

UNA ESTRATEGIA DE CONTROLE DE ERRO HIBRIDA PARA UMA REDE DE PACOTE VIA RADIO

Flavio Barbosa Toledo	LNCC-RJ
Edmundo de Souza e Silva	NCE/UFRJ
Luis Felipe M. de Moraes	IME-RJ

SUMARIO

Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma estratégia de controle de erro híbrida baseada em correção de erro (FEC- "Forward Error Correction") e protocolo de retransmissão (ARQ- "Automatic repeat Request") para uma Rede de Pacote via Radio (PRNET- "Packet Radio Network"). O controle de erro tem como objetivo garantir a integridade dos dados e manter o desempenho do sistema dentro de níveis aceitáveis em termos de confiabilidade e "throughput" (vazão).

1. INTRODUÇÃO

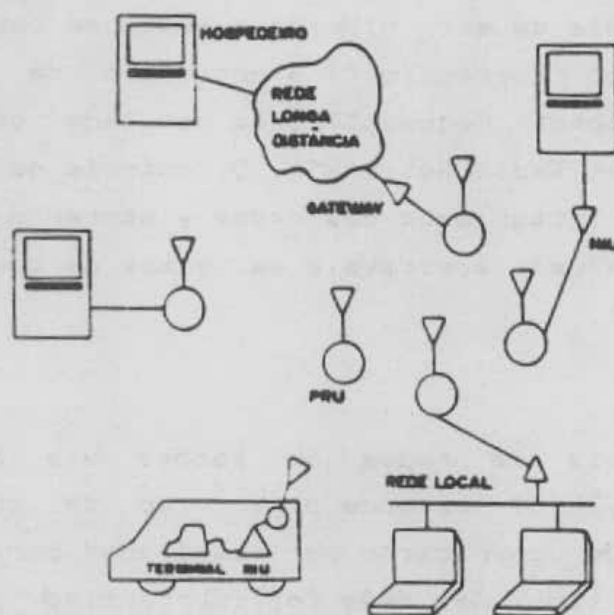
A tecnologia de redes de pacote via rádio (PRNET- "PACKET RADIO NETWORK") estende o conceito de chaveamento de pacote em sistemas de comunicação por computador para o domínio do rádio-móvel. Esse tipo de rede foi introduzido para suportar determinados requisitos de comunicação de dados, muitas vezes desejáveis, mas que não são oferecidos pelas redes convencionais, como por exemplo: suporte para usuários móveis, maior grau de conectividade entre as estações da rede e maior facilidade de desdobramento (retirada e inserção das estações na rede). Este tipo de tecnologia também soluciona o problema de comunicação de dados em áreas onde a interconexão de computadores por cabo se torna impraticável [KHAN78].

As PRNET's oferecem uma alternativa eficiente de utilização de canais de múltiplo acesso, particularmente no caso de usuários móveis, permitindo a comunicação em tempo real entre as seguintes entidades (figura 1):

- hospedeiro/hospedeiro ("host")
- terminal/hospedeiro
- terminal/terminal

O componente básico é a unidade de rádio-pacote (PRU- "Packet Radio Unit"), que consiste de dois subsistemas: o rádio e um controlador digital. O subsistema de rádio é responsável pela

transmissão e recepção dos sinais ao longo do canal, enquanto o controlador digital realiza basicamente as funções de processamento do pacote (unidade de informação trocada pela rede) recebido, decisões de encaminhamento e envio para a próxima PRU. Todas as PRU's da rede apresentam a mesma estrutura e podem estar conectadas a computadores hospedeiros, terminais ou simplesmente desconectadas, funcionando como repetidor. Este ultimo caso decorre da necessidade de manter a comunicação entre as estações da rede quando não existe completa conectividade.



PRU - "Packet Radio Unit" (Unidade de Rádio-Pacote)

NIU - "Network Interface Unit" (Unidade de Interface de Rede)

Figura 1. Estrutura geral de uma PRNET

Quando o usuário deseja enviar mensagens de um terminal ou computador hospedeiro que não dispõem dos protocolos necessários para o estabelecimento da comunicação, deve-se utilizar a interface NIU ("Network Interface Unit"). Esta interface realiza os protocolos de comunicação da rede.

