

無線の歴史と今後

唐沢 好男

(電波COEプロジェクトメンター)

講演の話題 4点

1. 電磁気学から無線へ
2. 電波の働き
3. 無線情報伝送の物理限界
4. 未来の電波利用:その考え方

1. 電磁気学から無線へ(18世紀～)

キャベンディッシュ

クーロン

アンペア

ファラデー

マックスウェル

ヘルツ

マルコーニ

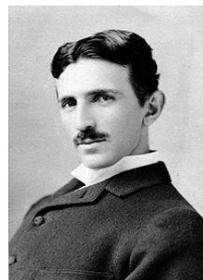
テスラ

短距離無線通信

長距離無線通信(電離層反射)

対流圏散乱通信

無線電力伝送



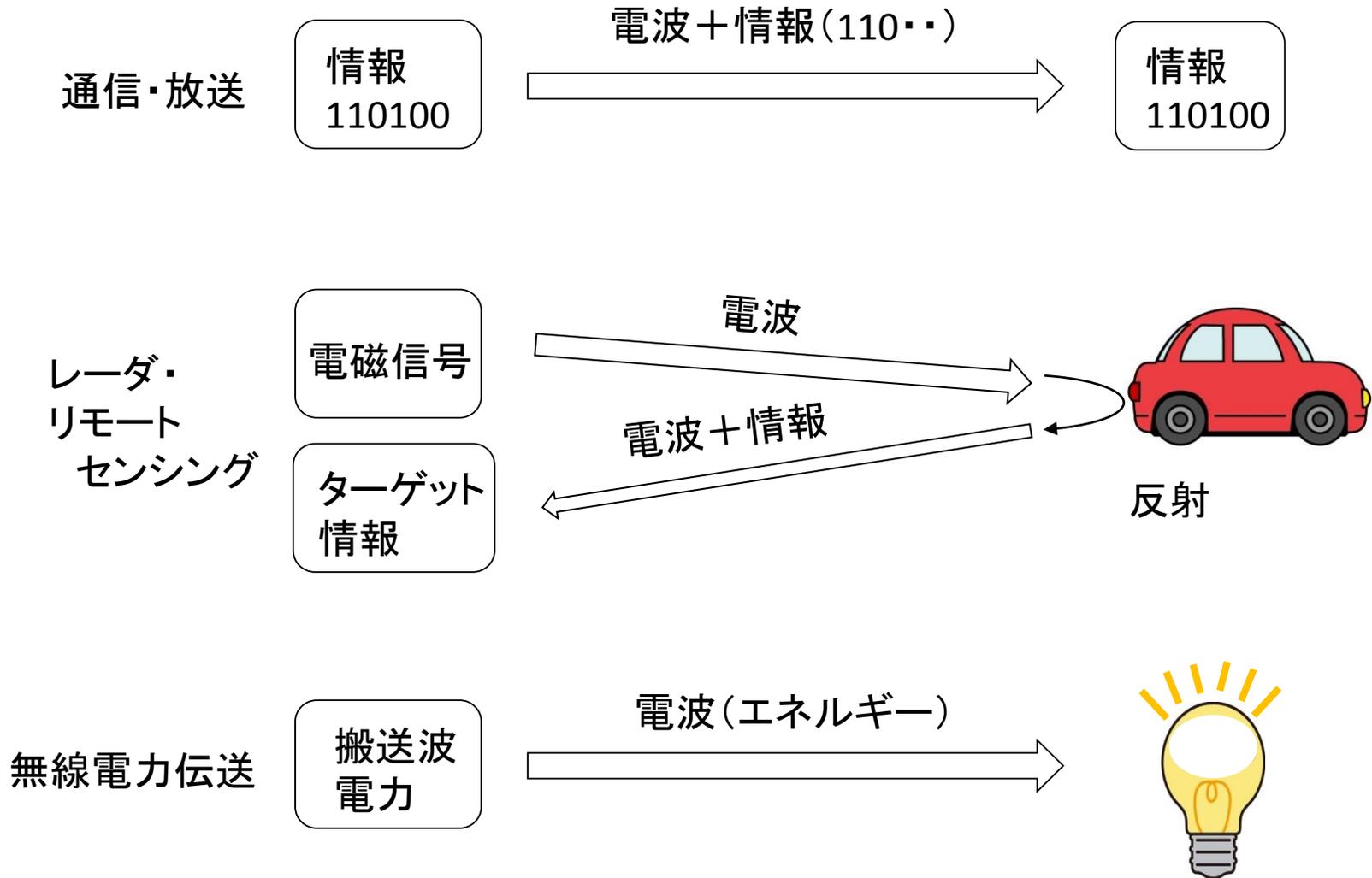
このうち、下線の偉人を、教科書「電波システム工学」(信学会/コロナ社)のコラムで紹介

