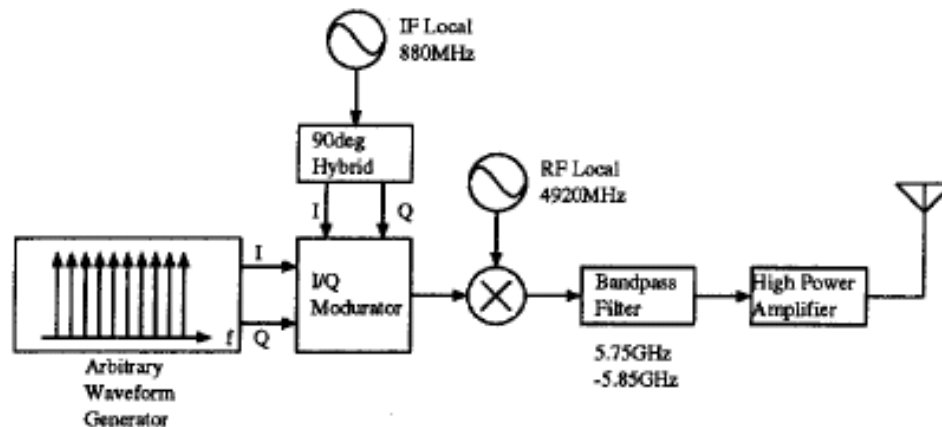


Figure 1: Transmitter of proposed sounder.

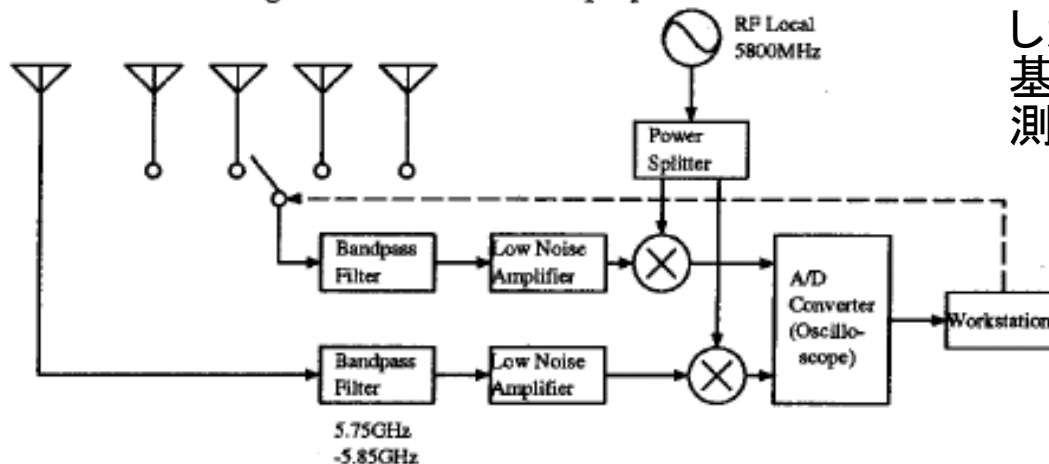


Figure 2: Receiver of proposed sounder.

一番最初のデザインは
RUSKそっくりだった。
しかし、ルビジウムは使わず
基準ポートとの位相差を
測定するつもりだった。

チャンネルサウンダの製作

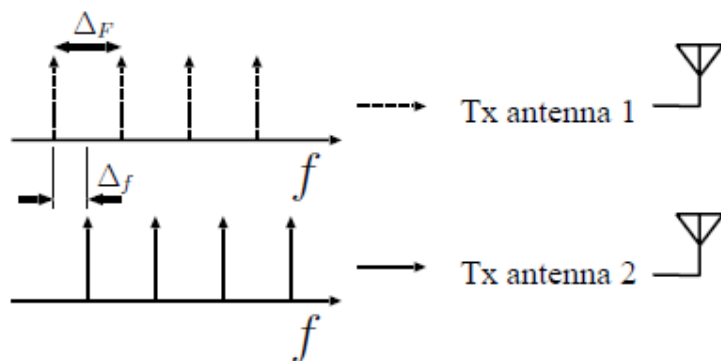


Fig. 2 Multi-tone FDM for MIMO sounding.

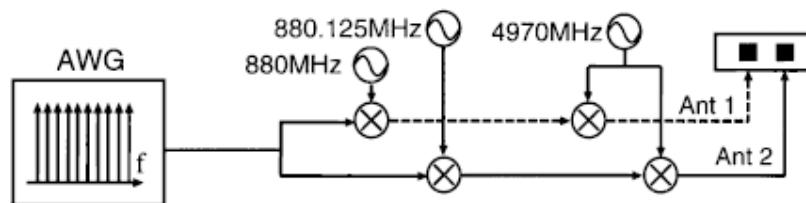


Fig. 3 Transmitter block diagram.

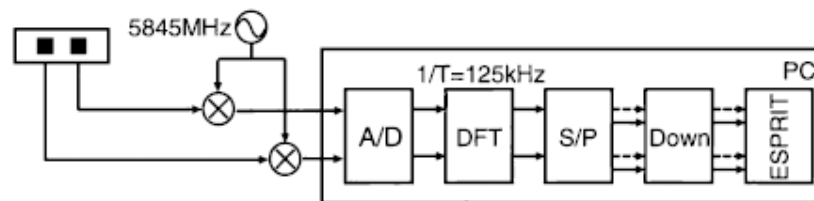
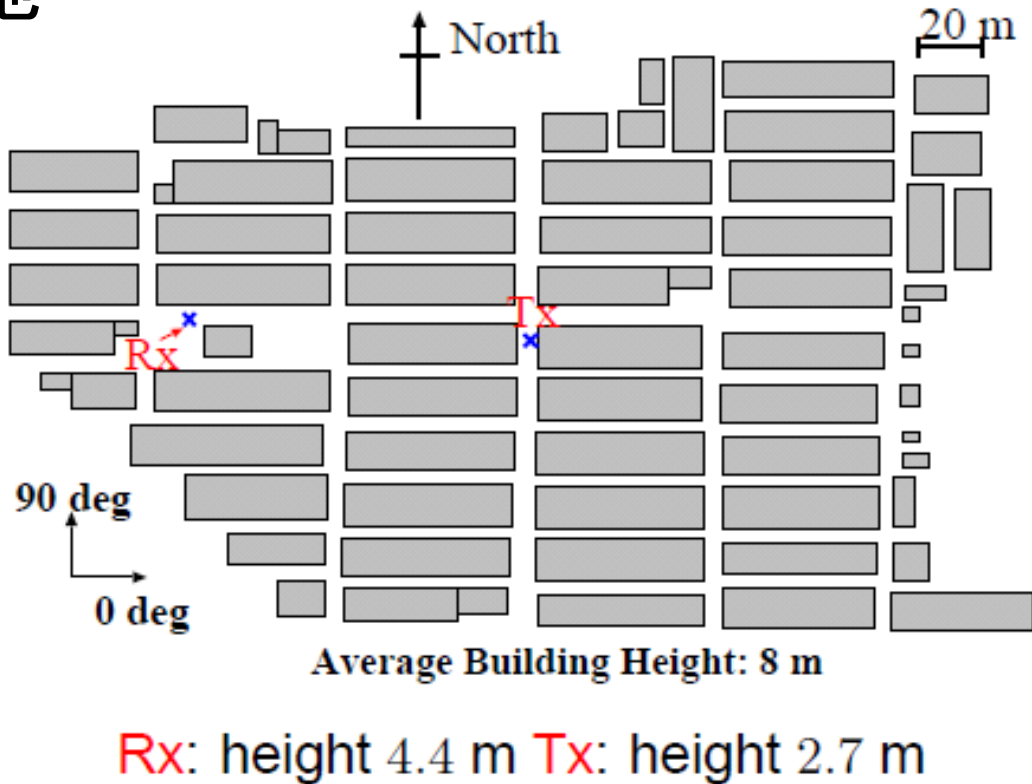


Fig. 4 Receiver block diagram.

