



## SEMINAR REPORT

# 無線アクセスにおける伝搬の長短距離化と物理層秘匿性



名古屋工業大学  
大学院工学研究科  
情報工学専攻  
准教授  
岡本 英二氏

本日は、無線通信の現在の課題を説明した後、マルチパスフェージング、OFDM、MIMOといった容量拡大のための技術要素を紹介し、また、無線の短距離化とマルチホップネットワークで実現できることや、物理層による秘匿性確保が重要であることなどを紹介し、一方、長距離化による地球規模のネットワークで大容量光通信を実現するアプローチについても紹介し、

### 無線通信の課題

日本国内のブロードバンドのワイヤレスの加入者数は、2012年1月の端末数で1億2800万台と普及率が100.6%になっています。ここ15年で爆発的に広まってきています。

図1は「携帯電話規格の変遷」です。

<ul style="list-style-type: none"> <li>●第1世代自動車電話 (1G) 統一規格無し：日本の型式はNTT方式 最初のサービス開始：1979年 下り速度：デジタル換算で0.3kbps程度</li> <li>●第2世代携帯 (2G) 日本の規格：PDC (Personal Digital Cellular) 他 最初のリリース：1991年4月 サービス名： mova, softbank 2G, cdmaOne (2.5G) 下り速度：28.8kbps</li> <li>●第3世代携帯 (3G) 日本の規格：IMT-DS (W-CDMAのこと) 他 最初のリリース：1999年11月 サービス名： FOMA, softbank 3G, CDMA1x 下り速度：384kbps~2Mbps</li> <li>○第3.5世代携帯 (3.5G) 規格名：3GPP Release 5 (HSPA+ high speed packet access) 他 最初のリリース：2009年3月 サービス名： HSDPA (FOMA), CDMA2000 1x EV-DO Rev0 (WIN) 下り速度：14.4Mbps(理論値)</li> <li>○第4世代携帯 (4G) 規格名：3GPP Release 8 (LTE: long term evolution) 他 最初のリリース：2009年 サービス名：日本での商用サービスはまだ無い、2010年頃サービスイン予定 下り速度：100Mbps (ピークレート)</li> <li>●第4世代携帯 (4G) 規格名：IMT-Advanced (3GPPではLTE-Advancedと呼んでいる) 最初のリリース：2011年 下り速度：1Gbps (ピークレート)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・10年ごとに世代が交代</li> <li>・ピークレートの著しい高速化</li> </ul>
---	--

〈図1〉携帯電話規格の変遷

1979年の自動車電話に端を発して、約10年毎に世代が交代しています。ピークレートが指数関数的に大きくなってきています。

第4世代は、停止時のピーク速度が1Gbpsを実現でき、新幹線程度の移動速度でも高速通信が利用できます。無線通信システムの需要は高速移動、高伝送速度へと向かっています。

高速通信を実現するには、シャノンの通信の容量の式、 $C = B \log_2(1 + S/N)$  bit/secで判るように、帯域(B)を広げるか、S/N比を良くしてCを大きくすれば良いわけです。

しかし、電波法の規制により帯域は自由には使えません。電力も混信を防ぐために制限されており、Sも勝手に大きくできません。

無線通信の場合は、受信電力が伝搬距離の2乗~4乗に比例して減衰し、フェージングでも変動するので、通信路における減衰が非常に大きく、有線通信に比べて非常に品質が悪い通信になります。

フェージングによる変動はマルチパスの伝搬によって起きます。直接波と反射波を同時に受信することで歪が生じます。反射波は距離が直接波より長く、遅れて届くためインパルス応答が尾を引きます。

一方、搬送波周波数が10GHzを超えると、雨などに吸収されて受信側での電力が減衰するので、送信電力を上げても受信側のS/Nが大きくなる現象が生じます。SもBも大きくできなくなると、技術の高度化や多値変調などの利用で、Nを小さくして受信側で容量を大きくするという手段が取られます。

### セルラ通信方式の発展

セルラは、ある範囲を1つの基地局が担当し、基地局を経由して通信する仕組みです。

図2に「第1世代アナログ携帯電話」を示します。(次頁)