Atualmente existem alguns sistemas em operação experimental, geralmente conduzidos por organizações militares, e outros já implementados no setor comercial e na comunidade de radioamadores, mas que infelizmente não dispõem de divulgação [NIEL87]. O sistema ALOHA, desenvolvido no Havaí por volta de 1970, é pioneiro na tecnologia de rede de pacote por rádio [KHAN78]. A rede DARPA, desenvolvida pela agência de pesquisa do departamento de defesa norte-americano, possui três PRNET's em

operação experimental [TOBA84]. Na Inglaterra, o laboratório Royal Signals and Radar Establishment está desenvolvendo uma PRNET com características especiais para operação em ambientes de combate [DAVI87]. No setor civil, existem várias propostas para aplicação desta tecnologia. Empresas como a AT&T, Hewlett-Packard, Motorola e outros, estão desenvolvendo vasta pesquisa para a construção de redes de pacote via rádio.

O principal objetivo de uma PRNET é oferecer as vantagens de chaveamento de pacote para usuários de ambiente móvel (particularmente importante para aplicações militares). Por outro lado, essa mobilidade é um dos principais responsáveis pela variação das estatísticas de erro do canal. Esse fator, aliado à inerente não confiabilidade de um canal de rádio, aumentam a probabilidade de ocorrência de erros nas transmissões e reduzem consideravelmente o desempenho do sistema. Torna-se necessário, então, a utilização de algum tipo de estratégia de controle de erro com o objetivo de garantir não apenas a integridade dos dados, mas também assegurar o desempenho da rede dentro de níveis aceitáveis.

Este trabalho apresenta algumas alternativas para controle de erro em redes de pacote via rádio (PRNET) e mais especificamente uma estratégia de controle de erro para uma PRNET experimental desenvolvida conjuntamente pelo Núcleo de Computação Eletrônica (NCE) da UFRJ, IME/RJ, PUC/RJ e com o apoio da Indústria de Material Bélico do Exército (IMBEL). O desenvolvimento desta rede tem como objetivo criar uma infraestrutura básica para a consolidação de um núcleo de estudo deste tipo de tecnologia. Na seção 2 são apresentadas sumariamente as características da PRNET experimental. Na seção 3 são mostradas algumas estratégias de controle de erro. A seção 4 apresenta o desenvolvimento feito para a escolha ótima dos parâmetros de operação do controle de erro e a seção 5 apresenta as conclusões.

2. PRNET EXPERIMENTAL

A arquitetura de protocolos da rede experimental sendo desenvolvida corresponde ao modelo de referência para interconexão de sistemas abertos (OSI) da ISO, com protocolo de acesso ao meio CSMA 1-persistente. A estação é qualquer microcomputador PC compatível e os elementos da unidade de PRU são os seguintes:

INTERFACE

ESTAÇÃO/MODEM - esta interface é ligada à porta serial da estação através de um cabo RS-232 e, ao

	modem, através de um elo de corrente.
MODEM	- modulação FSK e taxa de transmissão de 300 a 1200 bps.
RADIO	- modulação FM ("narrow band") e faixa de operação de 30 a 100 MHz.

Os serviços oferecidos atualmente pela PRNET são os seguintes:

- Mini-correio (mensagens curtas)
- Documento (mensagens de tamanho médio)
- transmissão de arquivo
- execução remota de programas

Os parâmetros de operação da rede, mostrados na tabela abaixo, foram escolhidos de acordo com as características do equipamento disponível:

FREQUENCIA DE OPERAÇÃO	70,5 MHz
TAXA DE TRANSMISSÃO	300 bps
MODULAÇÃO	NBFM ("narrow band")
CANAL	"half-duplex"
CONECTIVIDADE	completa (com previsão para "multi-hop")

Tabela 1. Parâmetros de operação da PRNET experimental.