【マックスウェルとキャベンディッシュ】

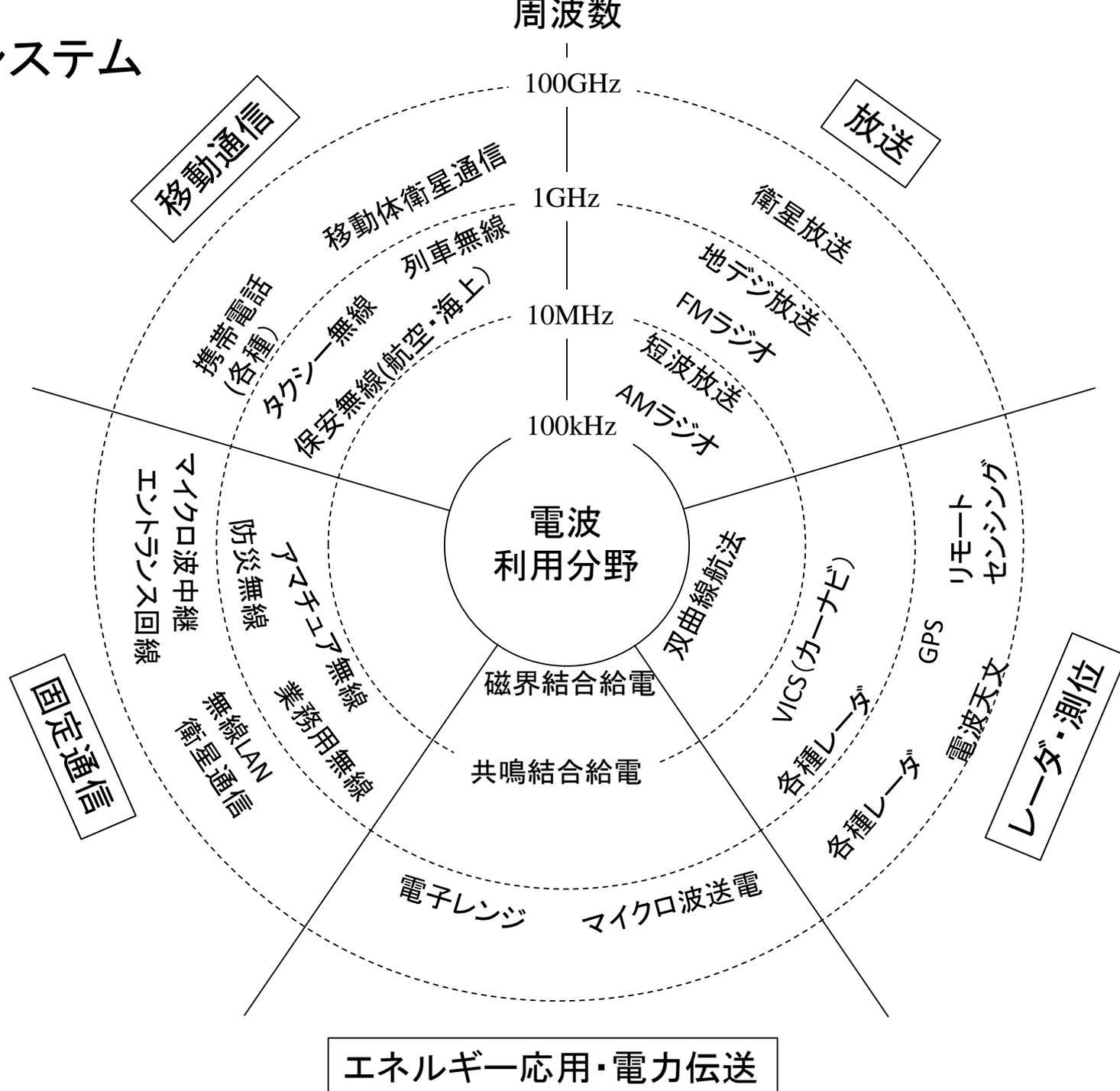
電磁気学を完成させたマックスウェル (James Clerk Maxwell, 1831- 1879) は、英国エジンバラの大地主の跡取りとして生まれ、ケンブリッジ大学を卒業した。マックスウェルはこのような恵まれた環境の中で、その才能を十分伸ばすことができた。マックスウェルの神童ぶりを表すエピソードは数多くあるが以下はその一つである。14歳のとき父親に連れられてエジンバラ王立協会の会合に出席した。美術と数学のかかわりについての講演を聴き、そこで提起された問題 (卵形曲線の描き方) に、自分ならできると、家に帰ってそのアイデア (多焦点作図法) を論文にまとめた。その論文を父親がエジンバラ大学の教授に紹介したところ、それを見た教授が、デカルトの方法を越えていると感心し、大学の紀要に掲載してくれたと言う。「梅檀は双葉より芳し」である。

マックスウェルの偉業は電磁気学を完成させたことにあるが、ここでは、晩年に取り組んだ別の偉業：壮大な発掘作業を紹介する。100年間人知れず埋もれていたイギリスのキャベンディッシュ (Henry Cavendish, 1731-1810) の電気学研究を5年間かけて掘り起こしたのである。キャベンディッシュは大富豪の家に生まれたが、人嫌いな性格から実験室にこもりきってひたすら科学実験を行った。しかしその結果を発表することはほとんど無く、彼の膨大なノート (手稿) の中に眠っていた。一族から先祖が残した未発表の遺稿を預かったマックスウェル (当時、キャベンディッシュ研究所の初代所長) はそのノートを読み解きながら彼の実験を次々と追試していった。そして驚いたことに、電磁気学の初期段階の重要な発見、例えば、クーロンの法則 (力の距離2乗に反比例) も、クーロンより10年以上前に見つけていたのである。生理学的検流形 (電流を自分の体に流してその痺れ具合で電流の強さを判定：精度は結構確かだったらしい) を用いたオームの法則も然りである。もし、彼が結果を世に発表していたら、いくつかの法則はキャベンディッシュの法則となっていたであろうと言われている。マックスウェルは物理学だけでなく、科学史の領域においても大きな貢献をしたのである。