暗室でパラメタ推定を行ったテスト機のアーキテクチャ。
この後MIMO-SDRプラットフォームへと大きく舵を切る。

YRP基盤研とのフィールド実験

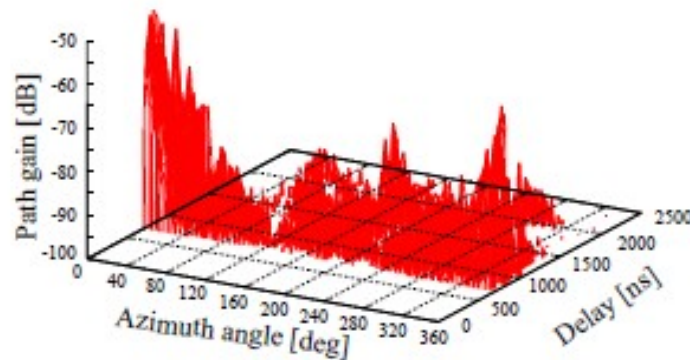
- 横須賀市ハイランド
- 住宅地



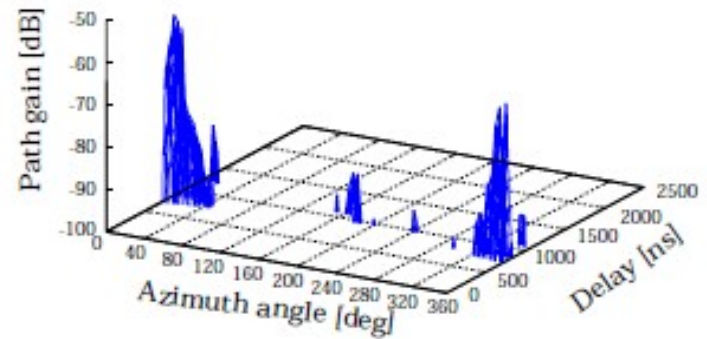
フィールド実験結果

- 方位角・遅延スペクトラム

Experiment



Simulation



- 主要な到来波は推定できているがスプレッドが小さい
- 誤差は非正規反射の影響？

決定論的伝搬のニーズ

- ETCゲートの誤動作
 - マルチパスを考慮していなかった設計
 - 電波吸収体による対策工法

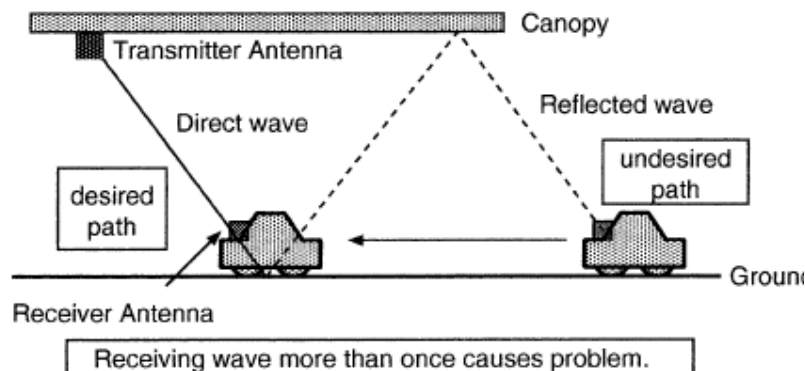


Fig. 1 Multipath problem of ETC occurred at the beginning of deployment.