A frequência de operação escolhida está vinculada à faixa permitida pelos rádios do exército (30 a 100 MHz e largura de faixa do canal de 25 KHz). Esta frequência é interessante para comunicação de estações móveis, pois abrange maior extensão de área sem precisar de repetidores e apresenta melhores características de propagação e menor sensibilidade ao terreno. No caso de frequências superiores (VHF alta ou UHF), precisa-se de linha de visão entre PRU's para que a comunicação seja estabelecida, o que, eventualmente, requer a utilização de um sistema de repetidores. Em compensação, essas faixas permitem uma maior taxa de transmissão. Assim, se as necessidades do usuário em termos de tráfego podem ser satisfeitas com taxas de transmissão baixas (tipicamente < 20 kbps), é possível obter uma rede com topologia simplificada, sem repetidores e com conexão completa

("full link connectivity"). Caso o usuário exija altas taxas de transmissão, seria necessário uma faixa de frequência maior e, por conseguinte, a possibilidade de utilização de repetidores. Por outro lado, o sistema seria dotado de maior capacidade para suportar o "overhead" dos algoritmos de gerenciamento e controle da rede. A nível militar não é desejável o uso de repetidores, pois representam mais uma ameaça de possíveis alvos. Neste caso, deve-se optar por parâmetros de operação que forneçam maior conectividade.

Devido à natureza "bursty" da demanda de tráfego do usuário, optou-se pelo protocolo de acesso ao meio CSMA (1-persistente). Esse tipo de tráfego se caracteriza por transmissões pouco frequentes, mas quando ocorrem, exigem grandes transferências de dados em intervalos pequenos.

3. ESTRATEGIAS PARA CONTROLE DE ERRO

A ocorrência de erros em qualquer sistema digital de comunicação de dados é fator inevitável. Portanto, nenhum sistema real pode ser projetado sem considerar tais efeitos, principalmente nos casos onde o canal de transmissão apresenta considerável susceptibilidade a ruído (por exemplo, canal de rádio).

Existem basicamente duas técnicas para realizar o controle de erro em sistemas de comunicação digital de dados:

- detecção de erro e pedido de retransmissão
(ARQ - "AUTOMATIC REPEAT REQUEST")
- detecção e correção de erro
(FEC - "FORWARD ERROR CORRECTION")

Na primeira técnica, utiliza-se um código de detecção de erro incorporado a um certo protocolo de retransmissão. Quando um bloco de mensagem está pronto para ser transmitido, acrescentam-se os bits de paridade de acordo com o tipo de código. Se o transmissor não receber uma confirmação positiva dentro de um certo intervalo de tempo ("timeout"), considera-se que a mensagem foi recebida com erro e inicia-se uma nova transmissão. Caso contrário, a mensagem recebida é aceita pelo protocolo e uma nova transmissão será iniciada.

O protocolo de retransmissão utilizado pelo esquema ARQ consiste de três categorias básicas:

- Stop-and-Wait SW
- Go-back-N GBN
- Selective-Repeat SR

Alguns desses tipos básicos são aglutinados para formar esquemas mistos, aproveitando as potencialidades individuais. Propostas nesse sentido têm sido estudadas por Miller e Lin [MILL81] e Weldon [WELD82].

O esquema ARQ é largamente utilizado nos sistemas de comunicação de dados devido à alta confiabilidade e baixo custo. Porém, a eficiência do sistema é severamente comprometida quando a taxa de erro do canal é alta (alta probabilidade de retransmissão).

Na técnica FEC, bits de paridade para detecção e correção de erro são adicionados ao bloco de informação transmitido. Quando um erro é detectado na recepção, o receptor tenta localizá-lo para efetuar a correção. Um erro na decodificação será cometido se o receptor falhar na detecção da presença de erros ou na sua localização exata. Em qualquer desses casos, um bloco de mensagem incorreta será entregue aos níveis superiores do protocolo de comunicação. Para se obter alta confiabilidade com esta técnica, um código poderoso deve ser utilizado, aumentando consideravelmente o custo e a complexidade de implementação.