2. 電波の働き



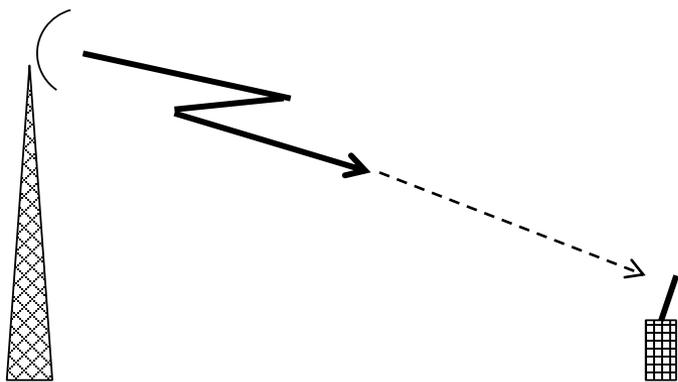
電波システム



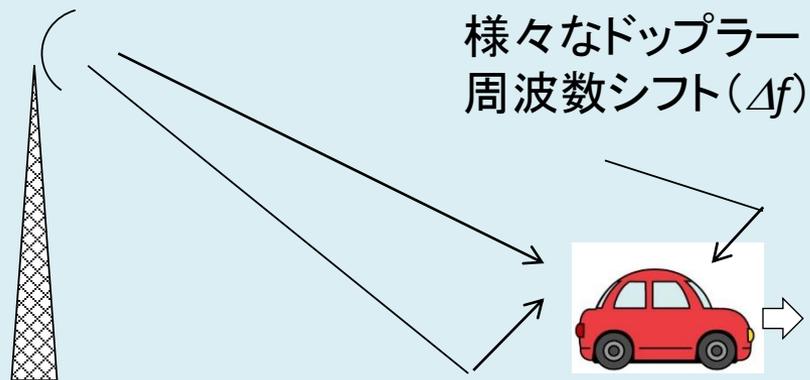
3 無線情報伝送の物理限界

伝送に誤り(ビットエラー)が起きる原因

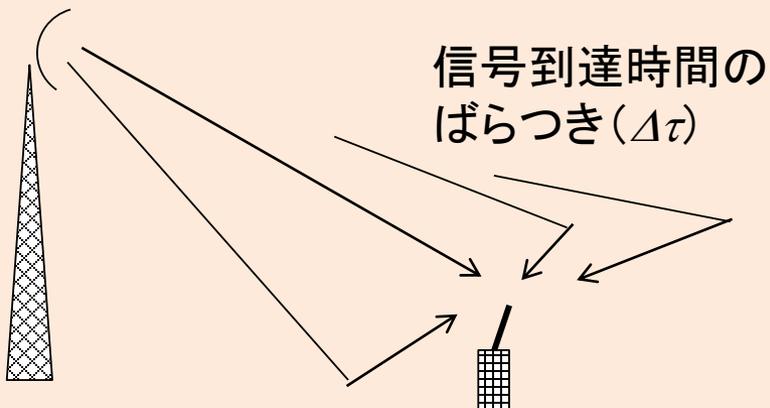
① 電波が弱い(雑音問題)



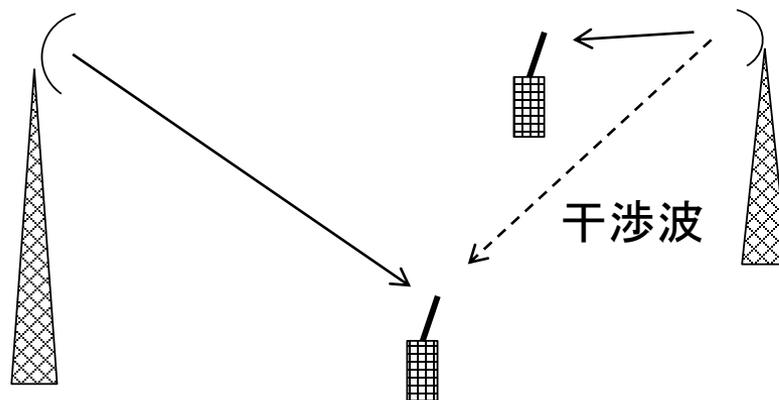
② 信号が動く(ドップラー問題)



③ 波形が歪む(遅延問題)



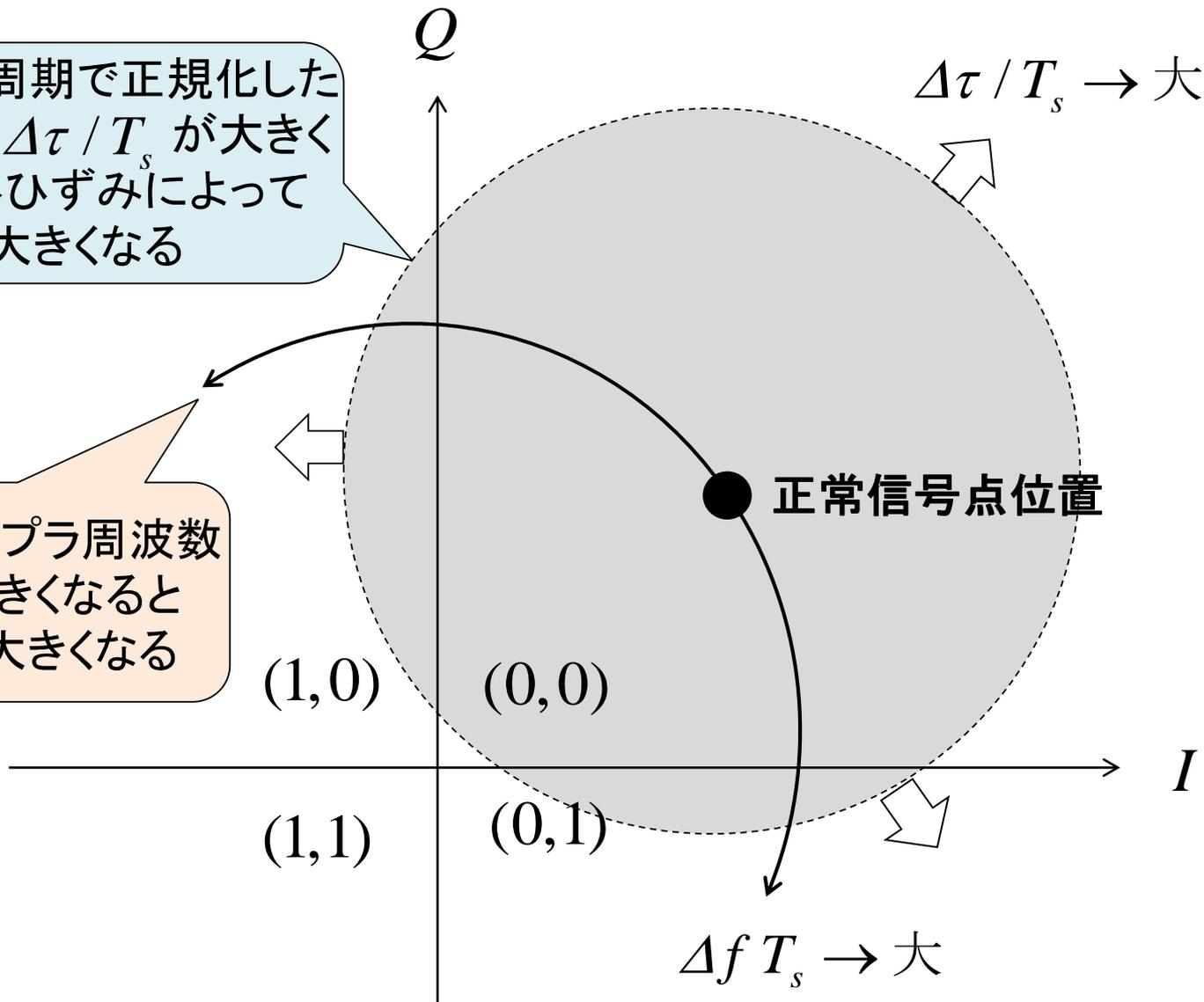
④ 邪魔が入る(干渉問題)