ETCゲートにおけるパス同定

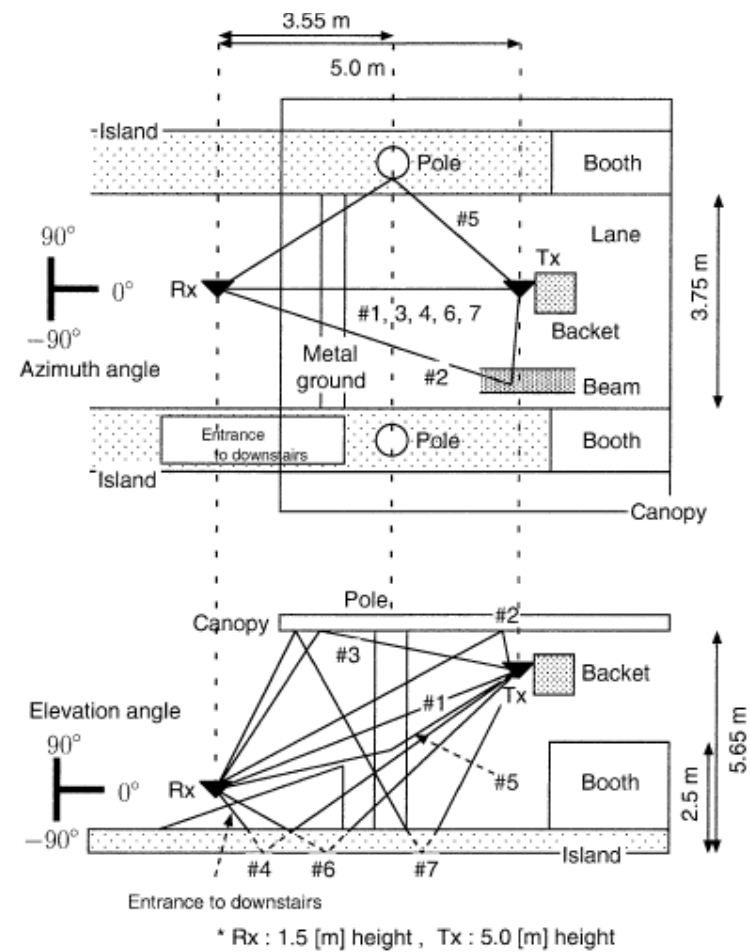


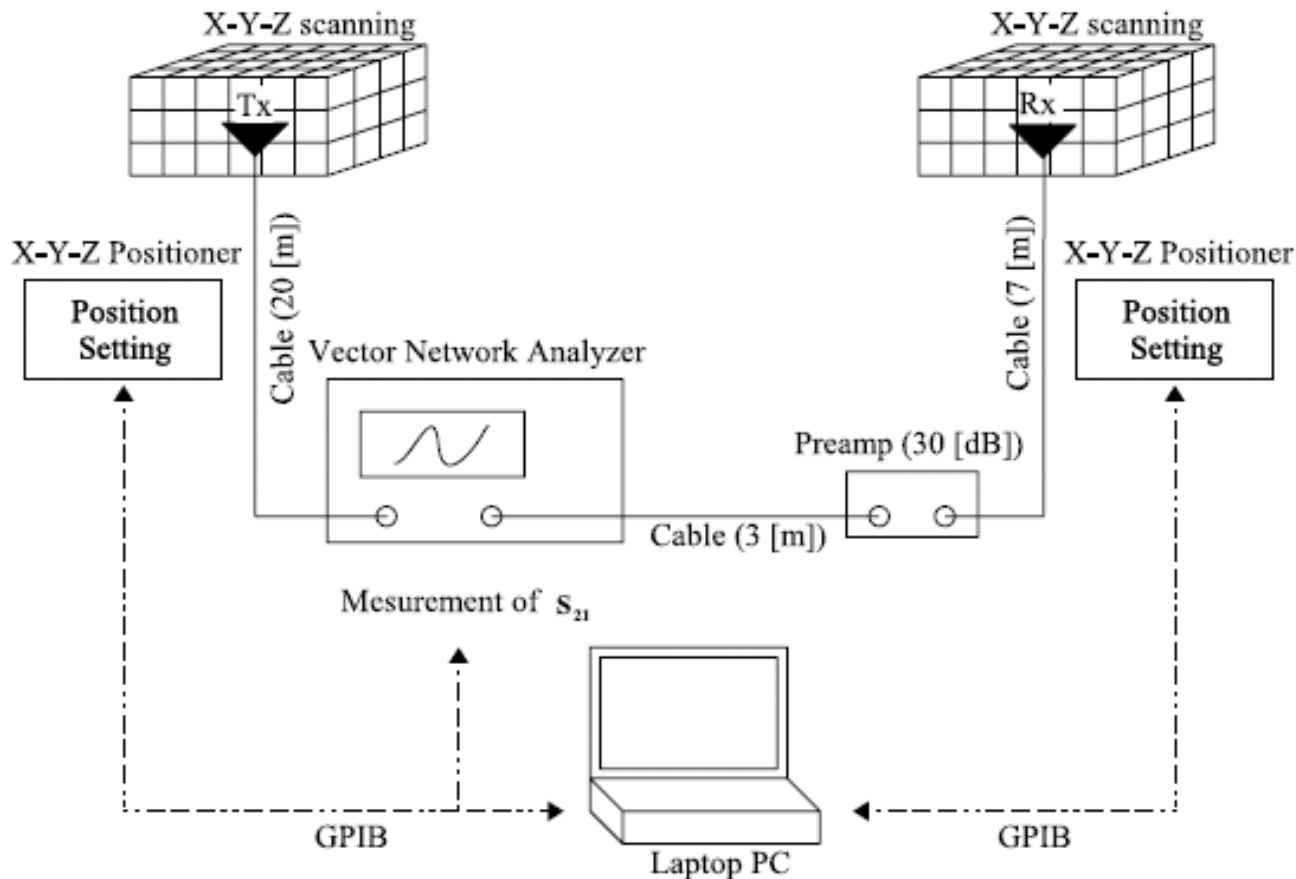
Fig. 4 Path identification at scenario B.

移動通信から近距離無線へ

- ETC

- UWB PAN

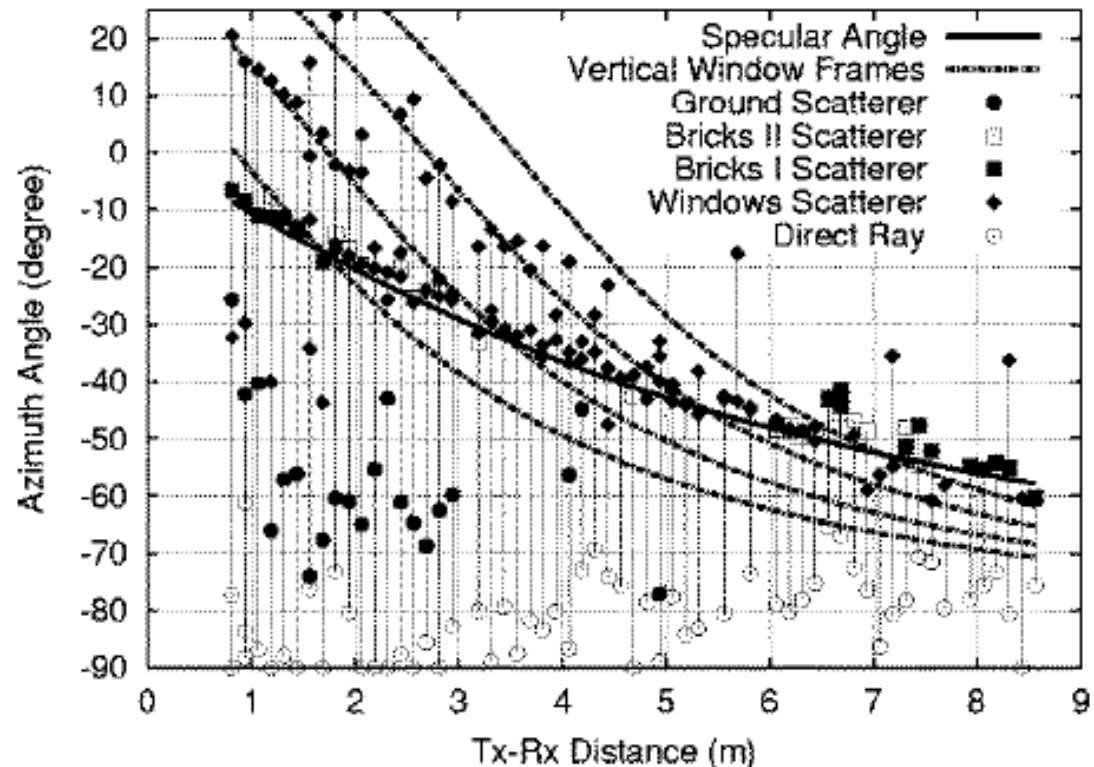
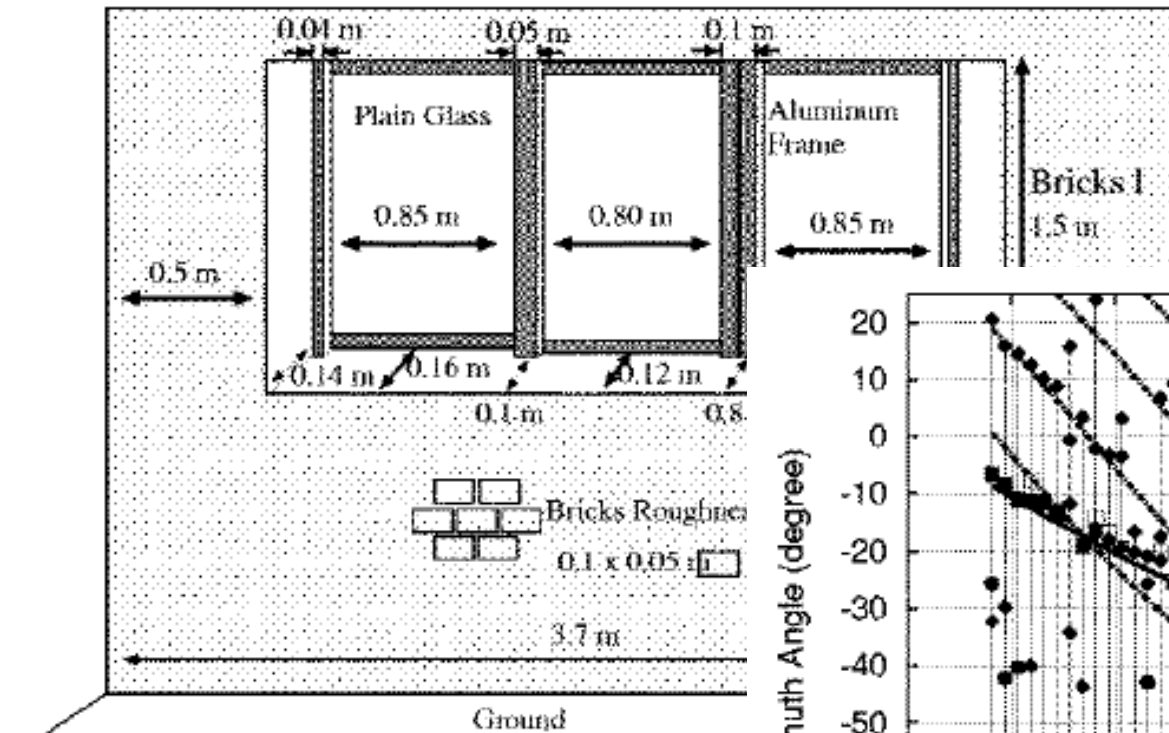
再びVNAの出番