第1世代では変調方式にアナログ変調(FM)、多元接続方式にはFDMA (Frequency Division Multiple Access) が使われていました。第1世代でFMが採用されたのは、デジタル信号処理が技術的に商用で使える状態になかったこと、受信品質が使用帯域幅に比例するので、FM波のスペクトルを大きくすることで品質が確保できるためです。

分類	アナログセルラー(第1世代)			
	名称	AMPS	NTT	TACS
主要国	米国	日本	英国	北欧
周波数帯 (MHz)	下825-845 上870-890	下925-940 上870-885	下890-910 上930-960	下453-457.5 上463-467.5
チャンネル間隔 (KHz, ※インターリーブ)	15※	6.25※	12.5※	25
変調方式	FM	FM	FM	FM
伝送速度 (kbps)	10	0.3相当	8	1.2

- 変調方式: FM (frequency modulation)
- 多元接続手法: FDMA
- 「セルラ」とは基地局がある範囲(セル:標準では六角形モデル)に存在する加入者の呼を処理するシステム

〈図2〉第1世代アナログ携帯電話

FDMAは周波数を分割してユーザ毎に割り当て一度に多数と通信する手法です。これは直交分割多元接続で、他に対して干渉しない方式です。品質(S/N)は上げられますが、ガードバンド(空帯域)が必要なため周波数利用効率が低下します。また、チャンネル間が非同期で良いので、相手方を気にしないで設定できるという利点があります。

第1世代は周波数利用効率が低くないため、当初より加入者の増加に伴う周波数の逼迫が予想されました。また、チャンネルの周波数を合わせるだけで、第三者が通信を傍受できるという課題もありました。そこで検討されたのが、図3の「第2世代デジタル携帯電話」です。

第2世代は80年代にサービスが始まりました。大容量化を図る仕組みが世界中で議論され、日本ではPDC(Personal Digital Cellular)方式が採用されました。変調方式はQPSKで、多重方式はTDMAです。

平均送信電力一定の下では、PSK系の方がOOK、ASK系に比べてBER(bit error rate)が良いため、PSK系の変調方式が使われました。I-Q平面で考えると、位相を変えて0と1を送るQPSKは2次元に点が配置され、振幅を変えて0と1を送るASKは1次元に点が配置されるので、点間の距離により、PSKの誤り率特性がASKより良いわけです。

TDMAはチャンネル毎に時間スロットを変更するマルチアクセスで、直交分割多元接続です。FDMAに比べ周波数の利用効率が高いため採用されました。分割するのは周波数ではなく時間ですので、混信を防ぐための時間(ガードタイム)が必要で、周波数利用効率は最適ではありませんでした。

さらに加入者数を増やすためにシステムの大容量化を目指し

## ■ 開発の動機

- 収容加入者数の増加→大容量化
- 無線部の(国内)規格の統一による地域ローミングの実現
- データ通信の実現

分類	デジタルセルラー(第2世代)				
	コードレスホン	PDC	GSM	IS-54	IS-95
主要国	日本	日本	欧州	米国	米国
周波数帯 (MHz)	1.9GHz帯	下810-826, 1177-1501	下935-960	下935-960	下935-960
		上940-956, 1129-1453	上890-915	上824-915	上824-915
多重方式	TDMA	TDMA	TDMA	TDMA	CDMA
変調方式	$\pi/4$ QPSK	$\pi/4$ QPSK	GMSK	$\pi/4$ QPSK	下QPSK 上OQPSK
伝送速度 (bps)	384k	42k	270.8k	48.6k	chiprate 1.2288Mcps

〈図3〉第2世代デジタル携帯電話

て、世界中の統一規格として選定が図られたのが図4の「第3世代携帯電話」ですが、結果的には規格は1つにまとまりませんでした。

## ■ 開発の動機

- 収容加入者数のさらなる増加→大容量化
- データ通信の比重が増加→様々なデータレートを混在できるシステムの構築
  - FDMA, TDMAではスロットが固定のため、柔軟性が不足

