

ユビキタスコンピューティング

1回目(無線工学)



佐藤一郎

国立情報学研究所・ソフトウェア研究系 /
科学技術振興事業団・さがけ研究21
E-mail: ichiro@nii.ac.jp

Ichiro Satoh

▶ 講義内容

携帯電話を中心とした無線通信とそのソフトウェアを概説

1. 無線通信
2. 携帯電話(セルラー)の仕組み
3. 変調方式
4. 無線LAN
5. 携帯電話ソフトウェア
6. モバイルインターネット

Ichiro Satoh

▶ 身近な通信手段

- 怒鳴る(100メートル程度)
- 手旗信号(数百メートル)
- のろし(数キロ)
- 伝書鳩(数百キロ)
- 手紙
- 電報
- 固定電話
- 携帯電話
- インターネット

Ichiro Satoh

▶ 概要

携帯電話とモバイルインターネット

- 無線通信基礎
- 携帯電話の動作原理
- 次世代携帯電話
- モバイルインターネット技術

Ichiro Satoh

21世紀の通信技術

ワイヤレスネットワーク

- 一対多の通信が容易
- 通信エラーが多い
- 短距離向きネットワーク向き

オプティカルネットワーク

- 長距離・広帯域通信
- 通信エラーが少ない
- バックボーンネットワーク向き

メタル媒体の通信は高速Ethernetに集約？

Ichiro Satoh

光ファイバ

光パルス(明暗・波)によってデータを伝える

50000 Gbpsを超える帯域幅をもつが、光/電気変換デバイスの限界により数Gbps程度に制限。
さらに、多量化により帯域幅が狭くなる

SONET(時分割多量化): 50 Mbps ~ 1 Gbps

WDM(波長分割多量化): 1 Gbps ~ 1 Tbps

マルチモードファイバ

光はコアとクラッドの境界を反射しながら進む

- 安価・接続が容易
- × 伝送効率が悪い(高々数Km)



