

アンテナ素子およびアレーアンテナ —物理的制約と可能性—

電子情報通信学会 通信ソサイエティ大会
パネル討論 「ソフトウェア無線の理論的面白さと実用化の課題」
2001年9月18日

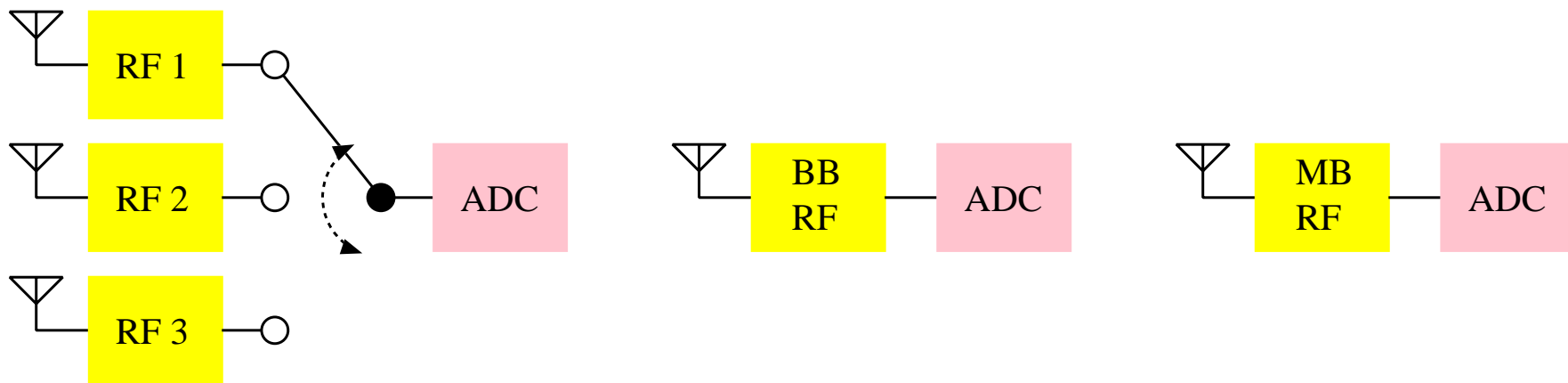
高田潤一

東京工業大学

ソフトウェア無線におけるアンテナの位置付け (1)