分類	IMT-2000(第3世代)	
	方式	W-CDMA
主要国	日欧	米国
周波数帯	下2110-2170 上1920-1980MHz	2GHz帯, 800MHz帯
多重方式	CDMA	CDMA
変調方式	BPSK/QPSK	QPSK
拡散変調方式	HPSK/QPSK	
伝送速度	chiprate 4.069Mcps	chiprate 3.6864Mcps

〈図4〉第3世代携帯電話

第3世代携帯電話は91年に日本国内で実用化されました。第3世代では多元接続を高度化させました。分割するのは拡散符号です。拡散符号はユーザ毎に固有のもので、拡散率を大きくすることで多くのユーザが同時にアクセスできる方式です。これは非直交の多元接続ですので、1/拡散率程度の干渉が他のユーザに対して生じてしまいます。

第3世代では、データ伝送速度の柔軟な変更と、マルチパスフェージングによる劣化の制限という要求に拡散符号が適していたため、拡散変調方式が採用されました。

CDMAでは統計多重効果が使用できます。ユーザの携帯電話使用率は1以下ですから、使用率を予め見込んでユーザに符号を割り当てることで、見かけ上の収容ユーザ数を増やすことができますが、輻輳も生じます。

「第3世代の発展規格」を図5に示します。

2年前にLTE 3.9世代の携帯電話としてドコモのクロッシィが実用化されました。初期の頃は多重方式にCDMA、変調方式にPSK系が使われていましたが、3.5世代の頃から多値変調にQAMが使われ、多元接続がOFDMAに代わりました。

多値変調の16QAMは1シンボルで送れるビット数を4bitに増やすことで高速伝送が実現できます。16QAMは格子状に点を配置するので点間の距離を比較的大きく取ることができ、円

	W-CDMA	HSDPA/HSUPA	1xEV-DO Rev.A	LTE	802.16e-2005	IMT-Advanced
generation	3G	3.5G	3.5G	3.9G	WiMAX	4G
DL access	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA	OFDMA	(OFDMA)
UL access	CDMA	CDMA	CDMA	SC-FDMA	OFDMA	(OFDMA)
modulation	HPSK, QPSK	HPSK, QPSK, 16QAM	BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, etc
DL data rate	384kbps	14.4Mbps	3.1Mbps	326.4Mbps	75Mbps	<1Gbps
UL data rate	64kbps	5.7Mbps	1.8Mbps	86.6Mbps	75Mbps	>50Mbps
duplex	FDD/TDD	FDD/TDD	FDD	FDD/TDD	TDD	(FDD)
MIMO	none	none	none	supported	supported	(mandatory)
service-in	already	already	already	planned in 2010	already	2010s

- 多元接続方式の再直交化→OFDMA, SC-FDMA
  - 回線交換からパケット伝送へのシフトにより統計多重効果の低減。直交化による干渉低減により大容量化。

〈図5〉第3世代の発展規格一覧

周上に点を配置する 16PSK に比べて、一定の S/N 比以上では誤り率特性が良くなります。

固定無線は通信路が安定している場合は多値変調を用いて高速化を図っていましたが、近年ではそれが移動通信にも用いられるようになってきました。ただし、16QAM だけでは、S/N 比が悪くなると誤り率特性が一気に悪化するので、幾つもの変調方式を収容して、切り替え操作により、S/N が良い時だけ QAM を使うというアプローチをしています。これは AMC (Adaptive Modulation and Coding) という、伝搬路状態に応じて適応的に伝送方式を切り替える適応変調・符号化方式です。従って、通信状態を端末から基地局へ通知する必要があります。

CDMA には周波数繰り返しの利点があります。隣り合ったセルが同じ周波数では、特にセル端では干渉波により品質を確保できないという問題があるため、第 2 世代までは周波数を分割して、隣り合ったセルでは異なる周波数を使うことで干渉波を減らす方式が取られていました。しかし、使える周波数幅は  $1/N$  になります。