伝搬メカニズムの解明

- より高性能な決定論的伝搬シミュレータの構築
 - ニーズはあるのか？
- モデル化されていない現象
 - 粗面
 - 規則的な凹凸
 - 多重回折
 - フレネルゾーンと幾何光学の限界

建物表面からの散乱



現象は把握できた。
どうやってモデル化？

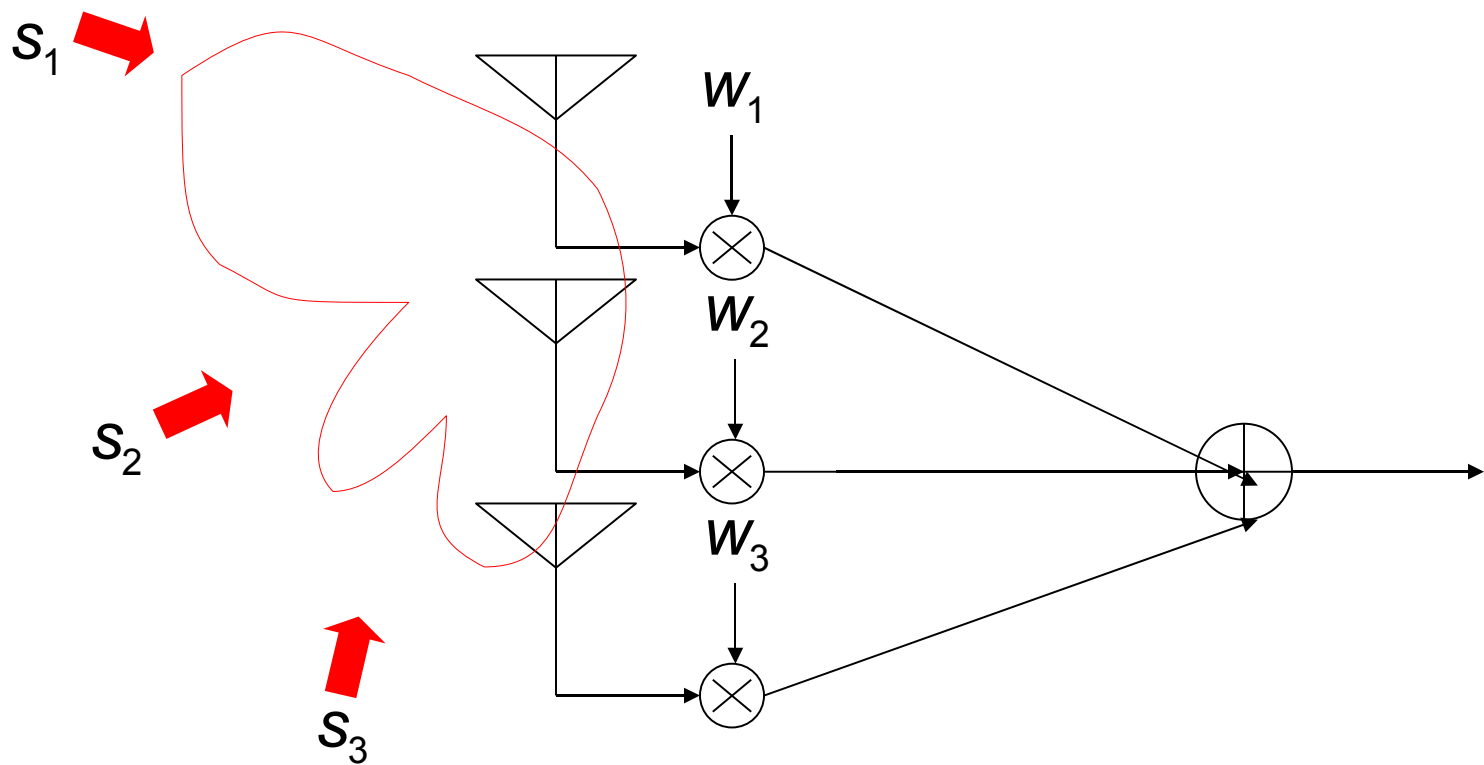
モデルの使い道

伝送屋でない～少しは使い道にも馴れよう

- アンテナダイバーシティの理論体系
 - までは到達せず, ありきたりな結論を得る
- COST273モデル
 - 業界団体ではないが標準モデル構築活動に加わる

