

高速無線パケット通信システムに関する研究*

A Study on the High Speed Radio Packet Communication System

村田 正¹⁾

Massashi Murata

1. まえがき

近年、個人情報¹⁾の双方向高速通信が脚光を浴びてきている。特に、自動車などの不特定多数を対象とした移動体通信に於いて、無線パケット通信が注目を集めている。然るに現在の通信方式では、デジタル周波数偏移 (FSK) 変調を用いているため、無線周波数の有効利用の観点から高々1200ボー程度の通信速度しか得られていない。これに対し、デジタル信号処理 (DSP) 方法を用いた直接周波数変調方式 (DFM) 方式は、高速のパルスをトランスバースフィルタにより帯域制限して、限られた周波数帯域内で高速の無線パケットの送受信をすることが可能であり、非常に有効性が高い。本研究では、この高速無線パケット通信システムに関して、最初にパケット伝播特性の検討として、実際に自動車を走行させた電波伝播特性について測定値との比較検討をする。^[9] その後、無線パケット通信用の機器に関して、高速変調のための改良方法について記述する。

2. 高速無線パケット伝播特性について

陸上移動体通信では建造物の反射などにより多重波伝搬路が形成されるため、移動局が走行すると受信波の包絡線と位相はランダムに変動する。一般に陸上移動体通信路は包絡線がレイリー分布に従って変動するレイリーフェージング通信路になり、データ伝送時に頻繁にビット誤りが発生する厳しい条件となる。

このような厳しい条件下で比較的簡単に信頼度の高い伝送を実現する手段としては、送信データをパケット化し自動再送要求 (ARQ) 方式を用いる方法がある。ARQ 方式は受信したパケットの信頼度が低い場合、自動的にパケットの再送を要求する方式であり、ある程度の伝搬遅延が許される場合に適用できる。この方式は変動する伝搬路状態に合理的に対応できる誤り制御方式であり、データ通信に広く用いられている。^{[1][2]}

ところで陸上移動体通信では、移動体の走行に伴う周辺地形の変化によって包絡線の瞬時値変動とともにその短区間中央値も緩やかに変動する。この緩やかな変動はシャドウイングと呼ばれ、このため各パケット間の誤りに相関が生じる。従って、陸上移動体通信における ARQ 方式の伝送特性を厳密に解析するにはレイリーフェージングとともにシャドウイングを考慮する必要がある。しかしシャドウイングを考慮した ARQ 方式の特性評価は Stop-and-Wait ARQ (SAW) 方式に関するものが一例だけである。^[3]

本稿では、陸上移動体通信における SAW 方式と、パケット誤りに相関がある通信路では

* 平成4年5月 原稿受理

1) 大阪産業大学 工学部

スループット特性が改善されると報告されている^[4] Go-Back-N ARQ (GBN) 方式のスループット特性を評価する。次章では本稿で検討する通信システムモデル並びにシャドウイングの特性について測定結果をもとに述べる。また同じくシャドウイングを考慮した場合の両方式のスループット特性について計算機シミュレーションの結果を中心に比較、検討する。

3. 実験のシステムモデル

3.1 通信システム

本節では簡単なデータ伝送システムとして、誤り検出符号と ARQ 方式を誤り制御方式に用いた半二重データ伝送システムを考える。周波数は800MHz 帯で変復調方式は2値周波数変調/非同期検波(非同期 FSK)方式、伝送速度は9600bit/sとする。

3.2 誤り制御方式

誤り制御方式としては誤り検出符号と SAW、GBN 方式を使用する。それぞれの誤り再送手順を図1に示す。

SAW 方式では、基地局は誤り検出符号化されたデータパケットを1つ送信する。移動局では受信パケットに誤りが検出されれば再送要求を、また誤りがなければ完了を通知する応答パケットを送信する。基地局ではその応答パケットに従い、誤りパケットの再送信または新パケットの送信をする。

GBN 方式では、基地局は誤り検出符号化されたデータパケットをN個連続して送信する。移動局ではN個の受信パケットのうち最初に誤ったパケット以後のパケットは廃棄し、最初に誤ったパケットの番号を通知する応答パケットを送信する。N個すべてに誤りがない場合は完了を通知する応答パケットを送信する。応答パケットを受信した基地局は、応答パケットで通知された誤りパケット番号以後のパケットをN個連続して再送信する。