CDMA では拡散符号を使うことで、干渉の量を  $1/\text{拡散率}$  に減らすことができ、1セルで面を展開することが可能になり、容量が上がりました。

## 容量拡大のための技術

### (1) マルチパスフェージングと OFDM

マルチパス通信路では、色々な波の到着時間が異なったり、到来方向が異なったり、ドップラシフトが異なったりすることで伝搬路の変動が発生します。場所、時間、周波数が変わると受信電力が変わるといように、場所、時間、周波数の選択性が生じます。多くの場合これら 3 つは同時に起こりますが、通信システムや状況により影響の強い選択性が変わります。

通信路モデルは時変フィルタにガウス雑音を加わった形になっています。伝搬路をインパルス応答で表して、それに送信信号が畳み込まれるのが一般的な通信路の仕組みです。変数は遅延時間  $\tau$  と時刻  $t$  で、これをフーリエ変換すると伝達関数になります。

時刻 = 0 の時のインパルス応答の波形と、時刻 = 1 の時の波形は違います。時刻  $t$  毎にインパルス応答の波形が変わるのが時変フィルタです。時間選択性フェージングは、あらゆる方向からの波が同時刻に受信される場合に起こります。実際は直接波と同じ時刻に来る反射波はないのですが、同時刻とみなせる時には、インパルス応答が最初の時刻 = 0 のインパルスだけになります。同じ時刻に少しだけ周波数の違う波が足し算されると「うねり」になります。包絡線が少しずつずれ、これが各方向から来ると不規則な変動をします。

時間選択性フェージングの通信路の送受信モデルは、 $r(t) = c(t)s(t) + n(t)$  の形で表されます。 $s(t)$  は送信信号、 $c(t)$  はランダムに時間変動する波、 $n(t)$  はガウス雑音です。

$r(t)$  をそのまま判定すると、振幅も位相も歪んでいるため正常に復元できません。このため、受信側で受信した信号をそのフェージングで割り算して取り除くと、雑音の振る舞いが少し変わりますが、所望信号が受信側で得られます。これを時間領域に

おける等化といいます。

現在のセルラ通信で最も深刻なのは、インパルス応答が 1 本でなく、遅延波が沢山残っている周波数選択性フェージングです。

これは伝送速度が速い時に発生します。都会のビル空間では数  $\mu\text{s}$  位の遅延波を受けます。これは物理現象では変わりませんが、1 サンプル時間の幅によって様子が変わります。例えば、250 Kbps で 1 bit 送る場合は、 $1/T_s$  が  $4 \mu\text{s}$  に相当しますので、物理的な連続波形のインパルス応答を整合フィルタで離散化すると、ほとんど最初の 1 波だけになり 2 波目はほとんど無視できます。しかし、 $T_s$  が 3.8 Mbps 相当になると、サンプル時間が  $0.26 \mu\text{s}$  になり 10 数波も残ってしまうため、高速通信では周波数選択性が悪くなります。

インパルスをフーリエ変換すると、1 波の場合、 $\delta(t)$  のフーリエ変換は 1 です。これは周波数によって状態が変わらないので周波数非選択性です。遅延波が残ると周波数毎に受ける歪の様子が変わり、遅延波の影響が大きいほど伝達関数が歪みます。これが周波数選択性です。

この歪を取り除くために時間領域での除算による等化を行うと、シンボル間干渉が除去できず特性が大きく劣化します。従って、周波数選択性フェージングの等化は周波数領域で行います。

図 6 に「周波数領域等化」を示します。

周波数領域等化は OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) で行います。これは送信信号をあらかじめ serial to parallel で沢山並べておいて、逆フーリエ変換 (IFFT) して送るものです。そうすると各 QPSK 信号が周波数領域の信号となります。受信側では受信した時間信号に FFT を掛けると、各成分は周波数領域の値になるので割り算が使えます。

現在は回線接続よりパケット通信の比率が大きくなってきています。CDMA でもある程度の異なる伝送速度は実現できますが、偏在化が難しいという欠点があります。しかし OFDMA を使うと、ユーザに割り当てるサブキャリアの数を変えるだけで、異なるユーザへ異なる伝送速度を実現できるので非常に便利です。