干渉除去動作

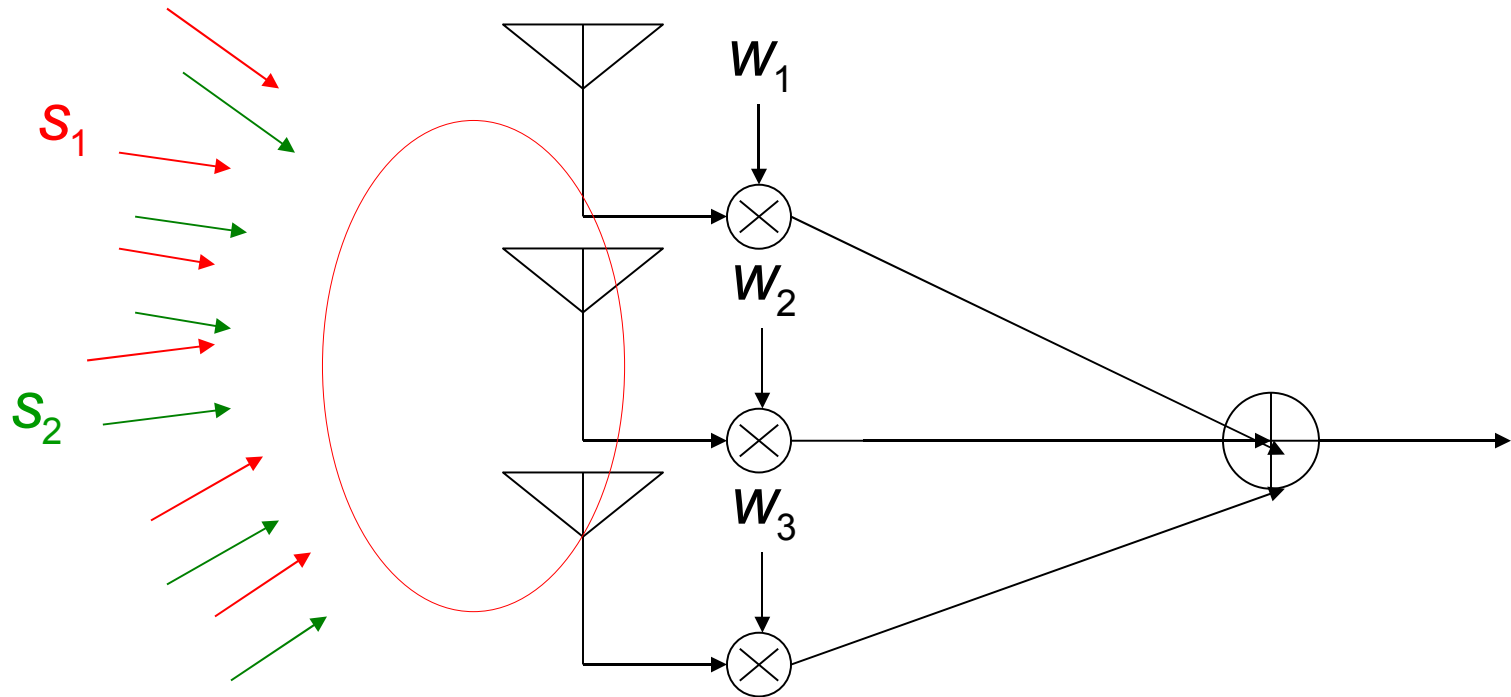
到来角広がり<ビーム幅



- 干渉波はヌルにより除去される

干渉除去動作

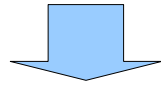
到来角広がり > ビーム幅



- アンテナ指向性に顕著なビーム・ヌルはなし
- 干渉波は合成により除去される

COST273 モデル

- スペクトルモデルは単純すぎる
- 決定論的モデルは汎用性に欠ける



クラスタで1回反射を考慮した確率モデル

信号処理

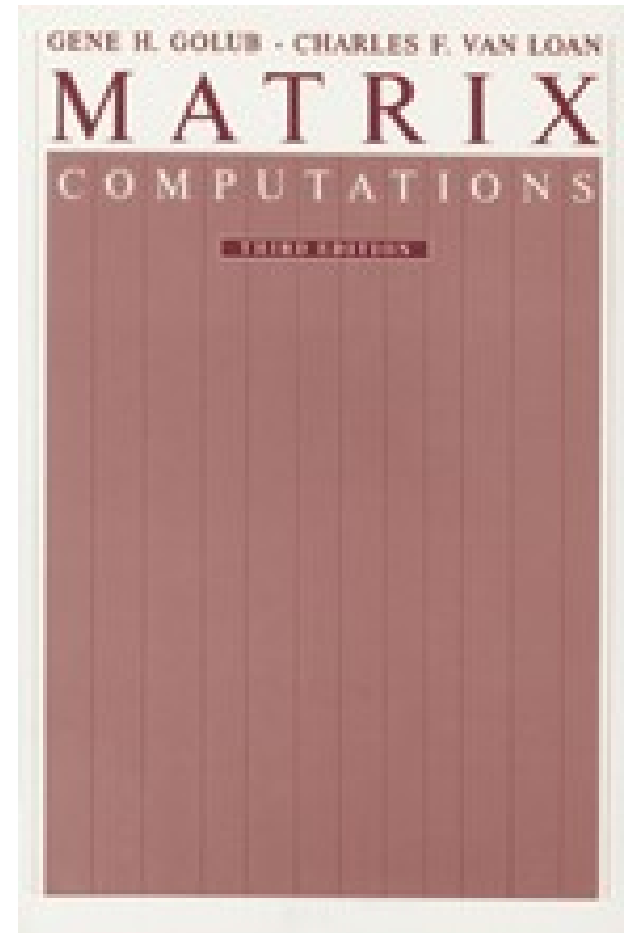
もともとはサウンドのパラメタ推定から始まった

- サブスペース法: 阪口君から多くを学ぶ
 - Matrix Pencil
 - MUSIC
 - ESPRIT
- ML法
 - SAGE

Matrix Computation

G.H. Golub and C.F. Van Loan,
Matrix Computations, 3rd
eds., Johns Hopkins
Univ. Press, 1996.

- Read in joint seminar with Araki Lab.
- Too tough, but too precious



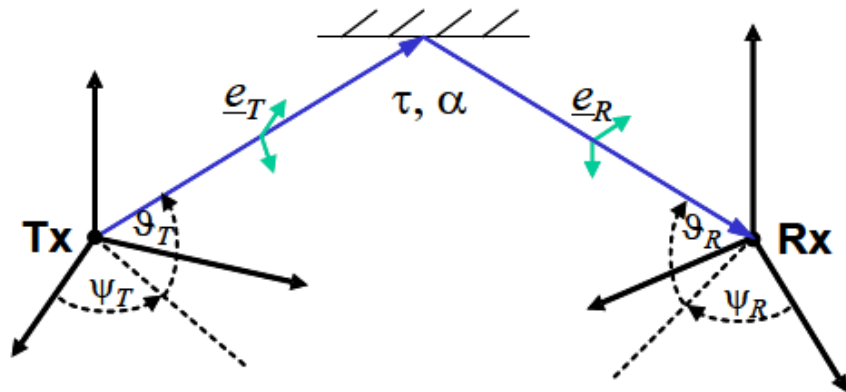
果たしてどちらをやりたかったの だろうか？

- 「方式のための伝搬」(確率モデルの構築)を
狙っていたはずなのにいつも各論になってしまう。
 - 興味の問題？
 - アプローチの問題？
- 「置局のための伝搬」(決定論的伝搬予測)は
思っていたよりニーズが多い
 - 照会があるのも圧倒的にこちらが多い
 - タイミングの問題

時空間チャンネルサウンディング

- Double directional model
- 散乱物体の特定
- 広がるフィールド
- パラメタ推定

Multidimensional data model



α : Doppler shift

τ : TDOA

ψ_R, ϑ_R : DOA

ψ_T, ϑ_T : DOD

$\gamma_p = \begin{pmatrix} \gamma_{\psi\psi_p} & \gamma_{\psi\vartheta_p} \\ \gamma_{\vartheta\psi_p} & \gamma_{\vartheta\vartheta_p} \end{pmatrix}$ path weight matrix

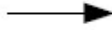
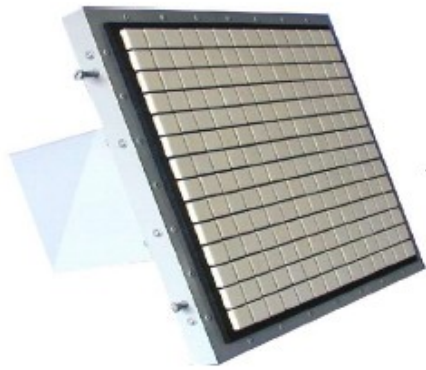
A path can be parameterized as follows

$$\mathbf{H}_\delta(\alpha, \tau, \psi_R, \vartheta_R, \psi_T, \vartheta_T) =$$

$$\sum_{p=1}^P \gamma_p \delta(\alpha - \alpha_p) \delta(\tau - \tau_p) \delta(\psi_R - \psi_{R_p}) \delta(\vartheta_R - \vartheta_{R_p}) \delta(\psi_T - \psi_{T_p}) \delta(\vartheta_T - \vartheta_{T_p})$$