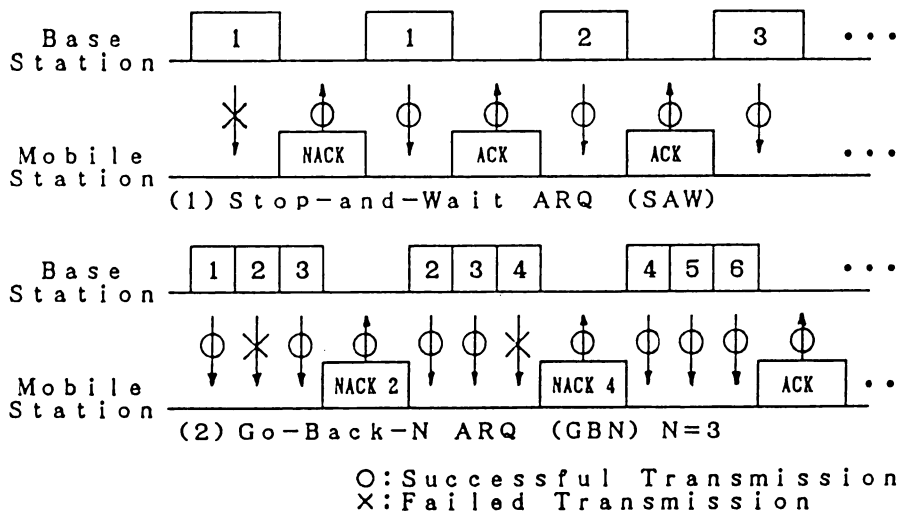


図1 誤り再送手順

本節では半二重通信路を仮定し、両方式とも（応答パケットを待ち時間 [パケット処理時間、応答パケット伝送時間] ×（伝送速度）は120bits とする。また応答パケットの誤りはないと仮定し、誤り検出は完全であると仮定する。

3. 3 受信レベル変動

陸上移動体通信における受信レベル変動は一般に局間の距離変化にともなう長区間中央値変動、数十m程度の区間にわたる緩慢な短区間中央値変動（シャドウイング）、数m程度の区間での急激な瞬時値変動（フェージング）の三つで表示される。^[5] 本節で考慮する受信レベル変動はこのうちシャドウイングとフェージングである。

一般に市街地ではシャドウイングは標準偏差 6 dB 程度の対数正規分布に従い、その最高周波数は最大ドップラー周波数の数百分の一^[6]、変動の電力密度スペクトルはほぼ変動周波数の 2 乗に反比例する^[7] と報告されている。

図 2 に大阪市内で測定したシャドウイングの電力密度スペクトル特性を示す。測定周波数は 842MHz、送信地点は測定場所から約 15km 離れた標高約 600m の地点である。この結果より最大ドップラー周波数 $f_d = 30\text{Hz}$ の時、シャドウイングの自己相関関数 $R(\tau)$ は

$$R(\tau) = \exp(-0.108\tau) \quad (1)$$

で近似できる。またその分布は一般に報告されているように対数正規分布であることが確認できた。本節では受信レベル変動に関して以下の条件を設ける。

1. 1 パケット内の短区間中央値は一定。
2. 各パケット間の瞬時値変動は独立である。
3. シャドウイングは標準偏差 6 dB の対数正規分布に従い、式(1)に示す自己相関関数を有する。