また、高速伝送によってマルチパスの影響が増えてきていますが、周波数領域等化ができる OFDM の方が CDMA より等化が簡単です。

マルチユーザダイバーシチを使えるのも OFDM の特徴です。これは、サブキャリア毎にフェージングの利得が高いユーザにリソース割り当てることで、システム全体の瞬時通信容量を増やす技術です。

#### ・受信信号

フーリエ変換を用いることで遅延波の畳み込みを乗算に変え、除算等化が可能となる

$$r(k) = h_0 s(k) + h_1 s(k-1) + \dots + h_{L-1} s(k-L+1) + n(k)$$

$$R(n) = (h_0 + h_1 e^{2\pi n T_s / N} + \dots + h_{L-1} e^{2\pi n (L-1) T_s / N}) S(n) + N(n)$$

$$= H(n) S(n) + N(n)$$

離散  
フーリエ変換

#### ・周波数領域で除算により等化を行う。

–ZF 基準

$$\hat{R}(n) = \frac{R(n)}{H(n)} = S(n) + \frac{N(n)}{H(n)}$$

–MMSE 基準

$$\hat{R}(n) = R(n) \frac{H^*(n)}{|H(n)|^2 + \sigma^2 / E[|S(n)|^2]}$$

#### ・実は OFDM は、受信側でこれが行えるように予め送信側を工夫して伝送する手法である。

〈図 6〉周波数領域等化

## (2)MIMO 伝送

通信容量を上げるもう1つの方法に、MIMO (multiple-input multiple-output) があります。

MIMOとは複数アンテナの入出力を用いた伝送のことです。この方法は容量が線形的に増加しますが、1ユーザがRF系を複数用意する必要があるため、コストが上がる欠点があります。

MIMOの目的には、容量を上げること、S/N比を上げることの2つがあります。どちらの目的かは、違う情報を載せているか(容量)、同じ情報を載せているか(S/N比)で判ります。アンテナが4本以上の時は混在させることもできます。

MIMOで違うデータを違うアンテナに送ると、誤り率特性はSISOの時と同等か、少し悪くなりますが、チャンネル行列のランクが得られ、それがアンテナ数分増えるという利点があります。

図7に「MIMOチャンネルの条件」を示します。

2×2の伝送では、送信アンテナ1から受信アンテナ1、送信アンテナ1から受信アンテナ2という行列が構成されます。この固有値を足したのが通信路容量になります。受信側のアンテナは、チャンネル1とチャンネル2の信号が同時に混在するので、チャンネル行列をインバースして掛け算する必要があります。従って、逆行列を作れないチャンネルは復号できないので、MIMOのチャンネルは無相関である必要があります。

MIMOは3.9世代からサポートされていて、第4世代では受信機も2本のアンテナを持つことが必須になる予定です。

このように多元接続の高度化、変調方式の多値化、MIMOの適用などによって、ダウンロードの速度として1Gbpsが実現できるようになりつつあります。

**■ 空間多重伝送の場合**

$$Y = HX + N$$
 送受信関係式

$$\hat{X} = H^{-1}Y = X + H^{-1}N$$
 MIMOアンテナ分離

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \dots & h_{1,2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{2,1} & \dots & h_{2,2} \end{bmatrix}$$
 チャンネル行列: 1パスの場合

$$h_i = \begin{bmatrix} h_{i,1} & \dots & h_{i,2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{i,1} & \dots & h_{i,2} \end{bmatrix}$$
 チャンネル行列: マルチパスの場合

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & \dots & h_{i-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & & h_i & \dots & h_{i+1} & 0 \\ \vdots & & 0 & h_i & \dots & h_{i+1} \\ 0 & \dots & 0 & h_i & \dots & h_{i+1} \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$
 例) すべて見通しパスの場合  $\Rightarrow H^{-1}$ が生成できない

- チャンネルによっては行列の階数が落ち、正しく復号できない→チャンネルの相関が低い方が望ましい
- 空間ダイバーシティ伝送の場合
  - 1ストリームしか使わないため、第1固有値  $\lambda_1$  が大きければよい。