As desvantagens apresentadas pelos esquemas ARQ e FEC podem ser amenizadas se ambos são combinados adequadamente, gerando o esquema de controle de erro híbrido. Nesse tipo de estratégia, um subsistema FEC é incorporado a qualquer sistema ARQ. A função do FEC é reduzir a frequência de retransmissões através da correção dos erros presentes.

Esquemas híbridos podem ser classificados em duas categorias: tipo I e tipo II. O esquema tipo I utiliza um código para detecção e correção de erro. Neste caso, quando um bloco de informação é detectado com erro, o receptor inicialmente tenta localizar e corrigir os erros. Se a quantidade de erros exceder a capacidade de correção do código, o receptor descarta o bloco recebido e pede retransmissão, caso contrário os erros serão corrigidos. Este processo continua até que o bloco seja recebido corretamente (nenhum erro detectado) ou o código tenha condições de corrigir os erros.

Em termos de "overhead" de bits de paridade, o esquema tipo I apresenta desvantagens com relação ao esquema ARQ "puro", visto que utiliza um código para detecção e correção. O esquema tipo I também apresenta desvantagens quando a taxa de erro do canal é muito oscilante. Quando a taxa de erro é baixa, correção de erro é dispensável e o "overhead" dos bits de paridade

representa desperdício. No caso de uma alta taxa de erro, a capacidade de correção do código pode ser inadequada, gerando um aumento na frequência de retransmissões. Portanto, esse tipo de esquema é mais eficientemente utilizado nos casos onde o canal de comunicação apresenta estatísticas e comportamento de erros conhecidos e pouco variantes.

Para canais onde a taxa de erro apresenta variações consideráveis, pode-se pensar num esquema ARQ híbrido adaptativo, que possui a seguinte filosofia de operação: quando o canal se encontra no estado "bom" (pequena probabilidade de ocorrência de erro), o sistema se comporta como um ARQ "puro", onde os bits de paridade são utilizados apenas para detecção de erro. No caso de aumento da incidência de ruído, acrescentam-se bits de paridade ao bloco de informação também para correção de erro. Esse princípio forma a base do esquema ARQ híbrido tipo II. Na primeira transmissão do bloco de informação, os bits de paridade são utilizados apenas para detecção de erro. Caso o receptor detecte a presença de erro no bloco transmitido, um pedido de retransmissão é sinalizado e o bloco é armazenado em um "buffer". Essa retransmissão não se refere ao bloco original, mas aos bits de paridade calculados anteriormente pelo transmissor. Ao receber os bits de paridade para correção de erro, o receptor tenta localizar e corrigir os erros. Em caso de impossibilidade, uma nova retransmissão é solicitada, desta vez do bloco de informação original ou dos bits de paridade [LIN84]. Em suma, uma combinação apropriada de FEC e ARQ fornece maior confiabilidade que um FEC puro e maior "throughput" (vazão) que um esquema ARQ puro.

4. ESTRATEGIA DE CONTROLE DE ERRO DA PRNET EXPERIMENTAL

A estratégia de controle de erro híbrida da PRNET utiliza um código BCH corretor de erro incorporado ao protocolo de retransmissão "Stop-and-Wait" (SW). A escolha do protocolo de retransmissão SW se deve ao fato de que o "link" de comunicação é "half-duplex" e não há um canal de realimentação separado para os sinais de reconhecimento. Com relação ao tipo de código, optou-se pelo BCH após um levantamento do perfil de incidência dos erros no pacote. Observou-se nesses testes que a maioria dos erros ocorriam de forma aleatória [TOLE88].

Neste tipo de estratégia, o transmissor envia um pacote de informação e espera pelo reconhecimento durante um certo intervalo de tempo ("timeout"). Se o receptor detectar a presença de erros, tenta corrigi-los até um certo limite (capacidade de

correção do código). Se isto for possível, o código corrige os erros e o receptor transmite o pacote de reconhecimento. Caso a capacidade de correção do código seja excedida, um pedido de retransmissão do pacote é sinalizado através do término do "timeout".