広帯域性 ~ RF のアーキテクチャに依存

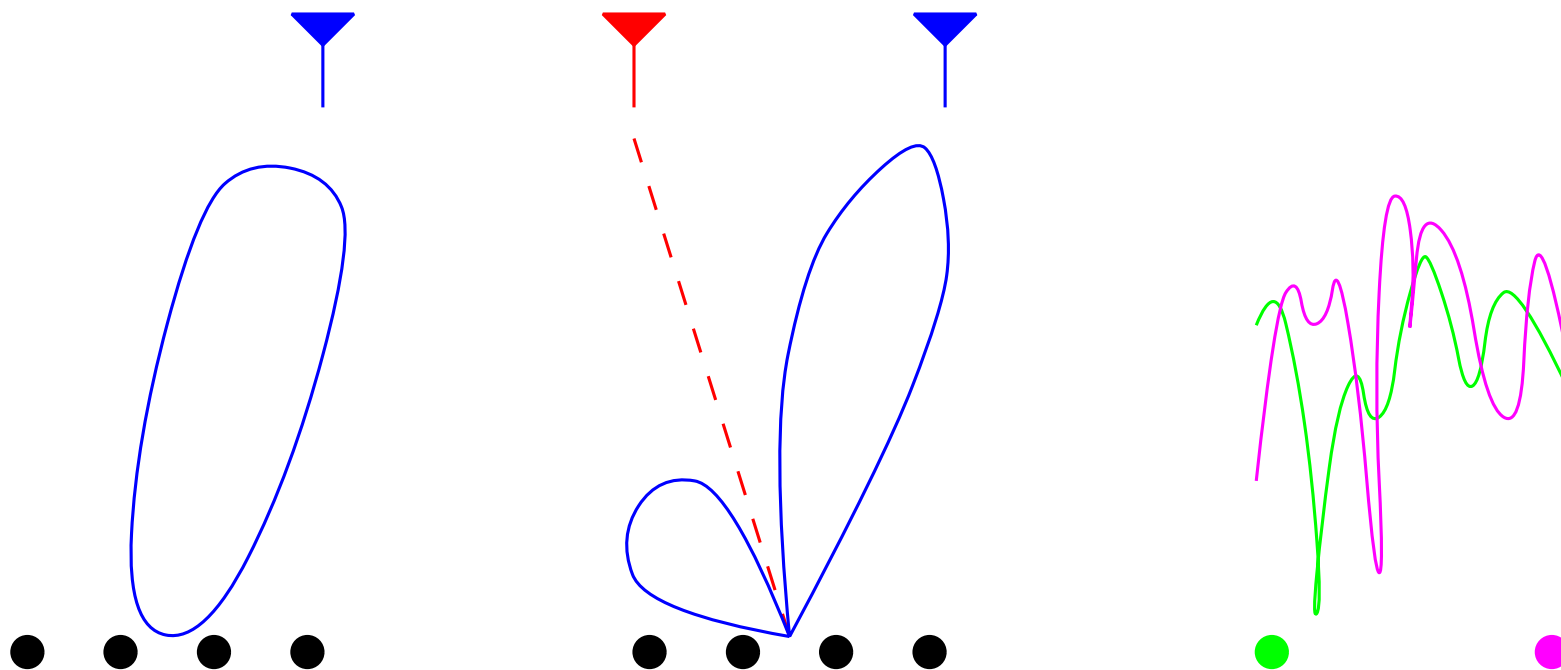
モジュラー無線機？ 汎用無線機？ 多モード無線機？



ソフトウェア無線におけるアンテナの位置付け (2)

高性能性 ~ アレー信号処理の出入口

ビームフォーミング? ヌルフォーミング? ダイバーシチ?



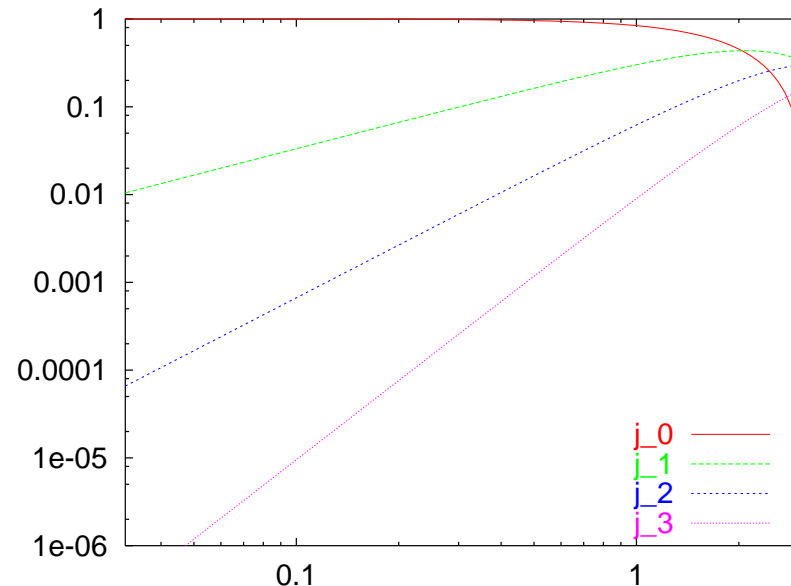
本発表の内容

ソフトウェア無線という切り口から見たアンテナの限界と可能性

- 小型（小形）アンテナの理論
- 広帯域アンテナ
- アレー信号処理と電波伝搬

小型アンテナ ～ 球面調和関数の理論 (1)

- 任意アンテナの放射電磁界 = 球面調和関数 (ハンケル関数) の一次結合
- 展開係数 = 電流分布と球面調和関数 (ベッセル関数) の内積



$j_0(ka)$ 以外はカットオフ特性を示す ～ 小型アンテナは単一モード励振

小型アンテナ ~ 球面調和関数の理論 (2)