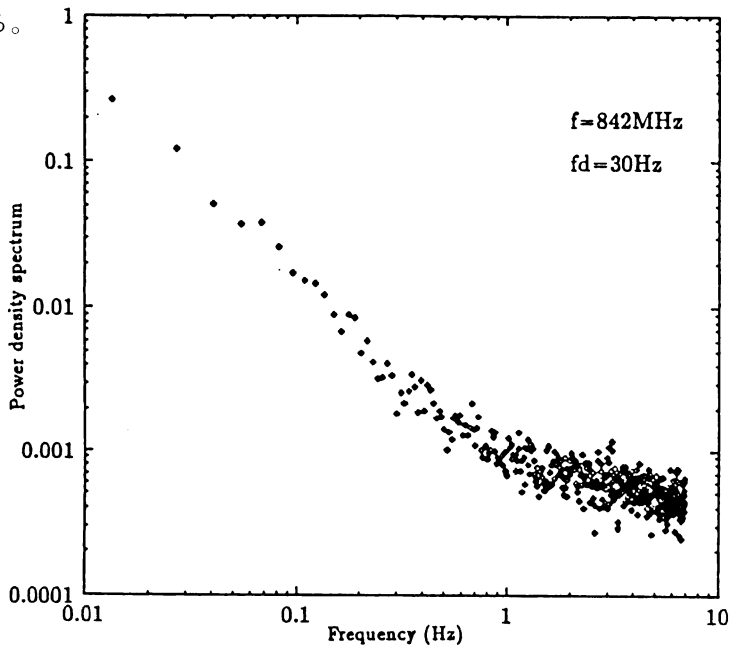


図 2 シャドウイングの電力密度スペクトル特性

3. 4 スループット特性

最大ドップラー周波数 $f_d = 30\text{Hz}$ のレイリーフェージング下における5種類の packets 長 (120、240、480、960、1920bits) に対する短区間平均 CN 比対平均 packets 誤り率特性を 図 3 に示す。 $f_d = 30\text{Hz}$ は移動体の速度約 36km/h に相当する。ここで1 packets 内に1ビット以上の誤りがあるものを packets 誤りとした。レイリーフェージング下での packets 誤り率は packets 長が大きくなると解析的に求めることが困難であり^[8]、この結果は計算機シミュレーションによるものである。

この結果を用いて各方式のシャドウイング下でのスループット特性を評価する。最短 packets 長は120bitsであり、2.3の条件(2)を満足する。すなわち、シャドウイング下における各 packets 誤り率はその時点での短区間平均 CN 比で規定できる。そしてこの短区間平均 CN 比は dB 値ではガウス分布に従い、式(1)に示す自己相関関数を有する。誤り検出符号を含む packets 内のオーバーヘッドは40bitsとし、スループット η は次の通り定義する。

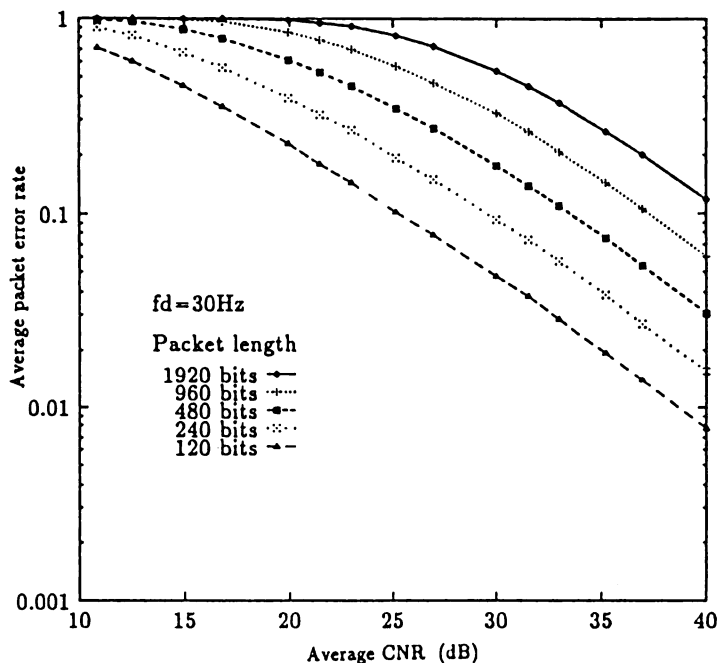


図 3 レイリーフェージング下における packets 誤り率特性

$$\eta = \frac{\text{規定の伝送速度での情報ビットの伝送時間}}{\text{実際の伝送に要した時間}}$$

図 4 はシャドウイングを考慮した場合としない場合の GBN 方式の長区間平均 CN 比 (以下単に CN 比と記す) 対スループット特性である。 packets 長は480bits、GBN 方式の連続送信数 $N = 5$ である。ただし、シャドウイングを考慮する場合の各 CN 比に対する平均 packets 誤り率と、考慮しない場合の同一 CN 比に対する平均 packets 誤り率は同じである。一般に無限回の再送が許される場合、SAW 方式では伝送成功 packets 数は正しく受信された packets 数と同じになるので、平均 packets 誤り率が同じなら、シャドウイングを考慮しても