マルチパスフェージングを受けると(QPSKの場合)

③シンボル周期で正規化した遅延広がり $\Delta\tau / T_s$ が大きくなると、波形ひずみによってこの領域が大きくなる

②正規化ドップラ周波数 $\Delta f T_s$ が大きくなると位相変動が大きくなる



T_s : 変調信号のシンボル周期

Δf : 最大ドップラー周波数

$\Delta\tau$: 遅延のバラつき

波形歪が起きない条件 $\Delta\tau / T_s \ll 1$

位相変動が起きない条件 $\Delta f T_s \ll 1$

条件が満たされない場合、それぞれに対策がある。

ただし、対策の方向が相反する。

ゆえに、両方が同時に問題になるとき、手の打ち様がない。

ここに、伝送の物理限界が現われる

情報伝送の条件 $\Delta f \Delta\tau \ll 1 \rightarrow \Delta f \Delta\tau \approx 0.01$ 限界の目安値

(一例) パス長差 300mの遅延量 $\rightarrow \Delta\tau \approx 1 \mu\text{s}$

周波数30GHzで、200km/hで移動 $\rightarrow \Delta f \approx 5.5 \text{ kHz}$

$\Delta f \Delta\tau \approx 0.0055$ \leftarrow かなり限界に近づいてきている

「無線システムの進化の歴史は伝搬問題との戦いの歴史である」 7

4. 未来の電波利用: その考え方

- ① MIMOに学ぶ「世に受け入れられる秘訣」
- ② 力任せの伝送には限界がある
だましのテクニックをうまく使う(映像伝送に学ぶ)
- ③ 究極のワイヤレス通信(ベースバンド無線)
- ④ 精密計測に電波を(例: GPS測量(mm分解能))
- ⑤ 通りにくいところを通す
(空中→ 水中・海中・土中・体中・・・)