→ Need multidimensional channel sounder

RUSK Fujitsu



RF ↓ ↑ MC

RF ↑
Multiplexing control :MC ↑



IF ↓ RFT ↓ Syn



PTS

Onsite analysis software

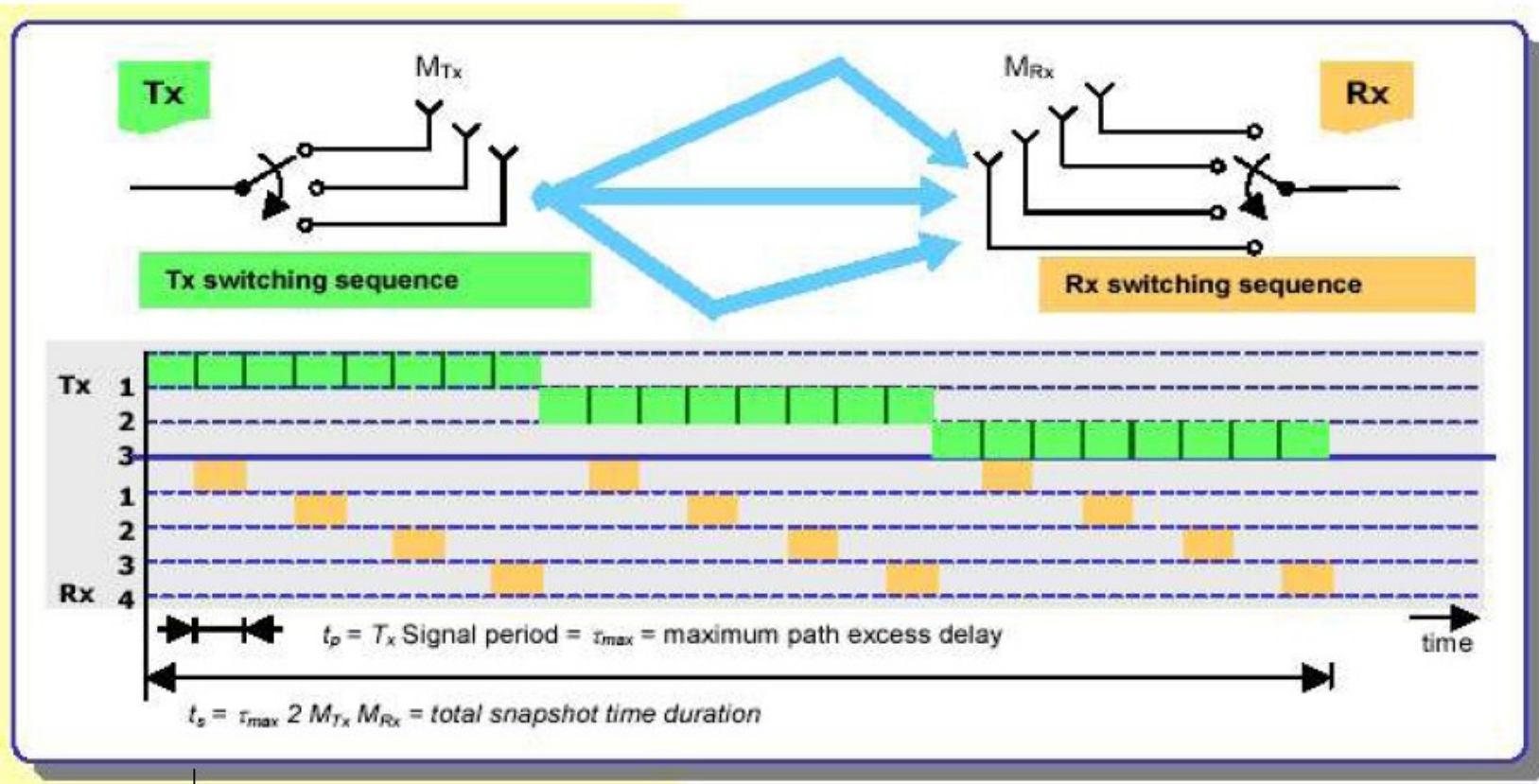
- Off-line
- MATSYS
 - RIMAX



DRU

Measurement Principle

RUSK Fujitsu sounder switching time frame



↓ One MIMO snapshot

Double Directional Channel Model

- どこまでパラメタを減らすか？
 - COST273モデルはパラメタが多すぎる
- クロネッカモデルと偏波
 - 現存モデルは偏波と指向性の違いを混同
 - Full polarimetric測定による検証が必要
- クラスタのモデル化
 - 周辺散乱
 - 遠方クラスタ

散乱物体の特定

- 正規反射・正規回折以外のメカニズム

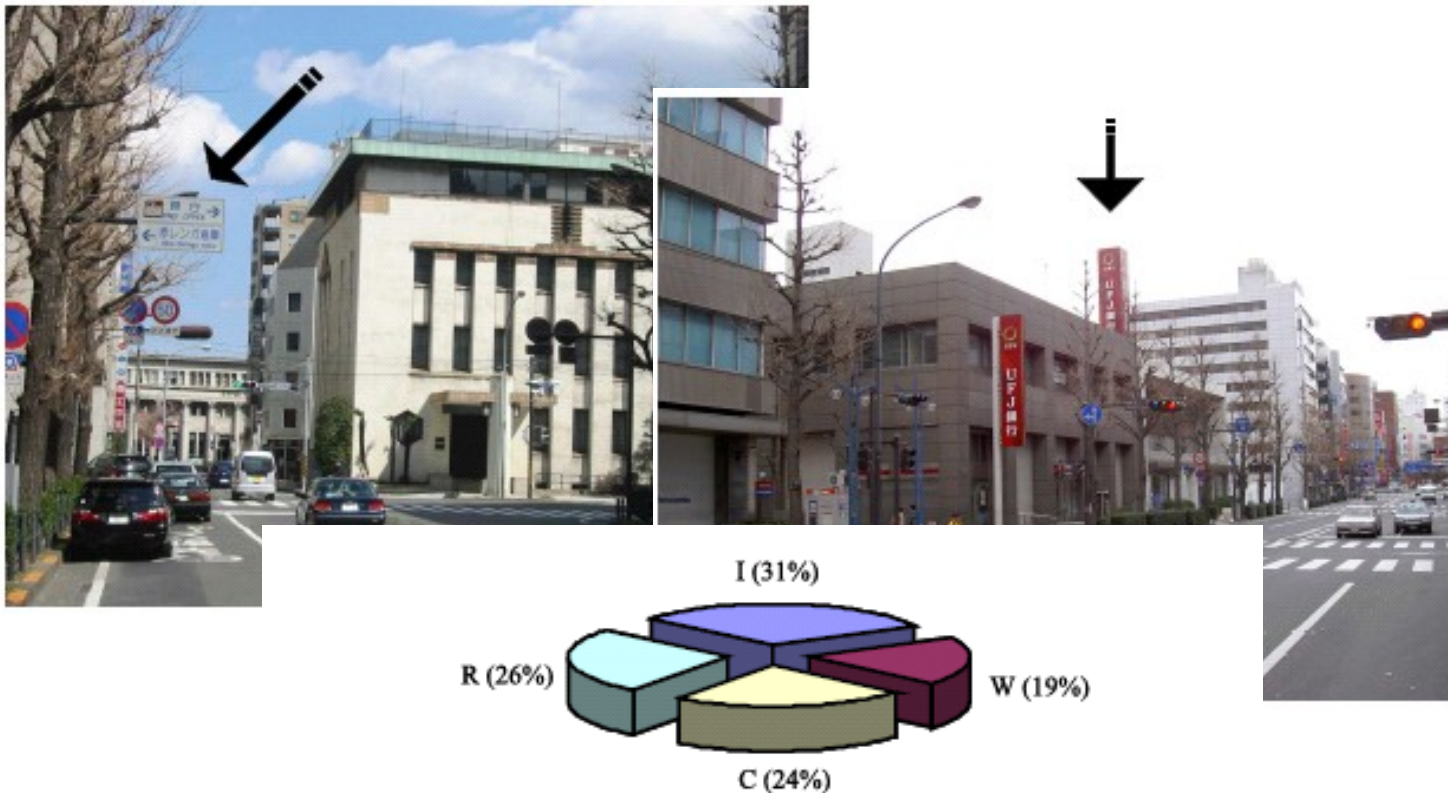
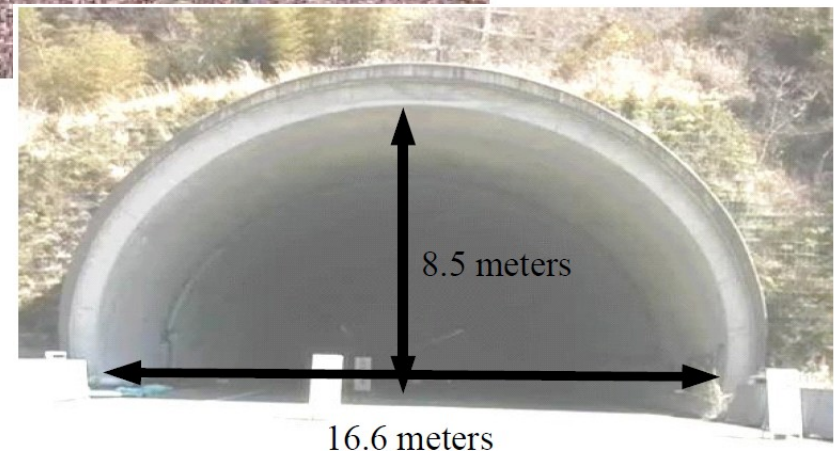


Fig. 16. Non-LoS power contributions averaged for the 2 points without any specular wall reflections, I: identified objects scattering, W: wall reflections, C: clustered multireflected received waves, R: remained power.