しなくても同じスループット特性を示す。一方GBN方式では、連続して送信される N 個の packets のうち最初に誤った packet 以後の packet は、たとえ正しく受信されても廃棄される。つまり伝送成功 packet 数と正しく受信された packet 数は一般に一致しない。

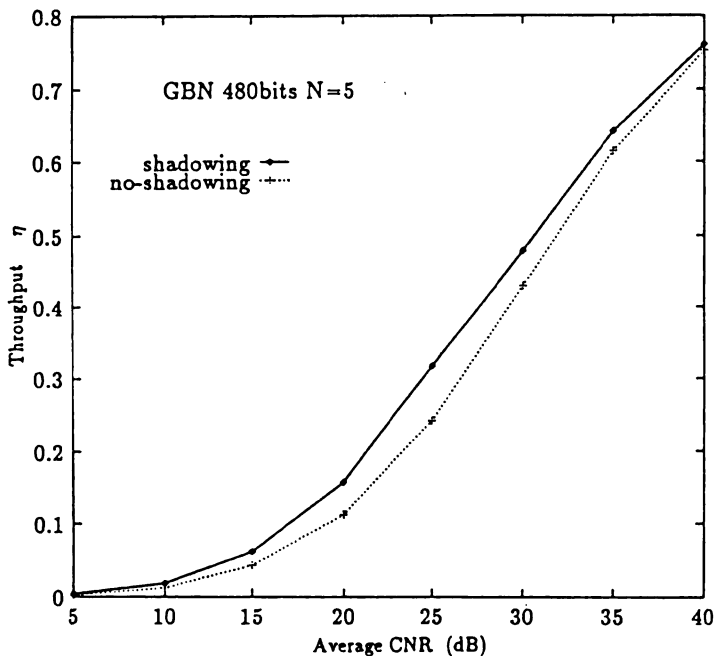


図4 長区間平均 CN 比に対する GBN 方式 ($N=5$) のスループット特性

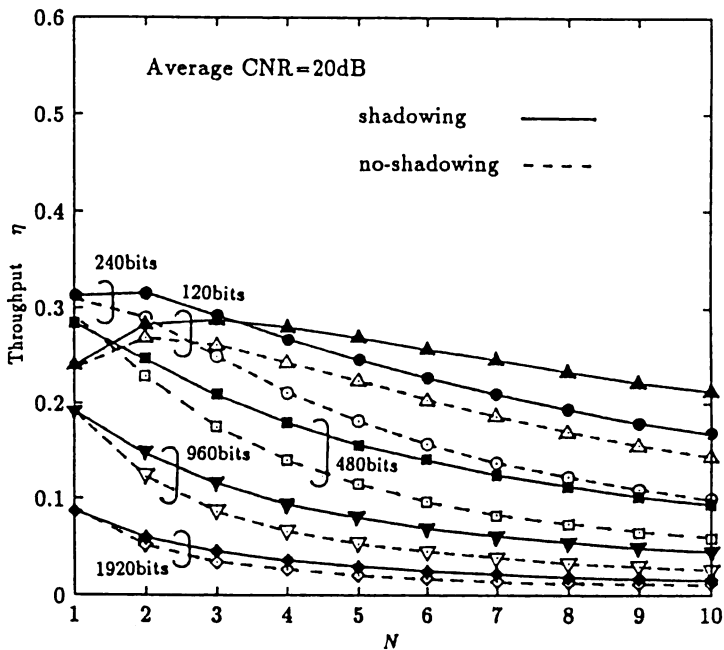


図5 連続送信数 N に対する GBN 方式のスループット特性 (長区間平均 CN 比=20dB)

そのためパケット誤り率が同じでも誤りがランダムに現れるより、誤りが正の相関を持って現れる方がスループットが向上する。すなわちシャドウイングを考慮する場合としない場合でスループット特性に違いが生じる。

次にGBN方式の連続送信数 N とスループットの関係、それぞれのパケット長について示す。図5. 6はそれぞれCN比が20dB、30dBの場合のシャドウイングを考慮した場合としない場合のスループット特性である。 $N=1$ はSAW方式に相当する。 N が大きくなるにつれて応答パケットの待ち時間が減少するためスループットは向上する。一方 N が大きくなると正しく受信しても廃棄されるパケット数が増加するため、スループットは低下する。そこで一般に N の最適値が存在する。