講演では
この3件

① MIMOに学ぶ「世に受け入れられる秘訣」

アダプティブアレーとMIMO

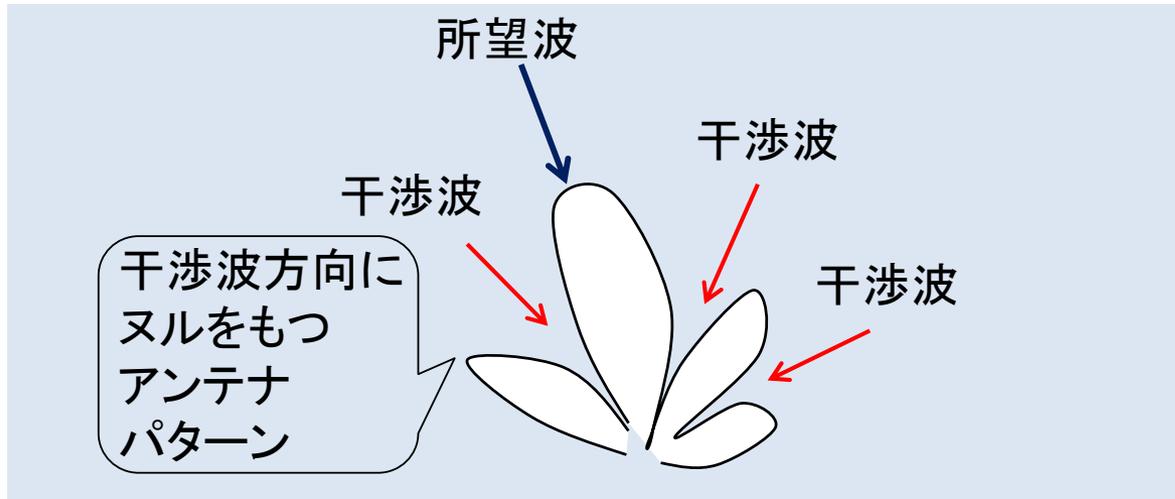
働きは理想的、でもなかなか実利用されないアダプティブアレー

構成の複雑さが嫌われる

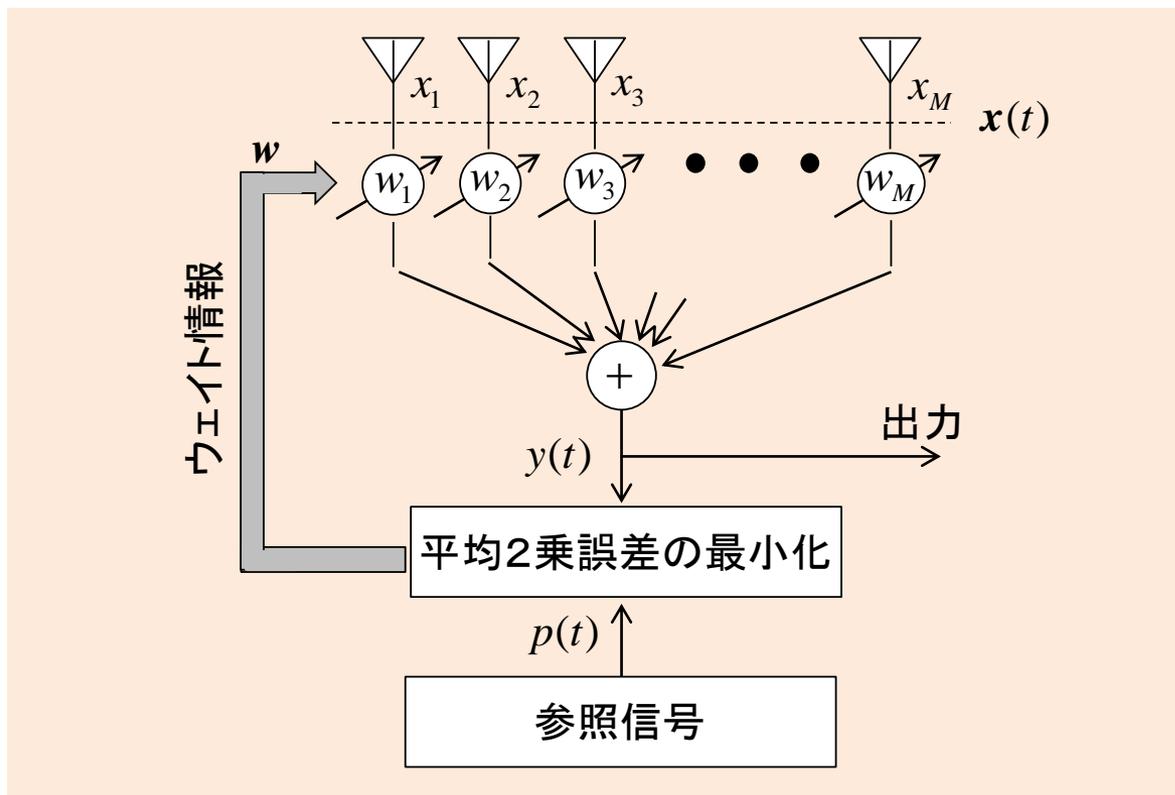
アダプティブアレーよりもっと複雑なMIMOが移動通信技術の花形になっている

この違いは何？

アダプティブアレーアンテナ(劣悪な電波環境に強い)



私が大学院生だったころアダプティブアレー研究の牽引者だった鷹尾和昭先生の授業を受けて、これは将来性のあるすばらしい技術と思ったが、それ以降も実利用の声が、なかなか聞こえてこなかった。