広がるフィールド

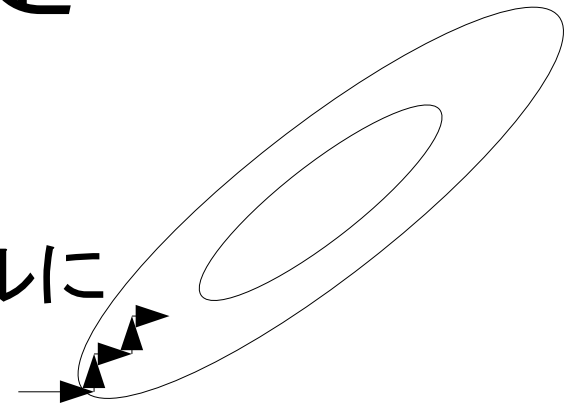
- マクロセル
- マイクロセル
- 屋内
- 近距離
- 森林
- トンネル
- 車内



パラメタ推定

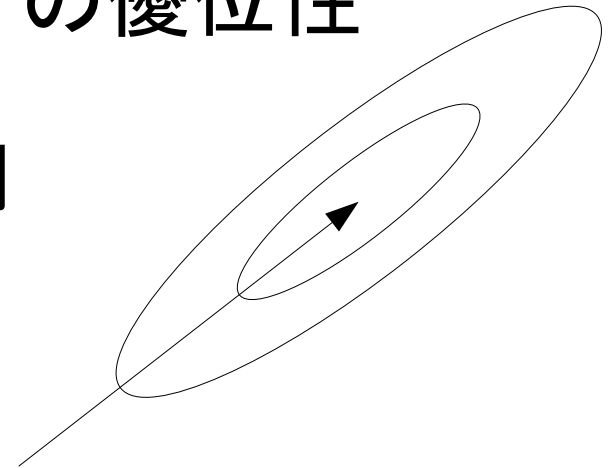
- 行き詰るSAGE

- 多次元サーチをシーケンシャルに
- サーチの効率の悪さ
- 初期値に依存



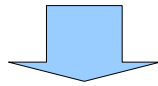
- RIMAX (MEDAV/Ilmenau) の優位性

- 評価関数の解析的表現
: アレー応答の固有関数展開
- 圧倒的な処理時間の違い
- ブラックボックスの恐怖
 - ソースの開示なし



パラメトリックモデル

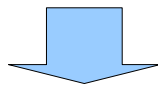
- アンテナと伝搬を切り離す (de-embed)



- パラメトリックモデル: 現在は幾何光学波

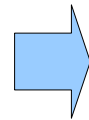
$$\mathbf{H}_\delta(\alpha, \tau, \psi_R, \vartheta_R, \psi_T, \vartheta_T) =$$

$$\sum_{p=1}^P \gamma_p \delta(\alpha - \alpha_p) \delta(\tau - \tau_p) \delta(\psi_R - \psi_{R_p}) \delta(\vartheta_R - \vartheta_{R_p}) \delta(\psi_T - \psi_{T_p}) \delta(\vartheta_T - \vartheta_{T_p})$$



- 幾何光学モデルの妥当性は？

- 位相停留点による近似(フェルマの原理)
- 分離不可能な停留点が無数にある場合
- 停留位相の近似が不可能な場合



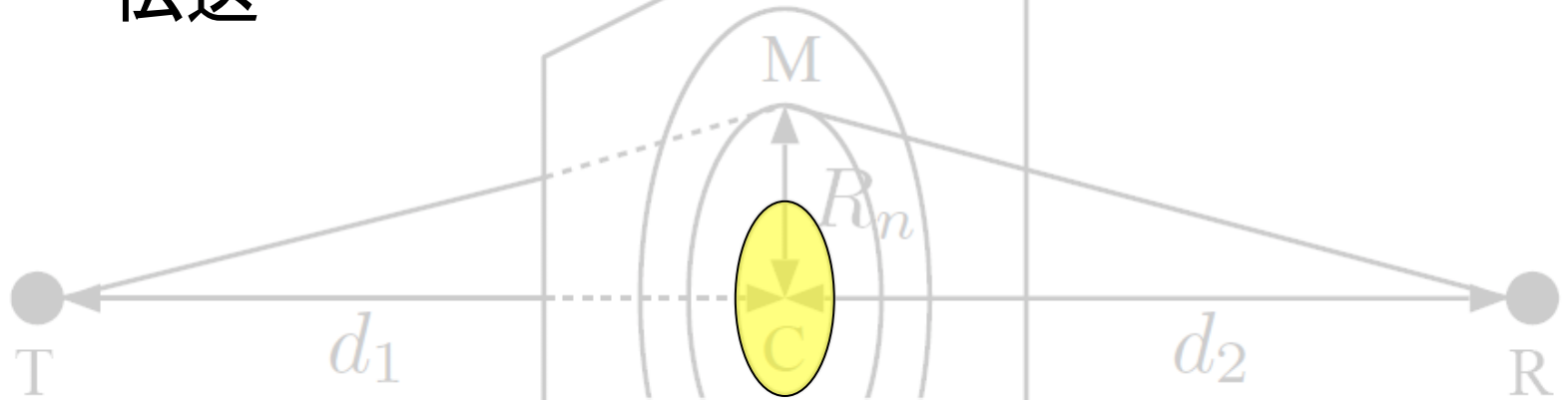
どうする？

シミュレーション

- レイトレースの挫折
 - ソフトウェア資産引継の難しさ
 - ソフトウェアベンダーと協力
- 幾何光学以外のシミュレーション
 - 物理光学
 - RCSモデル
 - 第1フレネルゾーンの遮蔽