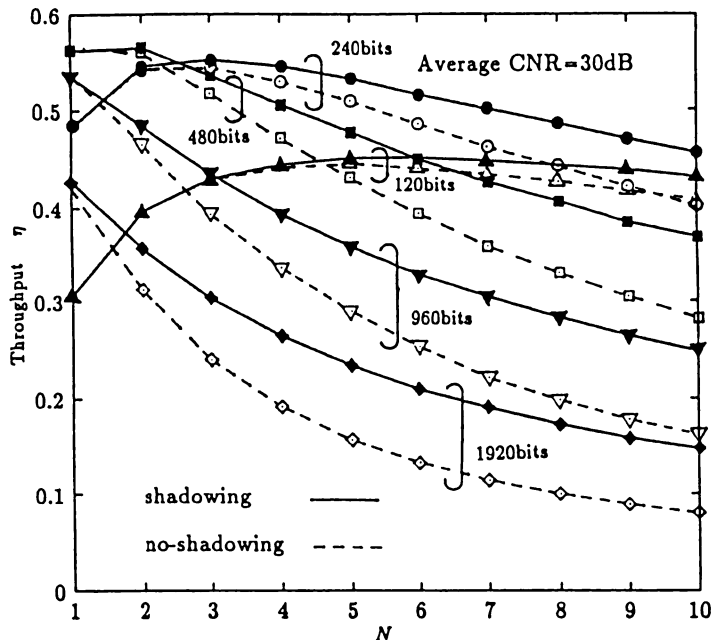


図6 連続送信数 N に対する GBN 方式のスループット特性
(長区間平均 CN 比=30dB)

シャドウイングを考慮しない場合、CN比20dBでは、パケット長120bits以外は N の増加による応答パケット数の減少よりパケット廃棄によるスループットの劣化が大きいため、SAW方式が最大のスループットを与える。パケット長120bitsでは $N=3$ の時、最も高いスループットになるが、全体ではパケット長が120bitsまたは240bitsのSAW方式が最も高いスループットを示す。一方、シャドウイングを考慮すれば、考慮しない場合と比べGBN方式のスループットが向上し、パケット長240bits、 $N=2$ のGBN方式が最も高いスループットを示す。また N を大きくした場合のスループットの低下も小さくなる。

CN比が30dBの場合は、シャドウイングを考慮しなければパケット長480bitsのSAW方式が最も高いスループットを示し、考慮すればパケット長480bits、 $N=2$ のGBN方式が最も高いスループットを示す。

どちらの場合も、SAW方式ではシャドウイングを考慮してもしなくてもスループットに差はない。

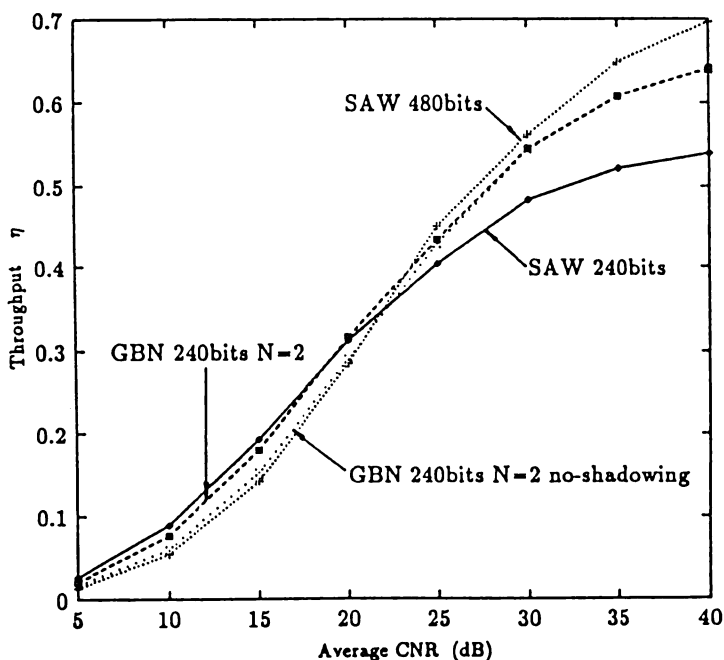


図7 長区間平均 CN 比に対する GBN 方式 ($N=2$),
SAW 方式のスループット特性

図7にパケット長240bitsのSAW方式、パケット長480bitsのSAW方式、シャドウイングを考慮した場合のパケット長240bits、 $N=2$ のGBN方式、考慮しない場合のパケット長240bits、 $N=2$ のGBN方式の4通りのスループット特性を示す。