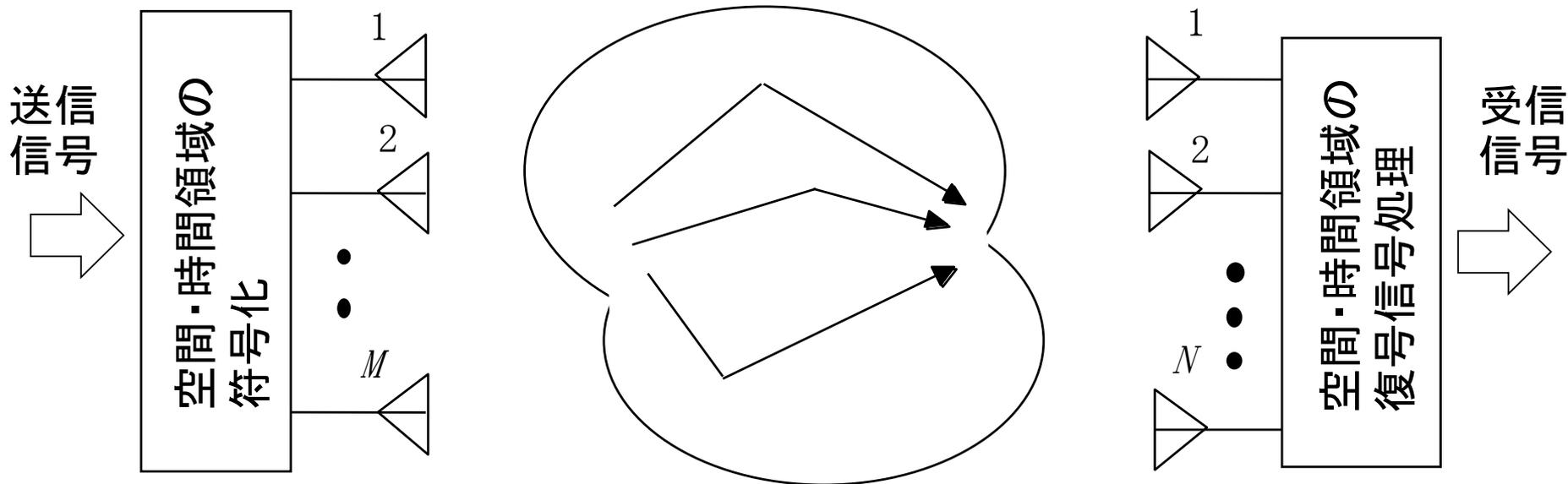


MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

送信アンテナ

マルチパス伝搬チャネル

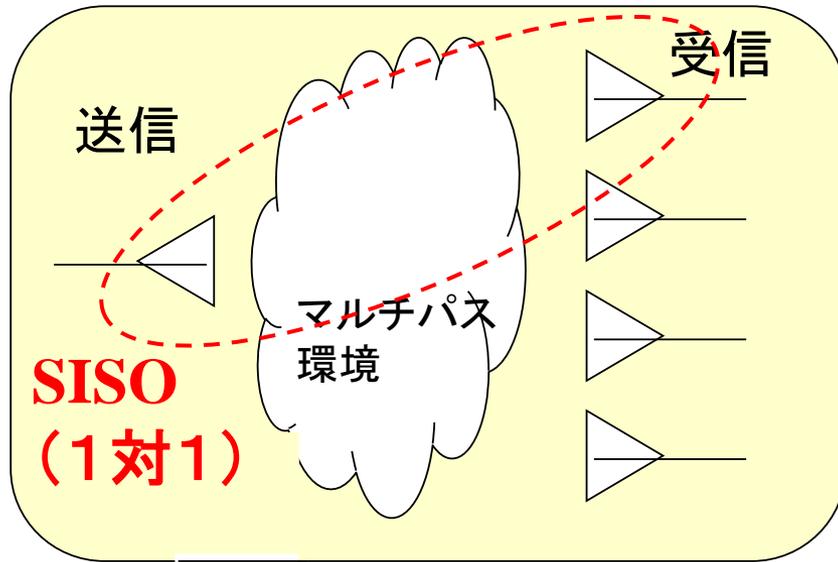
受信アンテナ



1990年代、アダプティブアレーより複雑さ倍増のMIMOが無線LAN
応用に注目されて実用化が進み、今では、移動体通信に不可欠
な技術となっている。

なぜ、MIMOは受け入れられたか？

SIMO (1対多)

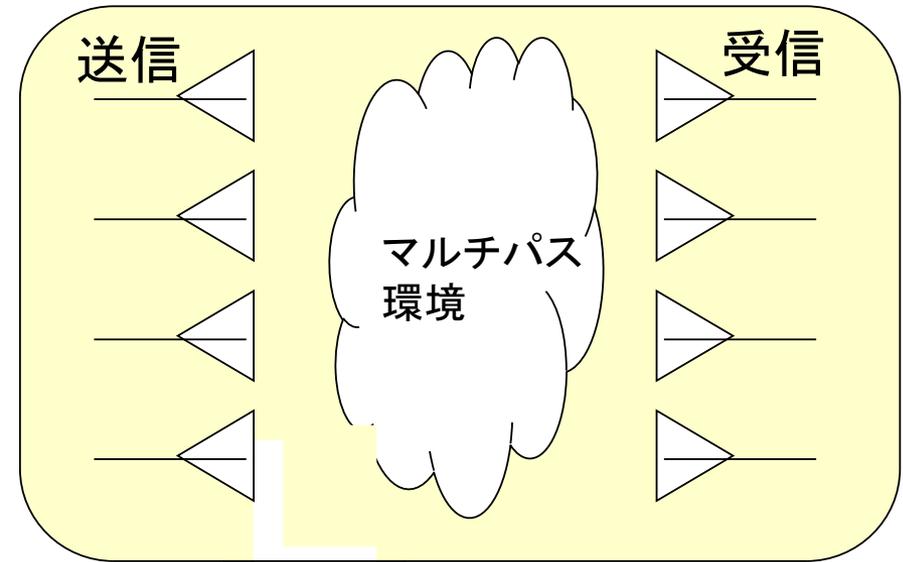


- 4素子ダイバーシチ
- 3つの干渉波除去 (アダプティブアレー)

困ったことを助けてくれる

1 → 0 → 1

MIMO (多対多)



- 16素子のダイバーシチ
- 3つの干渉波除去
- **4つのデータの並列伝送** (同電力・同帯域で4倍のスループット)

できなかったことができるようになる

1 → 4

vs

ヒット商品を生み出す秘訣

ネガティブ要因を克服する技術（代りがきく技術）

<< できないことをできるようにする技術
（代りがきかない技術）

時代： MIMOから Massive MIMO へ

アンテナ素子数が100 ~ 1000 の大規模アレー

その魅力は？

② 力任せの伝送には限界がある

だましのテクニックをうまく使う(映像伝送に学べ)

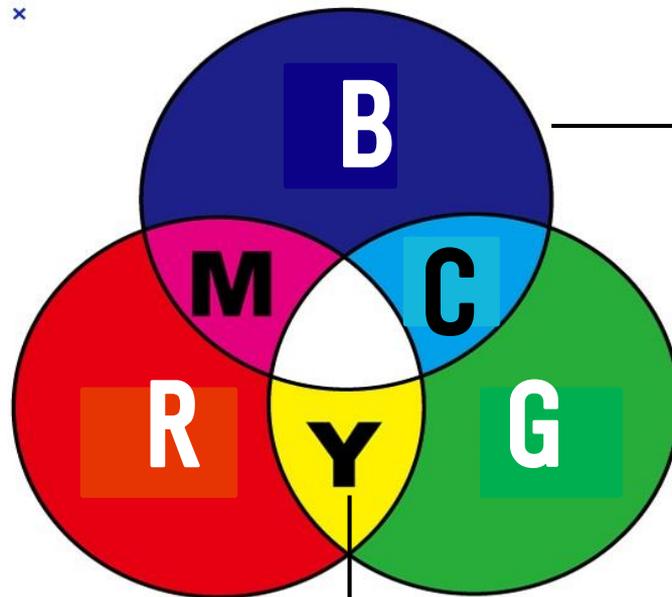
音声伝送と映像伝送の本質的な違い

共通： 情報(=帯域信号)を電波(キャリア)で運ぶ

違い： 音声伝送： そのものを運ぶ(力任せ)