シングルモードファイバ

ファイバ直径を光の2, 3波長まで細くすると光は直進する。

- 伝送効率がよい(数千Km)
- × 高価・接続が容易



Ichiro Satoh

無線ネットワーク

無線ネットワークの利用範囲により分類

広域

- 地上系 例: 携帯電話(セルラー)、PHS、ページャ(ポケットベル)
- 衛星系 例: 衛星電話

構内

- 中速無線LAN 例: IEEE802.11b, IEEE802.11a
- 高速無線LAN 例: ワイヤレスATM, ワイヤレスIEEE1394

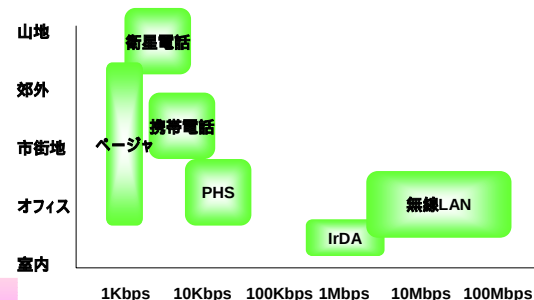
室内

- 低速無線LAN 例: Bluetooth
- 赤外線 例: IrDA

Ichiro Satoh

各種無線ネットワークと適用範囲

各種無線ネットワークの性能と適用範囲



Ichiro Satoh

▶ 周波数帯

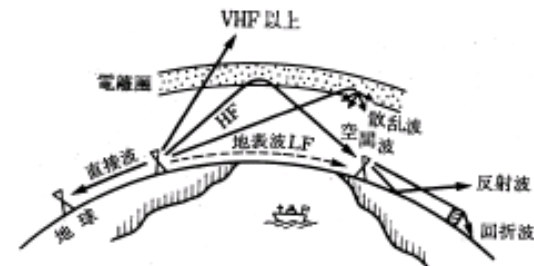
主な電波利用とその周波数帯

周波数帯	波長	名称	用途
3k ~ 30kHz	100km ~ 10km	超長波VLF	
30k ~ 300kHz	10km ~ 1km	長波LF	船舶・航空用ビーコン
300k ~ 3MHz	1km ~ 100m	中波MF	船舶通信、AM放送
3M ~ 30MHz	100m ~ 10m	短波HF	短波放送
30M ~ 300Hz	10m ~ 1m	超短波VHF	テレビ
300M ~ 3GHz	1m ~ 10cm	極超短波UHF	テレビ、携帯電話、PHS
3G ~ 30GHz	10cm ~ 1cm	マイクロ波SHF	衛星通信・放送
30G ~ 300GHz	1cm ~ 1mm	ミリ波EHF	衛星通信
300G ~ 3THz	1mm ~ 0.1mm	サブミリ波	レーザ通信
3THz ~	0.1mm ~	光波	光空間通信

Ichiro Satoh

▶ 周波数帯

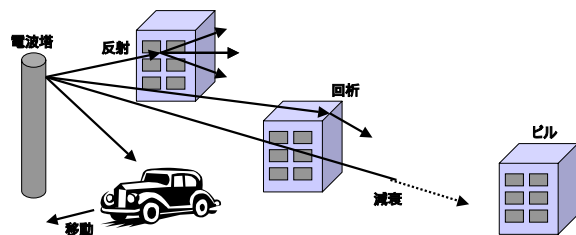
各周波数帯電波の伝搬の仕方



Ichiro Satoh

▶ 無線通信の特徴

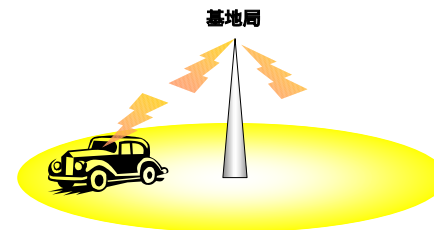
- 利用可能な周波数は限られている
- 通信エラーが多い(電波の減衰)
- マルチパス(反射・回折・干渉)
- 消費電力に制限(バッテリー駆動、人体への影響)



Ichiro Satoh

▶ 自動車電話

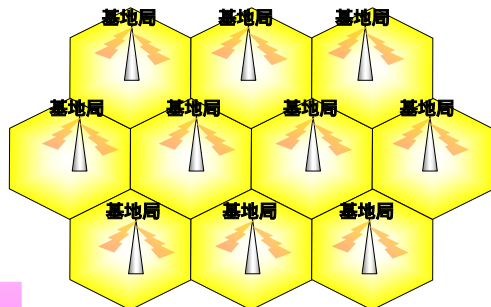
- 1946年に米国でサービス開始
- 一つの電波塔(基地局)が広いエリアをカバーして、その中でのみ通信可能
- サービスエリアを広げるには出力を上げる必要がある。
- その後、小範囲エリアを切り替える方法に移行(当初は手動)



Ichiro Satoh

セルラー方式 (Cellular)

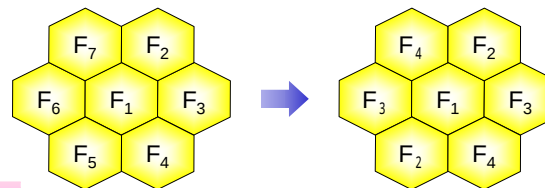
- 小範囲エリア(セル、細胞)を前提とした基地局(電波塔)を複数組み合わせることによりサービスエリアを拡大
- セルの範囲は数百メートル～数キロメートル



Ichiro Satoh

周波数の有効利用

- 隣接するセル同士が電波が干渉する
- そこで、隣接するセルは周波数を変更する
- ただし、隣接しないセル同士は同じ周波数を使っても良い
例: $F_2 = F_5$, $F_3 = F_6$, $F_4 = F_7$