SAW方式を用いた場合、CN比 $>$ 約22dBではパケット長480bitsが良く、CN比 $<$ 約22dBではパケット長240bitsが良い。例えばパケット誤り率の小さいCN比30dBでは、オーバーヘッドの割合が小さいパケット長480bitsがパケット長240bitsより約16%高いスループットを示す。逆にCN比15dBではパケット誤りが増加するため、パケット誤り率の小さいパケット長240bitsがパケット長480bitsより約37%高いスループットを示す。

ここでパケット長240bits、 $N=2$ のGBN方式を用いるとSAW方式より応答待ち時間が減少するため、CN比30dBでのスループットはパケット長240bitsのSAW方式より約13%高くなり、パケット長480bitsのSAW方式より約3%低くなる程度に改善される。これはシャドウイングを考慮する場合もしない場合もほぼ同じである。しかしCN比 $<$ 約22dBでは異なり、シャドウイングを考慮しない場合、CN比の低下に伴うスループットの低下は、パケット長480bitsのSAW方式に近い特性を示す。一方、シャドウイングを考慮した場合、スループットの低下は小さくなり、パケット長240bitsのSAW方式に近い特性を示す。例えばパケット長240bitsのSAW方式と比較してみると、シャドウイングを考慮しない場合、CN比20dBではスループットは約7%低く、CN比15dBでは約22%低い。一方、シャドウイングを考慮した場合、CN比20dBではスループットは逆に約1%高く、CN比15dBでは約7%低くなる程度に改善される。

このように、シャドウイングを考慮して評価するとCN比が変化する場合にパケット長

240bits、 $N = 2$ の GBN 方式がパケット長を固定した SAW 方式より平均的に良い特性を示す。

以上の結果より、シャドウイングを考慮すると、CN 比が低下しパケット誤りが増加した場合の GBN 方式のスループットの低下が小さくなるが、誤りが少ない領域ではシャドウイングを考慮しない場合と同様な特性を示すことがわかった。

4. 移動実験に於ける検討

陸上移動体通信におけるパケット伝送で、誤り制御方式として誤り検出符号と SAW、GBN 方式を用いたときの伝送特性を、シャドウイングを考慮して評価した。その結果、シャドウイングを考慮した場合の GBN 方式のスループット特性は、それを考慮しない場合より改善され、パケット誤りの相関と関わりのある ARQ 方式を陸上移動体通信環境下で評価する場合はシャドウイングを考慮すべきことがわかった。さらにシャドウイングを考慮してスループットを評価した結果、適当なパケット長、連続送信数 N を選択すると長区間平均 CN 比が変化した場合、パケット長固定の SAW 方式と比較して平均的に良い特性を得られることがわかった。しかし、各 CN 比について最適なパケット長、連続送信数があるため、CN 比に適応してそれぞれを変化させればさらに良好なスループットが得られると考えられる。CN 比適応型の ARQ 方式については現在検討中である。今後、誤り訂正符号を付加した場合の特性を評価する予定である。

5. 高速無線パケット通信におけるハードウェアの構成

本節では、高速無線パケット通信システムのハードウェア構成に関して、実際に機器を使ってシステムを組み上げるための考察を行う。無線パケットによる高速通信方式としては、有線電話回線用モデムの変調方式を使った振幅・位相変調方式と、本研究で取り上げている直接周波数変調方式の 2 通りがあるが、前節までの無線伝送路の不安定性など考慮すると直接周波数変調方式の優位性が発揮できる。^[10] ここでは、インパルスレスポンス特性による周波数帯域の圧縮方法を取り入れたデジタル信号処理変調システムのハードウェア実現を試みる。

5. 1 ブロックダイアグラム

図 8 に一般的な無線パケット通信システムのブロックダイアグラムを示す。

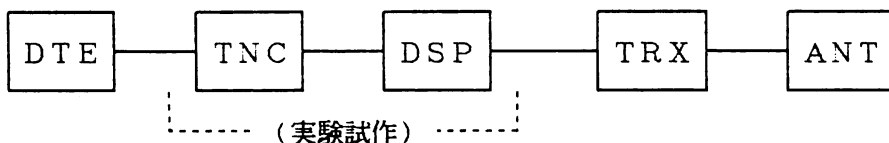


図 8 高速無線パケット通信システム

図において、DTE はパーソナルコンピュータなどのデータ端末を表し、TNC は DTE からの直列デジタル信号を無線パケット通信システムの通信プロトコルに従って送受信信号を