映像伝送： だましのテクニックを使う

光の3原色



光のスペクトル



低 ← 周波数 → 高

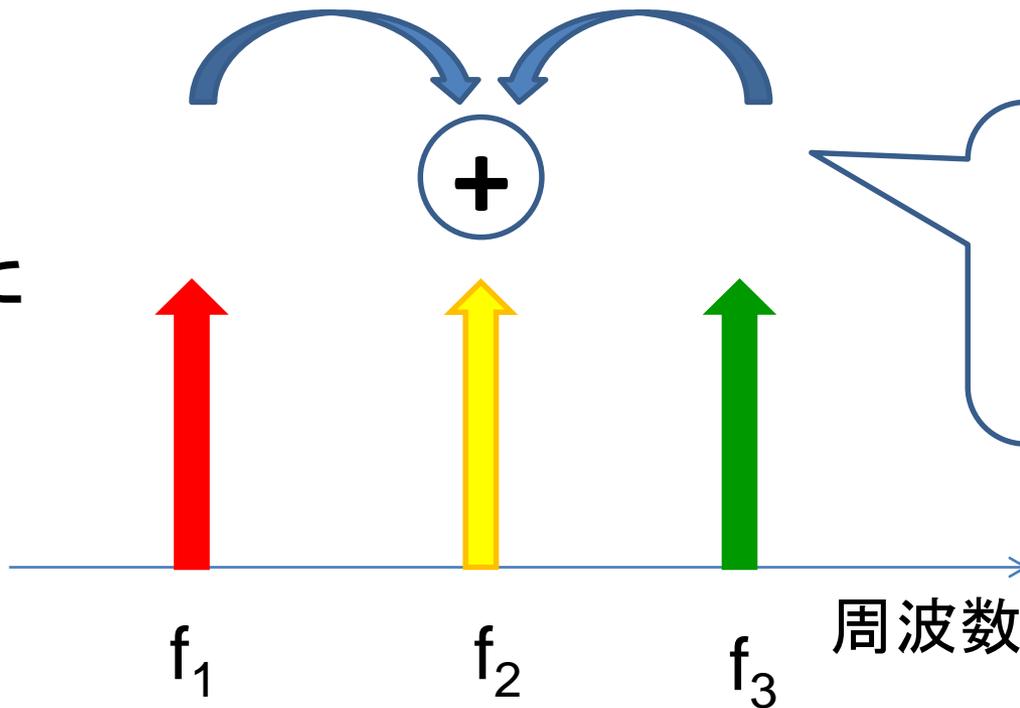
400 (THz)

帯域幅: 約400THz

800 (THz)

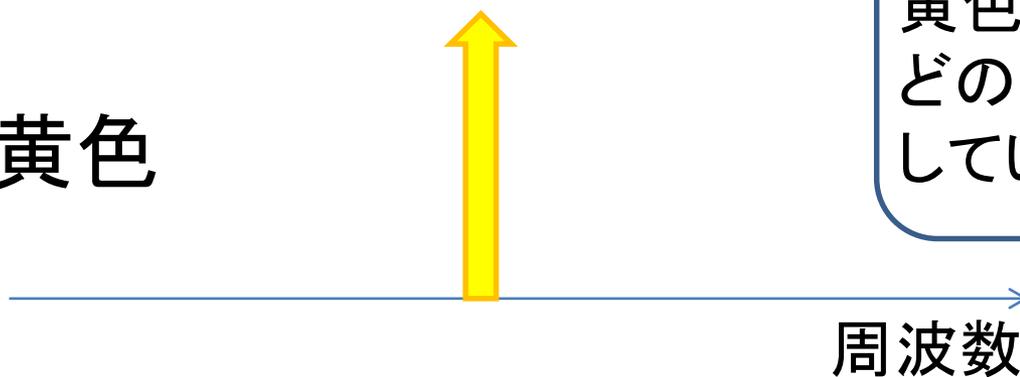
映像情報: この重たい荷物をまともに運んでくれるのはX線くらい!!

合成した
黄色



電波の世界では、
このような形の
周波数合成は
ありえない

純粋な黄色

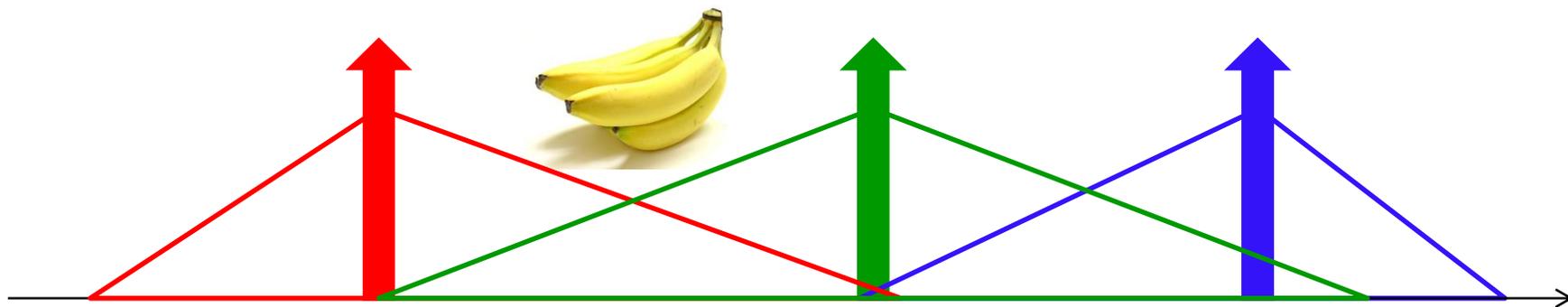


人間の頭の中では
黄色の認識に
どのような信号処理を
しているのだろうか？

色の認識は



の3つのセンサー出力の
比率で、脳が判断
(センサーの分解能は鈍い)



黄色だ!