〈図7〉MIMOチャンネルの条件

## ・セル半径の変遷

システム	セル半径
NTT方式(1G)	都市部5km, 郊外10km
PDC(2G)	500m~20km
3GPP(3G)	数km
Mobile WiMAX(3G)	1~3km(都市部750m)
LTE(3.9G)以降	マクロセル 数km マイクロセル 数百m ピコセル・フェムトセル 数十m

- ・セル半径の縮小化→無線の短距離化
- ・(減衰指数 $\geq 2$ より)受信側のS/N比を改善し、品質(システム容量)を向上
- ・届かないでなく、届きすぎ(干渉)の課題
  - ・SNRは向上、SINRが低下

〈図8〉無線通信の短距離化

その1つがマルチホップネットワークです。端末同士で通信すれば伝搬距離が非常に小さいので消費電力は少なくなります。また、端末の空間的な分解能が非常に上がるので、音響、照明、空調を端末がある場所だけに限ることで効率を上げることができます。この考え方はITSでも事故防止や渋滞緩和などに使われようとしています。

自由空間での平面波伝送では、電力は距離の2乗に従って減衰します。一般的な地上セルラでは、都会で外を歩いている時の減衰係数は統計的には3.5程度だと言われています。そうすると、ある距離を直接伝送する場合と、間に9個挟んで伝送する場合は、減衰指数が大きい場合ほど、間に挟んだ方がトータルの電力は少なくて済みます。従って、マルチホップ通信は今後の省電力化にも寄与することが判ります。

マルチホップネットワークの場合は、端末の数に比例して無線リンク数が指数関数的に増加しますので、無線で個人情報やお金など非常に貴重な情報を送るためには、特に安心・安全が必要となります。また、無線リンク数が沢山あり干渉が多くても伝送できる高い信頼性も必要です。それが現在のシステムを大きく変革させるための課題です。

## (1)カオス通信による物理層秘匿化

カオスシステムとは、決定論的な非線形の規則に従って、予測不可能で不規則な振る舞いをするシステムのことです。現在の無線におけるセキュリティ確保は物理層ではなくネットワーク層、アプリケーション層という上位層で行われています。

しかしセキュリティ確保は排他的ではなく、技術の重畳も有効ですので、物理層のセキュリティ確保技術が近年注目されています。その1つとしてカオス通信が有効であると90年代から言われています。

物理層の秘匿性を確保すれば、上位層のセキュリティのプロトコルとの併用で、更なる秘匿性を確保するか、もしくは上位層の簡略化により、より低コスト、高伝送効率を持つ秘匿通信を実現できる可能性があります。

MIMOにカオス変調を適用すると、MIMO伝送の利点と物理層秘匿性が確保できることを多くの人が提案しており、私どももその一種を提案しています。

私どもが提案しているのはカオスMIMO(C-MIMO)です。これは、カオスの多重伝送、つまり、容量を上げるというアプローチに、データで相関付けられているカオス符号化のユニットを入

## 無線短距離化とマルチホップネットワーク

容量拡大への色々な技術的アプローチを紹介しましたが、さらに容量を増やすために、セル半径を縮小し、Nを減らしてS/Nを拡大する方法が考えられています。これが短距離化です。

セル半径の変遷を、図8「無線通信の短距離化」に示します。

セルラは必ず基地局を経由しますので、隣の端末に伝送する場合でも数km離れた基地局を経由するため、消費電力が増加するという課題があります。

現在は携帯やiPodなど身の回りにCPUが沢山ありますので、セルラでなくても通信を行うことは可能です。

れて位相をランダムにシフトするというものです。受信側では、非線形の最適解を求めるMIMOに対する前探索に、カオスの復号をする探索も加えて受信することで、物理層の秘匿性が得られます。このカオスの初期値を送受信側で共有することで、受信側で正常に復号できます。

今までのカオス通信には、通信のユークリッド距離を落とすためビット誤り率特性が悪いという課題がありました。それをMIMOに適用し、計算量を増やすことで誤り率特性を良くしたのがC-MIMOの特徴です。