組み立てるコントローラを示す。DSPは本研究で取り入れたインパルス特性による周波数帯域幅削減のための信号処理部であり、使用する送受信機の特徴により最適な処理信号を作り出す。TRXは無線送受信機であり、またANTはアンテナを示す。いずれも本研究では、UHF周波数帯を使用した。以下に、本研究で試作したターミナルノードコントローラ(TNC)とデジタル信号処理回路(DSP)について記述する。また、使用する無線パケット送受信機の変復調回路の改造方法についても最後に記述する。

5. 2 ターミナルノードコントローラ (TNC)

パーソナルコンピュータなどの端末機器から送受信するデジタル信号は、RS-232Cと呼ばれる直列データ入出力端子からこの無線パケット通信用のコントローラに入り、有線電話回線と同様の通信プロトコルに従って、送受信の packets が組み立てられる。一般に無線回線では、伝送特性が前述のようにフェージングやシャドウイングの影響を受けるため、有線回線とは少々異なった通信プロトコル：AX.25を用いる。このためのコントローラをTNCと呼ぶ。内部構成は、以下の図9に示すように、簡単なLSIで構成される事が多い。

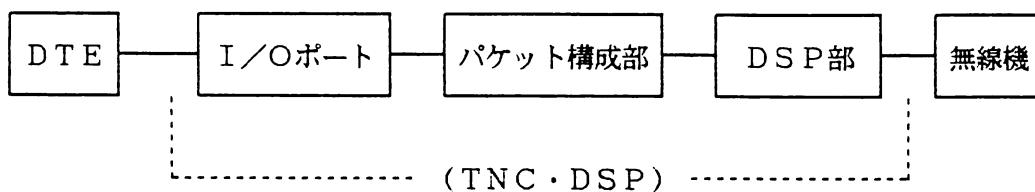


図9 TNCの構成

5. 3 DSPにおける高速モデム

図9に示したデジタル信号処理（DSP）部は、使用する無線周波数帯の送受信機のインパルスレスポンス特性を測定して、それに対応する狭帯域信号を発生される働きをする部分である。このブロックを図10に示す。