Ichiro Satoh

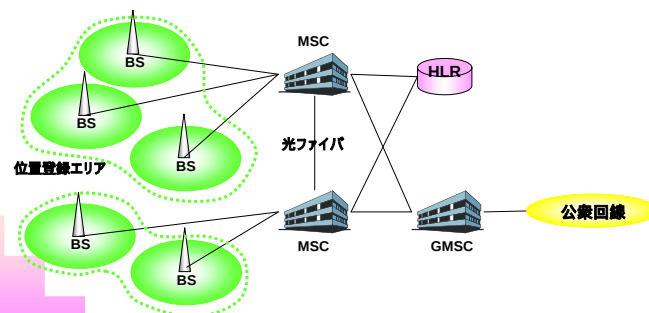
携帯電話ネットワークシステム

- 移動端末 (MS, Mobile Station)
携帯電話
- 基地局 (BS, Base Station)
移動端末と電波を送受信する(電波塔)
- 移動交換局 (MSC, Mobile Switching Center)
移動端末の移動の追跡して、交換サービスを行う
- ホームロケーションレジスタ (HLR, Home Location Register)
携帯端末の加入者情報を保持し、位置管理を行うデータベース
- 閥門移動交換局 (GMSC, Gateway Mobile Switching Center)
公衆回線や他社ネットワークとの相互接続を行う

Ichiro Satoh

携帯電話システム

一つのMSCに複数のBSが接続される。
それらのBSの電波到達エリアが、そのMSCの位置登録エリアと呼ぶ

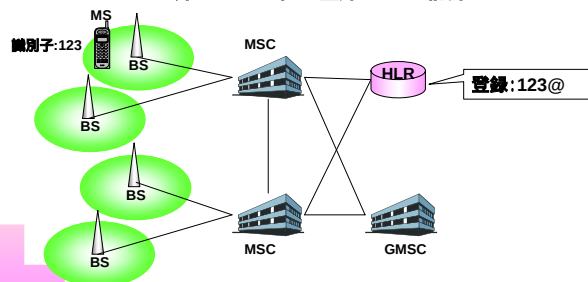


Ichiro Satoh

位置登録

MS(移動端末)がMSC 内に存在するとき

- MSは定期的にBSを介して位置登録要求を送信
- MSCはBSを介して位置登録エリア情報を送信
- HRSはMSC を介してMSの位置登録エリアを記録

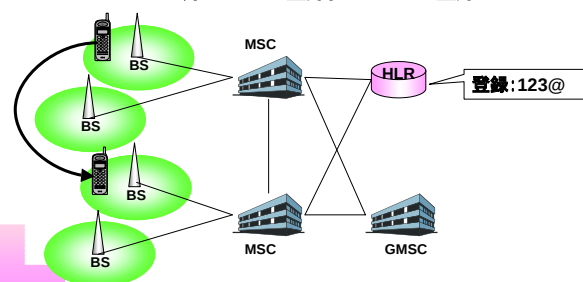


Ichiro Satoh

位置登録(移動)

MS(移動端末)がMSC からMSC の位置登録エリアに移動

1. MSはMSC の登録位置エリア情報を受信 → 移動を検知
2. MSはBSを介して登録要求を送信
3. HRSはMSC を介してMSの登録位置エリアを登録

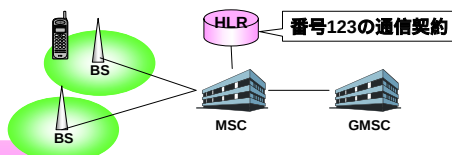


Ichiro Satoh

移動端末からの発信

移動端末から公衆回線への発信:

1. 移動端末からの発信要求をBSを介してMSCに送信
2. MSCは発信要求に含まれる発信端末の端末識別番号(電話番号)に基づいてHLRと認証などのネゴシエーションを行う
3. HLRから許可をもらいMSCはGMSCとコネクションを確立
4. 移動端末の発信要求先(相手先電話番号)を転送
5. GMSCは発信要求先に基づいて相手先までの回線を確立
6. MSCはBSを介してMSとGMSCを接続