図9に「個人変調」の概念を示します。

セル半径が縮小していく方向にあり、基地局はだんだん身近になります。さらにセル半径が小さくなると、リンクが増えてくるので、machine to machineが主流になってもおかしくないと思います。その場合はSINRの確保が非常に重要になりますが、品質を良くしておけば、セルが小さくても高品質伝送を実現できると思います。

PSKやQAMのようにユークリッド距離が最適でなくても、別の機能を有することで変調はより便利になるだろうと考え、秘匿性の確保に重点を置いたのがカオスを用いたID変調です。

C-MIMOの変調の部分は自由に変わることができるので、これを個人識別に使うことも有効ではないかと考えています。これを個人変調といいます。

- 個人変調: ユーザ識別子として変調方式を用いる手法
- セラ通信ではセル半径が縮小する傾向にある  
- ピコセル, フェムトセル  
基地局が身近になる

201X年最新型 femto

- 無線リンクのSNRは確保でき、干渉(I)が性能を支配するパラメータとなる
- 種々の干渉抑圧手法が存在する→SINRも確保できる。
- いずれ変調方式はSNRに対して最適(=量子化)でなくとも良くなる

〈図9〉「個人変調」の概念

## 無線長距離化と大容量光衛星通信

無線通信の短距離化は1つのトレンドですが、もう1つのトレンドに長距離化があります。地球規模の大容量通信、深宇宙通信や有人宇宙滞在などを実現するためには無線の大容量通信は必須です。

NICTでは衛星通信を光で実現することを提案しています。理由は、光は電波法と無関係なので、帯域制限が無く大容量通信が可能なこと、光は直進性が強いので、当然ポインティングする必要はありますが、秘匿性が高く、装置を小型化できるというメリットがあるからです。

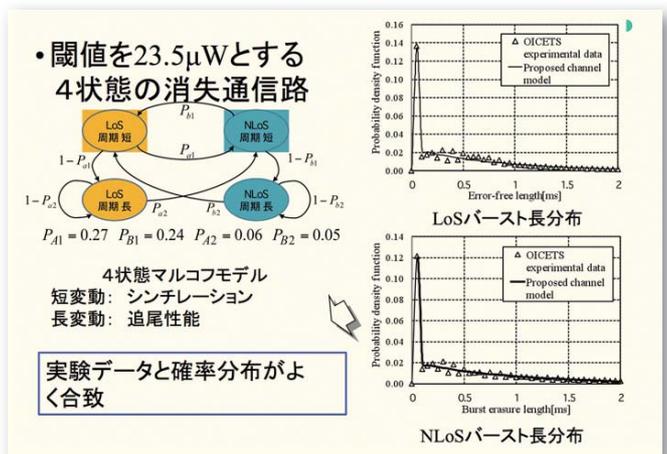
私は地上と周回衛星の間のリンクについて検討させていただきましたが、現在はまだ、ポインティング精度の確保や、シンチレーションによる変動、大気による変動などで品質が安定しないという課題があります。

そこで、我々はチャンネルモデル化をしました。それはランダム消失通信路です。これはある値以上では絶対誤っていないという値に閾値を定めて、その値以下は捨ててしまうというものです。便利な点は線形復号処理ができるので、計算量を低減できることです。

NICTが行った2008年の610kmの周回衛星から地上へのダウンリンクのデータを使わせていただき、チャンネルモデリングをしました。その結果、4状態のマルコフにすると良いことが判りました。

図10に「提案4状態マルコフチャンネルモデル」を示します。

チャンネルモデリングを用いたシミュレーションで、LDGM符号と呼ばれる符号を適用すると、インターリーブと呼ばれる伝搬路のバースト誤りをランダム化させる変換装置を余り大きくしなくても、符号化率が高く、シンボル誤り率が低いものが得られることが判りました。



〈図10〉提案4状態マルコフチャンネルモデル

## まとめ

本日はセルラの状況説明とともに、今後、無線は収容加入者増にともなうセルのピコセル化、フェムトセル化による短距離無線化か、地球規模の長距離無線化の方向に進み、中途半端な距離は次第に光ファイバで置き換えられるだろうという状況について説明させていただきました。