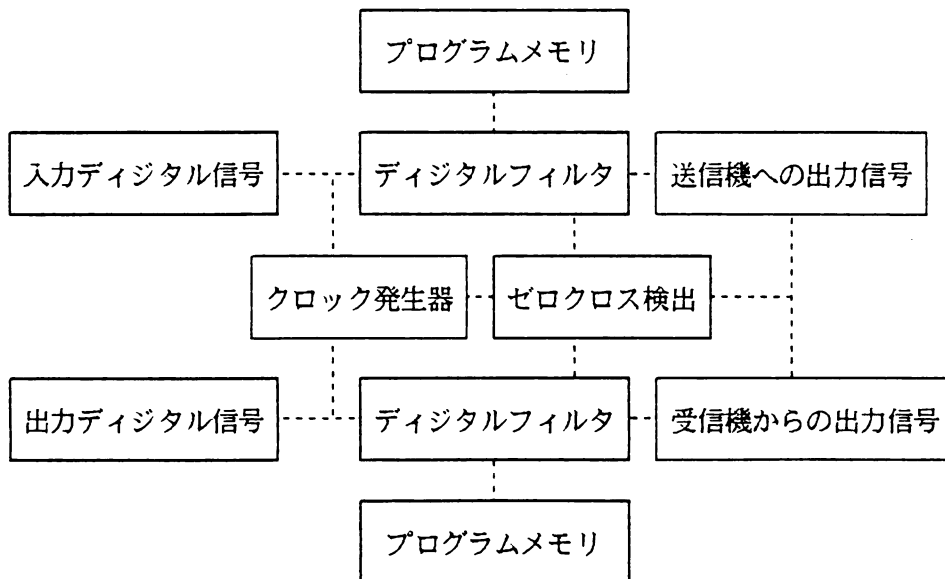


図10 DSPのブロックダイヤグラム

5. 4 送受信機の改造法

デジタル信号処理（DSP）部を通過した送信信号は、無線機の送信用の搬送波発振器の電圧制御発振器（VCO）に送られる。一般に現在の無線送信機の搬送波の発生には、可変容量コンデンサとしてバラクタダイオード（VVC：Variable Voltage Control Diode）が用いられているので、このVVCに直接信号を加える事により、直接変調が可能である。実験では1.2GHz帯の無線機を用いて送信信号が9600ボーの場合には、約7.5kHzの周波数偏移が得られた。これは電波法に於けるデジタル変調方式の規定内であり、十部に満足できる範囲である。次に受信信号に付いては、受信機の周波数弁別器（ディスクリミネータ）部から取り出す。周波数変調されているため、受信信号には振幅情報がないので、十分にリミッタをきかせ振幅ノイズを取り去ってから、信号のクロック再生のためにゼロクロス検出を行う。このあとの操作は、普通のモデムと全く同様である。無線送受信機との接続には、十分にシールドされたケーブルを用い、送信信号の回り込みによる誤動作を避けるようにする必要がある。

6. まとめ

以上に詳記したように、本研究では、無線パケット通信システムの高速化に付いて、直接周波数変調を用いる事により、無線信号の伝播に於けるフェージングやシャドウイングの間

題を解決しようと試みた方式であり、現在の実験システムでは、使用周波数帯：1.2GHz、パケット通信速度：9600ボー、無線周波数偏移：7.5kHz 以内という好結果を得ている。現在24時間運用で約6ヶ月の実験中であるが、一度も支障なく動作しており、非常に満足できる結果である。最後に、本研究の一部は、大阪産業大学産業研究所の個人研究特別助成金の援助を受けて行われたものである。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、前半の無線パケット伝送特性の測定に多大な協力をいただきました、関西テレターミナルシステム推進協議会の池田太一氏、島伊三次氏、伊藤栄一氏に感謝します。また、まとめるにあたっての協力をいただきました大阪大学工学部通信工学教室森永研究室の教授森永規彦博士、助手原晋介博士、荒木正氏（現住友電気工業株式会社勤務）、荒木誠氏（現関西電力株式会社勤務）、大学院生の岡田実氏、同じく長田雅裕氏に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] S. Lin, D. J. Costello Jr., M. J. Miller : "Automatic Repeat Request Error Control Schemes", IEEE Commun. Magazine, vol.22, No.12, PP.5-17, Dec.1984
- [2] R. A. Comroe, D. J. Costello Jr. : "ARQ schemes for data transmission in mobile radio systems", IEEE Trans. Veh. Tec., VT-33, PP.88-97, Aug.1984
- [3] 広池彰、松本正 : "Stop and Wait ARQ を用いた移动通信制御手順の特性", 電子情報通信学会論文誌, B-II, vol.J72-B-II, No.6, PP.223-230, Jun.1989
- [4] C. H. C. Leung, Y. Kikumoto, S. A. Sorensen : "The Throughput Efficiency of the Go-Back-N ARQ Scheme Under Markov and Related Error Structures", IEEE Trans. Commun., vol.36, No.2, PP.231-234, Feb.1988
- [5] 奥村善久、大森英二 : "陸上移動無線の電界強度とその変動特性", 電子通信学会誌, 50, 11, PP.2108-2115, Nov.1967
- [6] 奥村善久、進士昌明 : 移动通信の基礎, PP.218-221, 電子情報通信学会, 1988
- [7] 村田嘉利、安達文幸、岡坂定篤 : "移动通信における短時間受信レベルの変動速度", 電子通信学会総合全国大会予稿集 2156, 1981
- [8] 宮垣嘉也、森永規彦、滑川敏彦 : "伝動体データ伝送における誤り訂正符号, インターリービング, ダイバーシチ合成複合対策効果", 電子通信学会論文誌, vol.J67-B, No.6, PP.599-606, Jun.1984
- [9] 荒木正、荒木誠、原晋介、村田正、森永規彦 : "陸上移動体通信におけるパケット伝送特性に関する一考察", 第13回情報理論とその応用シンポジウム予稿集 (SITA' 90) PP.617-622, Jan.1991
- [10] 村田正 : "無線パケットの特徴と課題", 電子情報通信学会無線通信システム時限研究専門委員会資料 RCS88-3, PP.1-11, Mar.1989