- 球面調和関数の形式

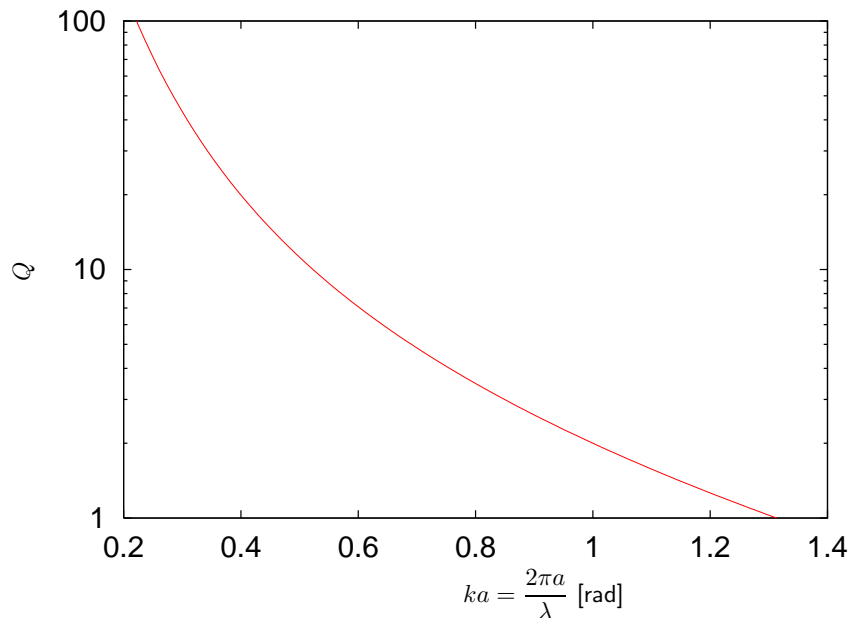
$$h_n(k) P_n^m(\cos \theta) \exp(m\phi)$$

条件: $|m| \leq n \sim n = 0$ なら $m = 0$ i.e. 無指向性

小型アンテナ

～ 単一モード励振アンテナの帯域特性

$$Q = \frac{1 + 3(ka)^2}{(ka)^3 \{1 + (ka)^2\}}, \quad a \text{ はアンテナを包含する球の半径}$$



アンテナが十分小 \Rightarrow アンテナの大きさと帯域幅は反比例

広帯域アンテナ

定義

ここでは「入力インピーダンスが周波数によらず一定の特性を示す」アンテナと定義し、指向性の変化の有無には注目しない。

種類

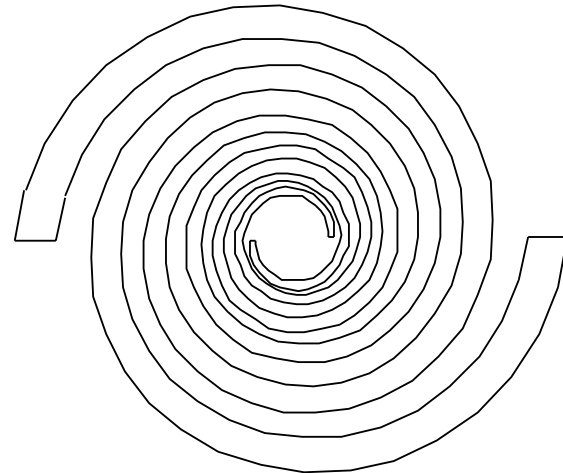
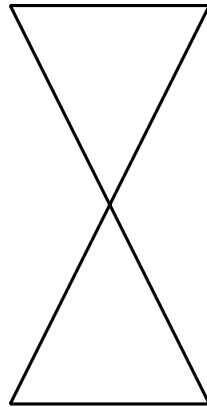
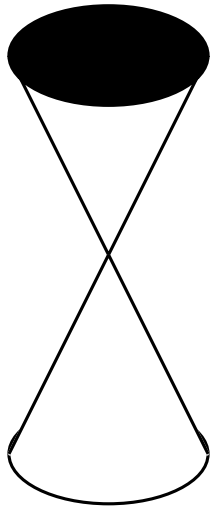
自己相似アンテナ スケールを変えても形状が変化しないアンテナ