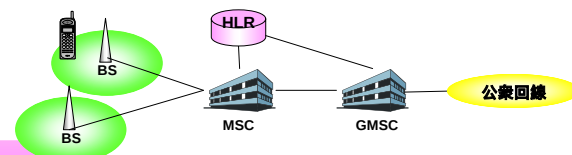


Ichiro Satoh

移動端末への着信

公衆回線から移動端末への着信:

1. GMSC公衆回線からの着信要求を受信
2. GMSCはHLRに着信先端末が存在する位置登録エリアを問い合わせる
3. GMSCは該当するMSCにエリア内のBSに一斉呼び出しをさせる
4. 着信端末(MS)はBSを介して着信の通知を受ける

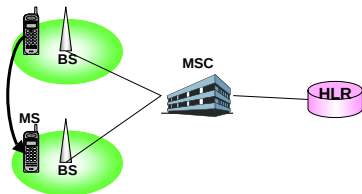


Ichiro Satoh

▶ 携帯電話のハンドオーバー

通話中の移動用にBSを変更しても途切れることなく通話を継続

- MSが移動したときは隣接したBSが接続を引き継ぐ
- BSを変更するときはMSCが周波数の変更する

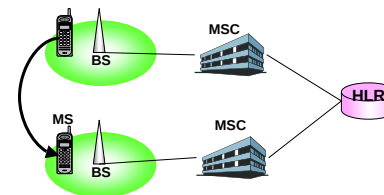


Ichiro Satoh

▶ 携帯電話のハンドオーバー

通話中の移動用に位置登録エリアを変更しても途切れることなく通話を継続

- MSCはMSから電波が弱くなると、そのMSの電波を受け取れるか周囲のMSCに問い合わせる
- 他のMSCの方が電波が強いときはそのMSCにMSとの接続を依頼
- MSCはMSの電波が条件よりも弱くなると接続を切断

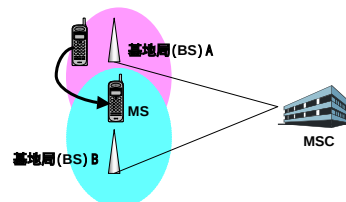


Ichiro Satoh

▶ 携帯電話のハンドオーバー

セルは隣接するので境界付近は隣接セルの領域とオーバーラップ
ハンドオーバーの切り替えは信号強度(電波の強さ)により判断

- 端末主導型ハンドオフ(Terminal station-driven hand-off)
- 基地局主導型ハンドオフ(Base station-driven hand-off)



Ichiro Satoh

▶ 携帯電話のハンドオーバー

Terminal station-driven hand-off:

1. 移動端末が受信信号強度に基づいてハンドオーバーを決定
2. 空きスロットにおいて隣接基地局の信号強度を測定
3. 測定結果に基づいてハンドオーバー要求を送信

Base station-driven hand-off:

1. 移動端末からの受信信号強度が弱くなると、隣接基地局に当該端末の受信強度を調べさせる
2. 隣接基地局の受信強度が良好であればハンドオーバーを実施

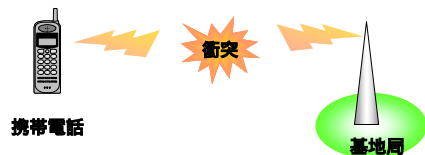
携帯電話では両方法ともにハンドオーバー中は現行基地局と新基地局の両方で通信接続を行い、ハンドオーバー中の通信切断をさける
PHSはハンドオーバー中の二重接続を行わない