 :  = 1 : 1

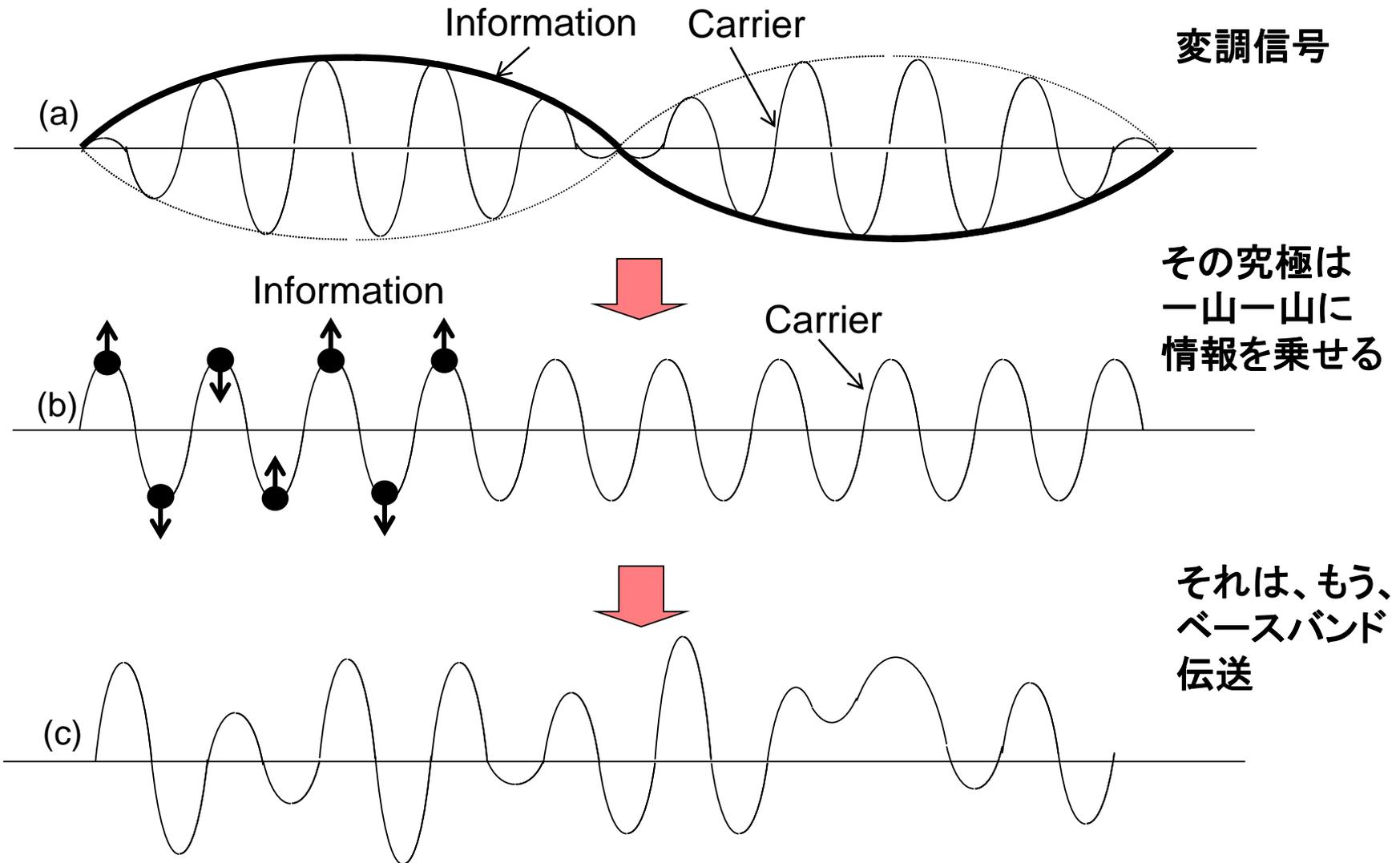
ごまかしが
ばれる

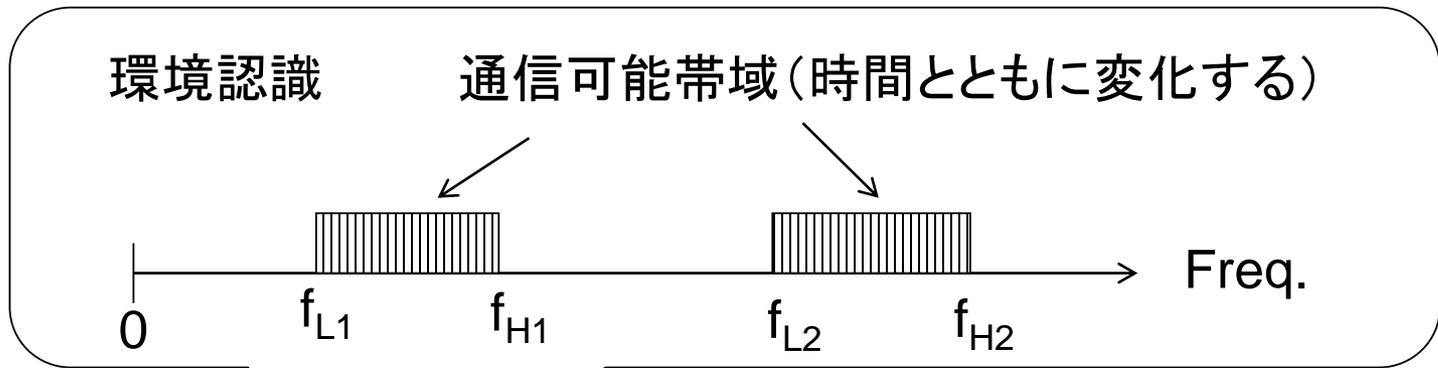
宇宙人がテレビを見ると?



種の起源を同じにする
地球上の生き物は
同じようにだまされる

③ 究極のワイヤレス通信？





環境認識

送信データ

符号化と
変調

時変通信路
(伝搬劣化・
干渉波環境)

復調と
復号

パソコン+DAC+アンテナ

電波信号そのものをOFDM形式で、
デジタル信号処理によって作り、
DA変換してそのまま放射

環境適応通信の夢

コグニティブ無線

環境認識
・周波数適応選択
(電波渋滞がない)

ソフトウェア無線

プログラミングによる
通信方式適応変身
・符号化、変復調
・伝送レート

ハードウェア技術

最後まで残る
ハードウェア技術の
重要性
・超広帯域アンテナ
・アンテナアレー(MIMO)
・チューナブルフィルタ
・RF回路



究極のワイヤレス端末(未来のUSRP)

ベースバンド無線

ベースバンドの信号処理で
電波を作る

終わりに

キャベンディッシュの教訓

- ・発明・発見は、いずれ誰かが成し遂げる
新技術は、いずれ誰かが紡ぎだす

大事なことは

- ・記録に残す
- ・発表する