見通しの定義

- 第1フレネルゾーンが遮蔽されていないこと
- エネルギーの大半が第1フレネルゾーン内を伝送



$$\sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

例:
21GHz / 100mの中間点
⇒ 2.7m

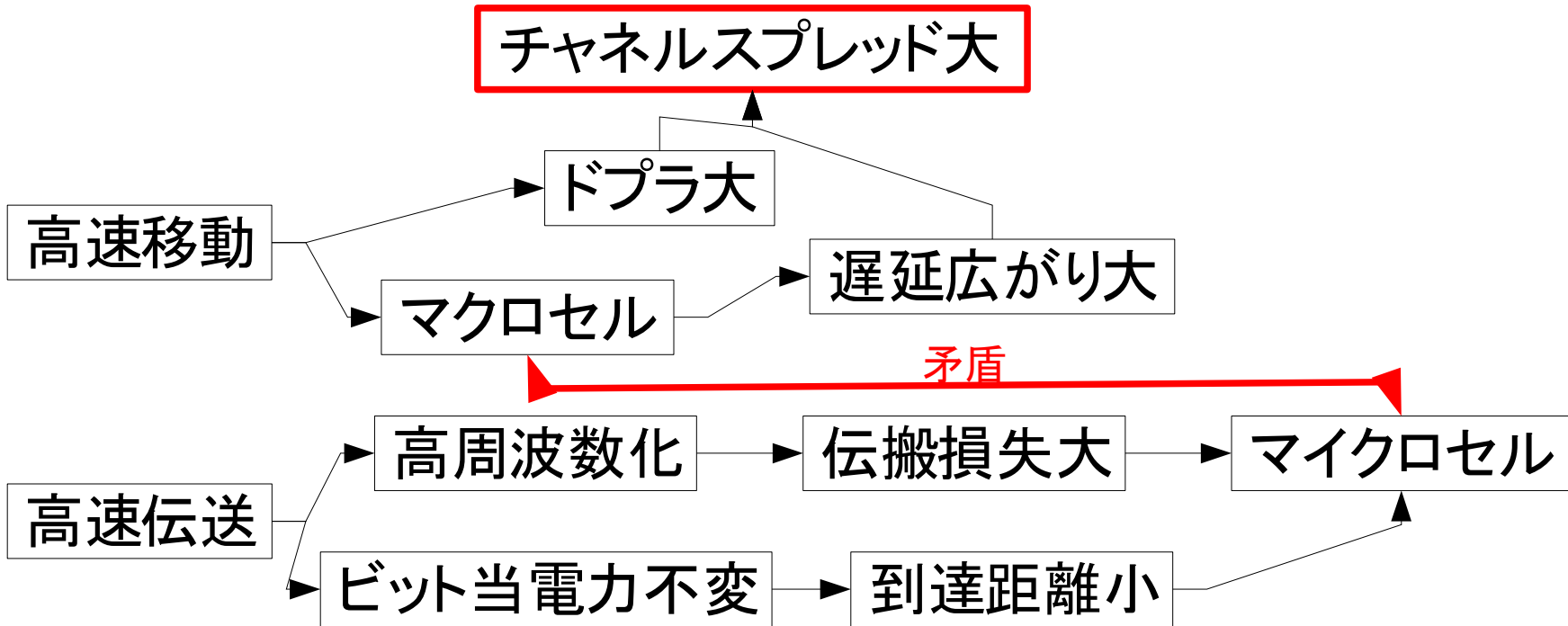
未来 — 今後の研究計画 —

引き続き伝搬をやるとすればどこが狙い目か？

あるいは引き際も考えるのか？

4G/5G/...

最先端技術への挑戦



別の考え方はないのか？

- ユビキタス：高速より遍在性
- マルチホップ：高速伝送のオルタナティブ
- コグニティブ無線：
単一システムの必然性なし，周波数有効利用
- セルラ事業：
ピークレートより切れない(カバレッジ・アウトージ)

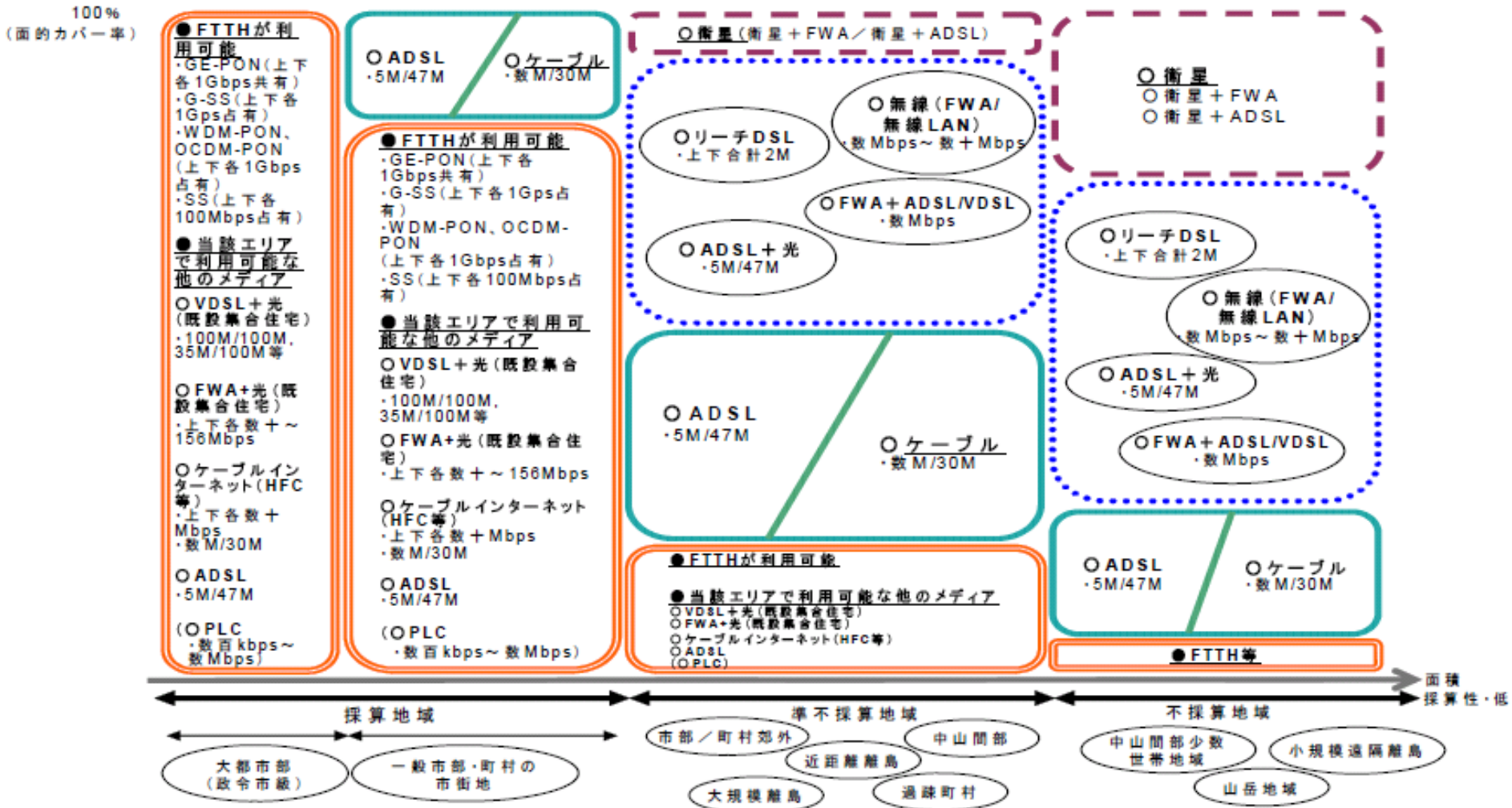
違う応用分野

- UWB
 - ライセンスフリー
 - 近距離超高速伝送または超低電力伝送
- ルーラル
 - FWA
- ミリ波
 - FWA
 - 近距離高速伝送

ルーラル無線

- ピークレートよりカバレッジ
- 本当に無線しかソリューションがないところ

2010年における次世代ブロードバンド整備の青写真(総務省)



IEEE 802.22

- ルーラル地域のブロードバンド無線アクセス
- 空いているテレビチャンネルを利用(VHF/UHF)
- P-MPシステム
- 下り: 1.5 Mbit/s/ユーザ
- 上り: 384 kbit/s/ユーザ
- カバレッジ: 平均 33 km / 最大 100 km
 - WiMAXではカバーできない広さ
- コグニティブ無線技術の導入
 - 空きチャンネルの検出

ミリ波

- 直進性
 - 光に近い陰日向
- アンテナ
 - 指向性はあって当然
 - 筐体シャドウイングの影響も大

伝搬的課題

- 空間多重に対する考え方が異なる
- アンテナ特性とスプレッドパラメタ