Ichiro Satoh

デュプレックス問題

基地局の発信した電波と携帯電話が発信した電波が衝突

- FDD方式
上りと下りで周波数を変更
- TDD方式
上りと下りの時間を分ける



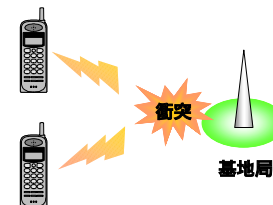
Ichiro Satoh

マルチプルアクセス

複数の利用者が同時に通信することを多元接続(マルチプルアクセス)と呼ぶ

マルチプルアクセス問題の解決方法

- FDMA方式
通信相手ごとに周波数を分ける
- TDMA方式
電波を使う時間を分ける
- CDMA方式
電波のパターンを分ける



Ichiro Satoh

アクセスプロトコル

- 多数のユーザが通信路を共有して複数のユーザが同時に送信しようとする時、競合が生じるの何らかの規則が必要
- 各ユーザが共用通信路にアクセスする時に遵守しなければならない規則(アクセスプロトコル)
- 無線通信だけでなく有線通信でも利用

通信路容量をユーザ間で固定的に分割

- 固定割り当て
送信するデータのあるなしに関わらず、各ユーザには通信路容量の一部が割り当てられる。
例: 時間分割(TDMA)、周波数分割(FDMA)

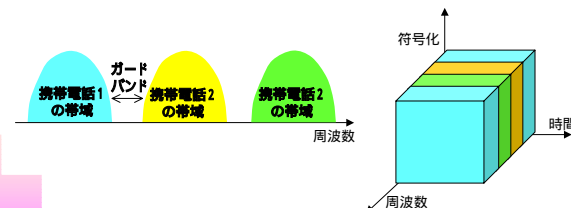
Ichiro Satoh

FDMA方式

周波数分割多元接続(Frequency Division Multiple Access)

周波数帯域を分割(12.5kHz)して各ユーザに割り当てる方式

- チャンネル(帯域)間にガードバンドをもうけることでユーザ間の相互干渉を避けられる
- 復調時に高速な同期を必要としない



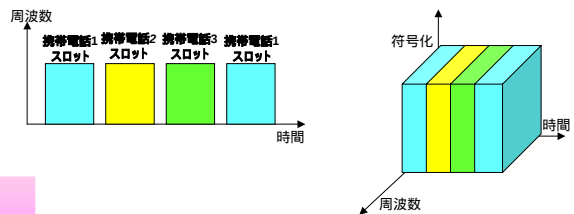
Ichiro Satoh

TDMA方式

時分割多元接続 (Time Division Multiple Access)

同じ周波数を使っている各ユーザ毎に利用する時間をずらして割り当てる方式

- PDC及びPHSで利用
- 送信側と受信側で同期をとる必要がある



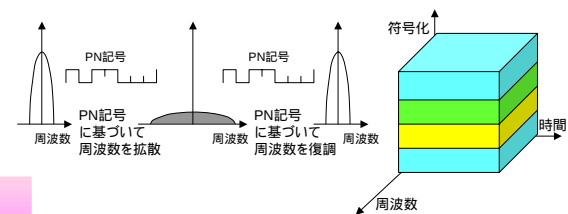
Ichiro Satoh

CDMA方式

時分割多元接続 (Code Division Multiple Access)

変調パターンを各ユーザ毎に変えて衝突を回避する

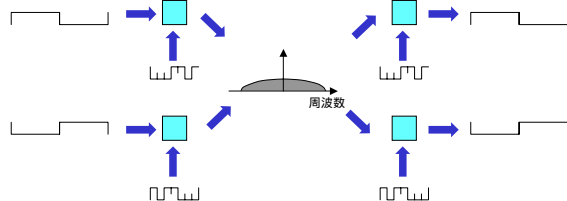
- IMT-2000 (例:FOMA) やIEEE802.11bなどで利用
- ノイズに強く、盗聴されにくい
- 装置が複雑化、高度な電力制御が必要