自己補対アンテナ 導体部分と空隙部分部分が同一形状のアンテナ

いずれのアンテナも理想的には無限の大きさが必要

自己相似アンテナ ~ 連続的自己相似

例：バイコンカルアンテナ，ボータイアンテナ，等角スパイラルアンテナ



理想 無限大 ~ 無限帯域で定インピーダンス

現実 機械的制約

上限：微細加工の精度

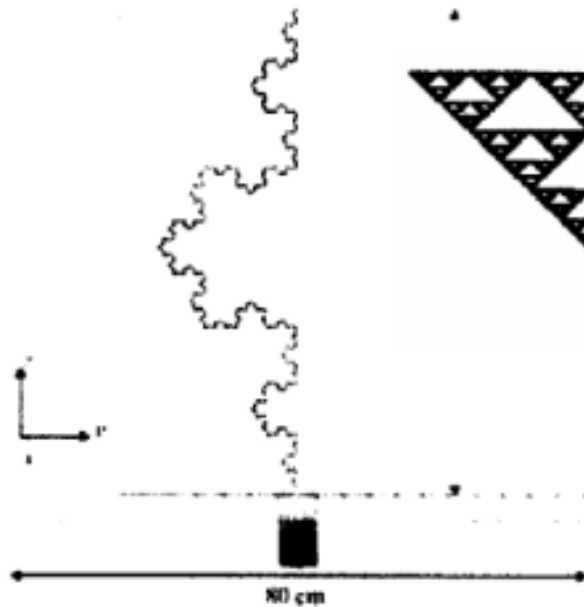
下限：進行波が十分に減衰する大きさ ~ 波長よりかなり大きい

自己相似アンテナ ～ 離散的自己相似 (1)

フラクタルアンテナ

コッホ曲線

シェルピンスキー・ガスケット



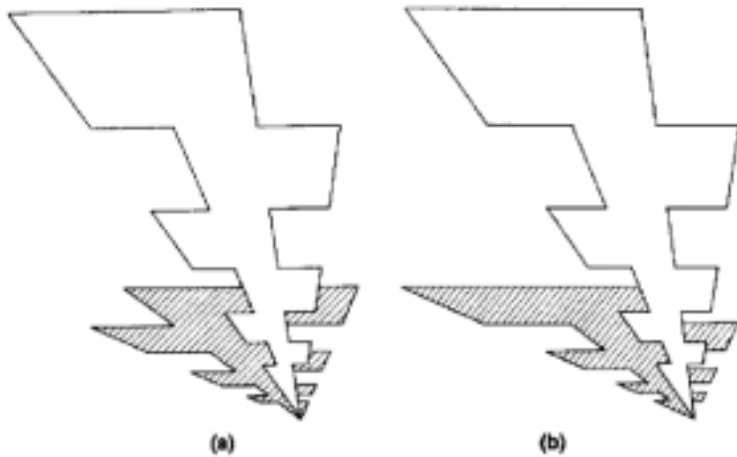
[1] Baliarda et.al. IEEE Trans. AP-48, 5, 713-718, May 2000.

[2] Baliarda et.al. IEEE Trans. AP-48, 11, 1773-1781, Nov. 2000.

自己相似アンテナ ～ 離散的自己相似 (2)