Ichiro Satoh

CDMA

- PN記号は互いに相関がないものとする
- PN記号により情報は拡散された電波はPN記号による情報に戻る



Ichiro Satoh

デジタル携帯電話

主要なデジタル携帯電話

方式 使用	PDC (日本)	IS-136 (アメリカ)	GSM (欧州)	PHS (日本)	IS-95 (アメリカ)
周波数帯	800MHz / 1.5GHz	800MHz / 1.9GHz	890-915MHz (上り) 935-960MHz (下り)	1.9GHz	800MHz
チャンネル間隔	50kHz	60kHz	400kHz	300kHz	1250kHz
アクセス方式	TDMA	TDMA	TDMA	TDMA	CDMA
タイムスロット	3	3	8	8	
変調方式	$\pi/4$ -DQPSK	$\pi/4$ -DQPSK	GMSK	$\pi/4$ -DQPSK	QPSK
伝送速度	42kbps	48.6kbps	270kbps	384kbps	32kbps
商用化	1993年	1993年	1992年	1995年	1996年

Ichiro Satoh

無線LAN

代表的な無線LAN規格

規格	データ伝送速度	通信可能距離	特徴
IrDA	赤外線	数m	指向性が高いが、不安定
Bluetooth	1Mbps	10m	近距離に限定し、小電力と小型化を実現
IEEE802.11b	11Mbps	50m	IPプロトコルに対応し、暗号化に対応

Ichiro Satoh

デジタル通信

デジタル信号の伝送方式

- デジタル信号をそのまま送出するベースバンド方式
- デジタル信号を搬送波に乗せて送出する搬送波伝送方式

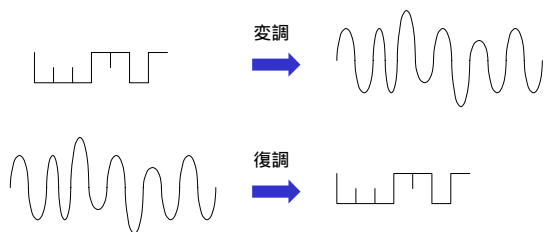
特に無線では、効率の良い電波送出と受信、効率の良い電波利用が必要
ベースバンド信号はそのまま無線の電波信号にはできない

- 情報を無線媒体(電波)にどのように乗せるか(変調方式)
- 電波を複数のユーザとどのように共有するか(アクセス方式)

Ichiro Satoh

デジタル変調

- デジタル信号を電波として伝送可能な周波数成分をもつ信号に変換
- もとの信号の情報を保ちながら、電波として送出しやすい形にする



Ichiro Satoh

変調の原理

ベースバンド信号のもつ情報により、振幅、周波数、位相を変化させる

振幅の変調 $S(t) = A(t) \sin \omega_c t$

周波数の変調 $S(t) = A_c \sin((\omega_c + \omega(t))t)$

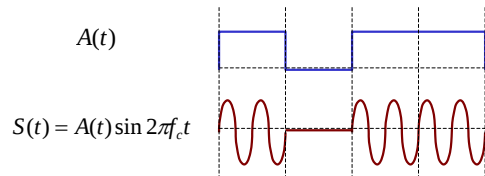
位相の変調 $S(t) = A_c \sin(\omega_c(t + \phi(t)))$

Ichiro Satoh

▶ デジタル変調方式: ASK

振幅変調 (Amplitude Shift Keying)

- 搬送波(キャリア)の振幅を入力デジタル信号に対応させて変化



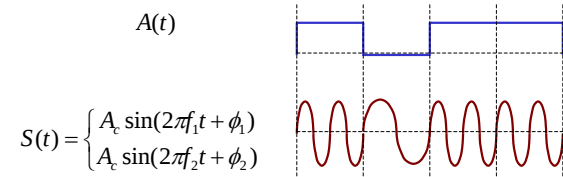
電波の減衰やノイズの影響を受けやすく、信頼性が低い

Ichiro Satoh

▶ デジタル変調方式: FSK

周波数変調 (Frequency Shift Keying)

- デジタル信号に応じて搬送波(キャリア)の瞬間周波数を離散的に変化させる変調方式



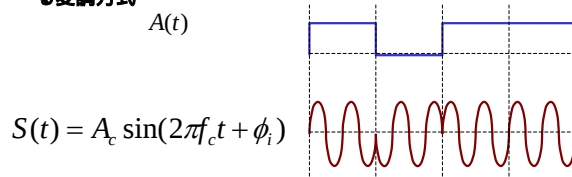
電波の減衰やノイズの影響を受けにくい、回路が簡単。

Ichiro Satoh

▶ デジタル変調方式: PSK

位相変調 (Phase Shift Keying)

- デジタル信号に応じて搬送波(キャリア)の位相を離散的に変化させる変調方式

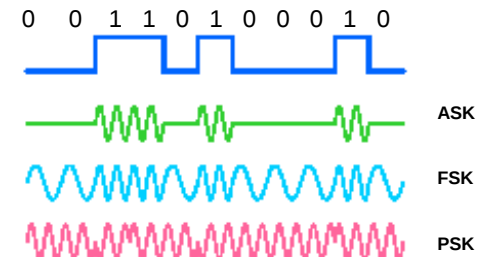


振幅は一定なので減衰やノイズに強い、周波数の有効利用

Ichiro Satoh

▶ デジタル変調方式の比較

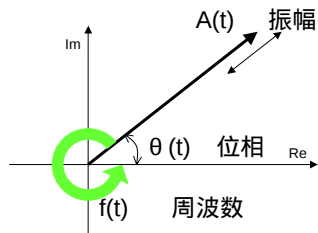
デジタル信号とその変調



Ichiro Satoh

変調の複素平面表現

変調: 搬送波の振幅、周波数、位相を変化

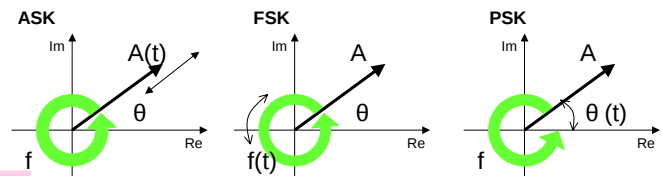


Ichiro Satoh

デジタル変調方式の比較

複素平面表示

- ASK: 搬送波が回転しながら振幅が変化
- FSK: 搬送波の回転速度が変化
- PSK: 搬送波の位相が変化



Ichiro Satoh

多値変調

基本的な変調方式は、1ビットのデジタル情報を2種類の波形で送信

しかし、伝送では2種類に限定する必要はなく、たくさんの波形を使って一度に複数ビットを転送することができる(効率が良い)

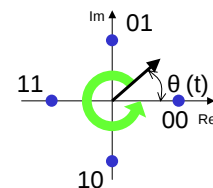
多値変調方式では、2種類よりも多い送信波形を用いる変調方式

Ichiro Satoh

デジタル変調方式: QPSK

4-PSK (Quarter Phase Shift Keying)

位相の変化に4つの状態 (00, 01, 10, 11)



デジタル信号: 00010011

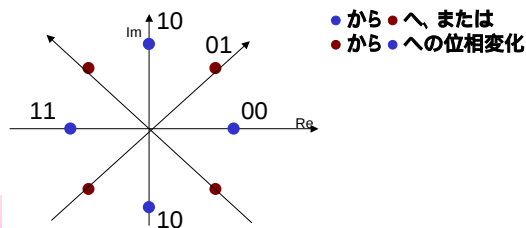
多値化: 00 01 00 01
 $\theta(t)$: $90^\circ \rightarrow -90^\circ \rightarrow 180^\circ$

ただし、 180° 位相シフトは波形が反転するので負担が多き

Ichiro Satoh

▶ デジタル変調方式: $\pi/4$ -QPSK

位相変化を $\pm 45^\circ$ と $\pm 135^\circ$ に制限し、位相反転を回避
 $\pm 45^\circ$ ずれた二つのQPSKを構成