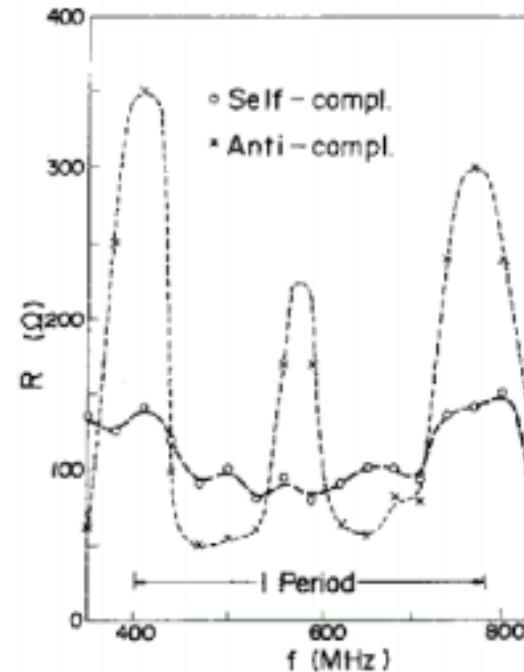
対数周期アンテナ

自己補対でない離散的自己相似アンテナは
広帯域特性でなく多周波特性を示す



自己補対

反補対



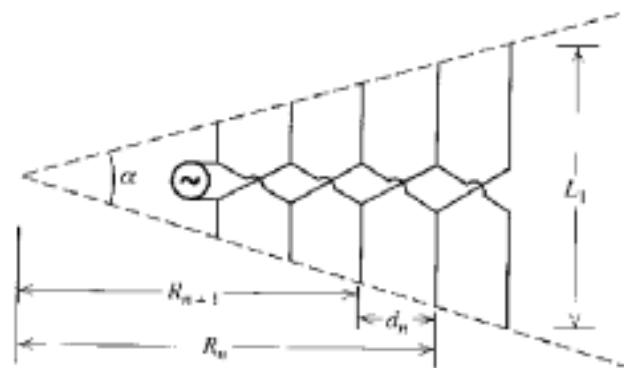
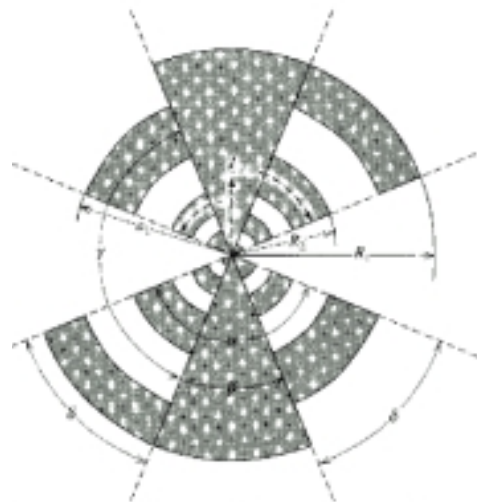
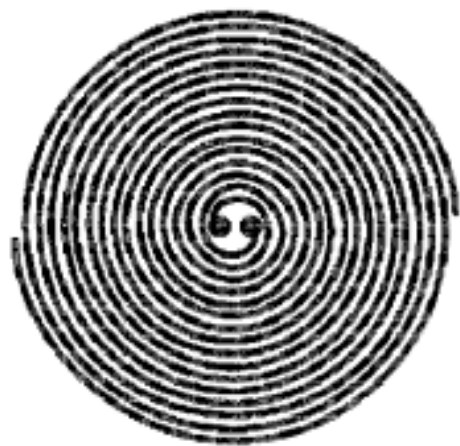
自己補対アンテナ ～ 虫明の定理

自己補対アンテナのインピーダンスは一定

- どのような電流分布になるかは言及せず

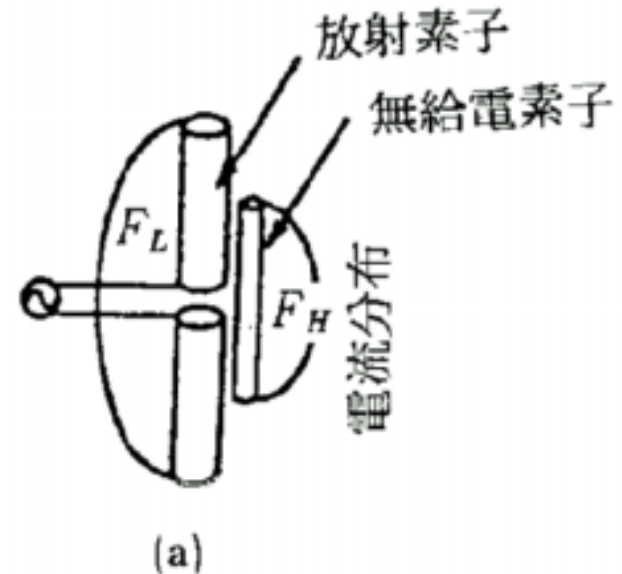
点対称 スパイラルアンテナ
明確な共振構造はなく
進行波が励振

線対称 対数周期アンテナ
明確な共振構造がある



多周波アンテナ

- 複数の共振構造を混在させて多周波で整合
- 大きさは最低動作周波数における半波長程度
- 一般的な設計理論より経験則？



広帯域アンテナと多周波アンテナ

どっちがいいの？

- マルチモードシステムなら多周波アンテナ
- 汎用システム（監視受信機など）なら広帯域アンテナ

アレー信号処理と電波伝搬 ～ アダプティブアレーアンテナ

- 環境に適応しアレーアンテナの出力（送信 / 受信）を最適合成するシステム
- アンテナだけでなく，電波伝搬，通信方式，信号処理を含んだ広い学問分野

アレー信号処理と電波伝搬

～ アレーウェイトの制御方針

参照信号波形を用いた制御 合成出力との平均 2 乗誤差を最小とする．

- TDD システムに適．
- FDD システムであれば，双方向は独立な制御もしくはフィードバックが必要

到来方向を用いた制御 最初に希望波および干渉波の到来方向を推定し，つぎに希望波にビームを干渉波にヌルを向ける．

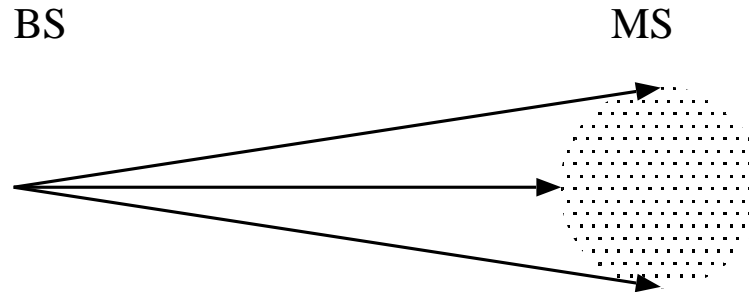
- FDD システムであれば現実的な方法．
- 必ずしも最適ではない．

ブラインド制御 信号の定包絡線性や周期定常性を利用し，波形そのものは利用しない．

- 希望波と干渉波の識別に難．

アレー信号処理と電波伝搬 ~ 多重波環境

典型的なマクロセル環境の空間フェージングモデル



基地局 (BS) 到来波は限定された角度広がりをもつ。

移動局 (MS) 周囲のあらゆる方向から到来する。

アレー信号処理と電波伝搬

～ アレー信号処理における時定数と平均値

スナップショット 1回の観測．雑音も信号も伝達関数も，ある実現値で定数．

瞬時平均 フェージングが静止していると見なせる．雑音および信号は平均化されるが，伝達関数はある実現値で定数．
⇒ 通常の適応アルゴリズムに使用．

短時間平均 フェージングが定常過程に従うと見なせる．伝達関数も平均化される．
⇒ ダイバーシチ特性評価などに使用．

長時間平均 フェージングが非定常，すなわちシャドウイングや伝搬損失が変化する．
⇒ 通常は使わない．

アレー信号処理と電波伝搬

～ アレー信号処理的にみた伝搬モデルの分類

単一到来信号に対するアレー出力の短時間平均相関行列の階数

- 階数 1 全素子が同様のフェージングを受ける
 - ～ 到来方向の推定, ビーム / ヌルが可能
- 階数 2 以上 独立なフェージング成分を含む
 - ～ ダイバーシチ合成 (MRC, MMSE) が可能

アレー信号処理と電波伝搬 ～ 基地局アレーアンテナ

$$\text{階数} \simeq \min \left[\text{アレー素子数}, \text{int} \left(\frac{\text{角度広がり}}{\text{ビーム幅}} \right) \right]$$

アレー信号処理と電波伝搬 ～ 移動局（携帯機）アレーアンテナ

- アレーアンテナ = 同一素子の既成観念は捨てよう。
- PDC 携帯機にはアンテナが2本。
- 大抵はフルランク ~ さもなくばダイバーシチ効果なし
- 単なる MRC ダイバーシチだけでなく MMSE ダイバーシチも可能

モノポール 2 本 近ければ相互結合により指向性が異なり，
遠ければ空間相関が下がる

モノポールと内蔵アンテナ 指向性・偏波が異なる