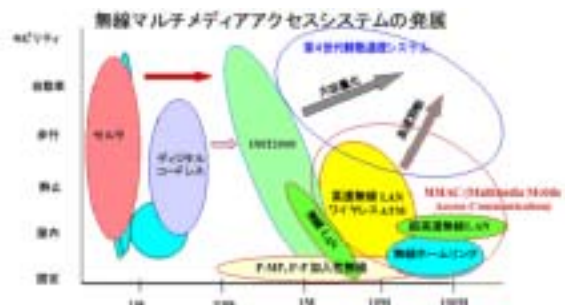
Ichiro Satoh

▶ 携帯電話の歴史

- 第1世代
アナログ式携帯電話(セルラー式)
音声のみ
- 第2世代
デジタル式携帯電話(セルラー式 + TDMA) 例:PDC、GSM
音声 + 低速データ通信
- 第3世代
デジタル式携帯電話(セルラー式 + CDMA)
音声 + 高速データ通信
- 第4世代
デジタル式携帯電話(セルラー式、アドホックネットワーク?)
動画像通信

Ichiro Satoh

▶ 無線通信の広がり



Ichiro Satoh

▶ 第3世代携帯電話

第3世代(IMT2000)の特徴

- 固定網並の高品質な音声サービス
- 144-384kbps、最大2Mbps
- 屋内から屋外までの多様な運用環境
- 高速モビリティ(耐フェージング)
- 周波数資源の有効活用(2GHz帯)
- 衛星も含めたグローバル化
- パーソナル及びターミナルモビリティ

Ichiro Satoh

▶ 第4世代携帯電話

第4世代移動通信システム

- 伝送レートBest Effort化(最大20Mbps)
- 時間・空間干渉抑圧技術による大容量化
- フェージングに強いマルチキャリア変調
- マルチメディアに適した高度アクセス技術
- IPパケットによるノン・リアルタイム伝送
- 利用環境に応じた周波数・電力有効利用
- 異なる要求品質(QoS)への対応は必須

Ichiro Satoh

▶ まとめ

移動通信システムの特徴

- セル小型化による周波数再利用率の向上
- TDMA,CDMAによる帯域の有効利用
- 情報信号の狭帯域化による高密度化
- 広帯域化による処理利得・大容量化
- 誤り訂正技術、変調技術による低電力化
- 耐マルチパス技術(ダイバシティ・等化)
- デジタル化による大容量化・広帯域化

Ichiro Satoh

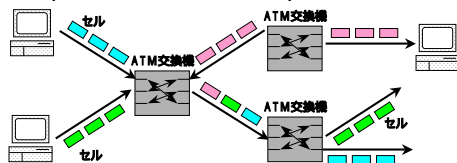
▶ 補足説明: ATM

B-ISDN用に開発された基幹伝送システム(=電話交換機に近い)

- 通信データをセルと呼ぶ小さな固定長パケットにより転送
- セルに付加した宛先情報に基づいて交換機が宛先・別の交換機に転送
- 通信相手との間に仮想的な通信回線を設定した後に通信

PVC(Permanent Virtual Circuit) 仮想回線の経路を事前に設定

SVC(Switched Virtual Circuit) 仮想回線の経路を動的に設定



リアルタイム性が高い、QoS性保証が可能

Ichiro Satoh

▶ 補足説明: ATM

固定長の小サイズパケット

53バイト=ヘッダ(5バイト)+データ(48バイト)

データ分割に生じる端数無駄の減少
交換機におけるセルの蓄積・時間が減少
交換機処理の簡単化

ATMは電話交換機用に設計されたため、コンピュータ通信への利用には問題がある

マルチキャスト(一対多)通信ができない
UDPのようなコンクッションレス通信でも仮想回線を設定する必要がある
セルサイズが小さい(ヘッダ領域がセルサイズの9.4%)

IPパケットが流れるATMネットワークにおける
セル消失率が0.1%とすると8キロバイトのIP
パケット(セルが171個)の消失率は
 $1 - (1 - 0.001)^{171} = 15.7\%$

次世代ATMではコンピュータ
用通信を考慮した改良が行わ
れている

Ichiro Satoh