Pode-se observar que, no mecanismo acima, o tempo de espera pelo reconhecimento do pacote representa um tempo bastante ocioso. Uma das alternativas para amenizar a influência dessa ociosidade no desempenho do sistema seria a utilização de um pacote de dados grande. No entanto, um pacote grande apresenta maior probabilidade de retransmissão, principalmente no caso desta PRNET onde a taxa de erro é bastante desfavorável (a taxa de erro medida foi de 10^{-2} para uma taxa de transmissão de 300 bps). Portanto, deve existir um tamanho de pacote ótimo no qual a mensagem será particionada, que minimiza o tempo médio ocioso (TMO) gasto em reconhecimento, retransmissões e "overhead" do pacote. Nesta seção, utiliza-se um modelo [LEUN81] para a determinação do tamanho deste pacote no caso de uma estratégia ARQ pura. Posteriormente, verifica-se a influência de um código corretor de erro incorporado a essa estratégia (esquema híbrido).

O modelo utilizado considera conhecidos os seguintes parâmetros:

Atraso de Reconhecimento $A = 0,2 \text{ seg.}$

* neste parâmetro está incluído, também, o tempo de "turn-around" (100 ms) do modem (fornecido pela IMBEL).

"Overhead" do Pacote $b = 64 \text{ bits}$

* corresponde aos seguintes campos do pacote: destino - 8, tamanho - 8, CRC (paridade) do cabeçalho - 16, controle - 8, fonte - 8, CRC do pacote para detecção de erro - 16.

Tamanho Médio da Mensagem $l = 10.000 \text{ bits}$

* como ainda não se tem uma estimativa do tamanho esperado das mensagens e arquivos transmitidos pela rede, optou-se por este valor pelo fato dele corresponder à média aproximada do tamanho de mensagens curtas (1 - 2 kbytes) e tamanho de arquivos (20-30 kbytes) normalmente transferidos em uma rede de comunicação.

Taxa de Transmissão $R = 300 \text{ bps}$

Taxa de Erro do Canal BER = 10^{-2} (valor medido)

A equação (1) representa o tempo médio ocioso (TMO) (sem correção de erro) para se transmitir uma mensagem corretamente até o seu destino [LEUN81].

$$\text{TMO}(B) : \frac{A + T}{(1 - q^a) [1 - \text{Pr}(B + b)]} - \frac{l + b}{R} \quad (1)$$

onde:

- T - tempo de transmissão do pacote = $(B + b)/R$
- B - quantidade de bits de informação no pacote
- q = $1 - 1/l$ (resultados práticos têm mostrado que o tamanho da mensagem em redes de dados por computador é uma variável aleatória que pode ser aproximada pela distribuição geométrica)
- Pr(B + b) - probabilidade de que o pacote de tamanho (B + b) bits seja recebido incorretamente (pelo menos um bit errado)
- b - "overhead" do pacote

A equação acima pode ser interpretada da seguinte forma: suponha que os parâmetros da rede estejam determinados. Existe uma quantidade ótima de bits de informação (B) no pacote que minimiza o TMO para se transmitir uma mensagem corretamente de uma estação para outra.

Para o desenvolvimento dessa equação, supõem-se conhecidos os parâmetros do canal, de acordo com o discutido anteriormente, e a distribuição do número de erros no pacote. Essa distribuição foi obtida através de medições realizadas para pacotes de tamanho 63, 127, 255, 511, 1023 e 2047 bits (correspondendo ao tamanho dos pacotes para o código BCH). Essas medições foram realizadas porque, embora tenha-se observado um comportamento aleatório dos erros, o canal de rádio é considerado do tipo "bursty". Para canais tipicamente aleatórios, essa distribuição pode ser obtida analiticamente. A figura 2 ilustra a função distribuição cumulativa (FDC) do número de erros no pacote para: pacotes de tamanhos 63, 127, 255, 511, 1023 e 2047 bits, taxa de transmissão $R = 300$ bps, modulação FSK (realizada pelo modem) e frequência da portadora (f_c) de 70,5 MHz.

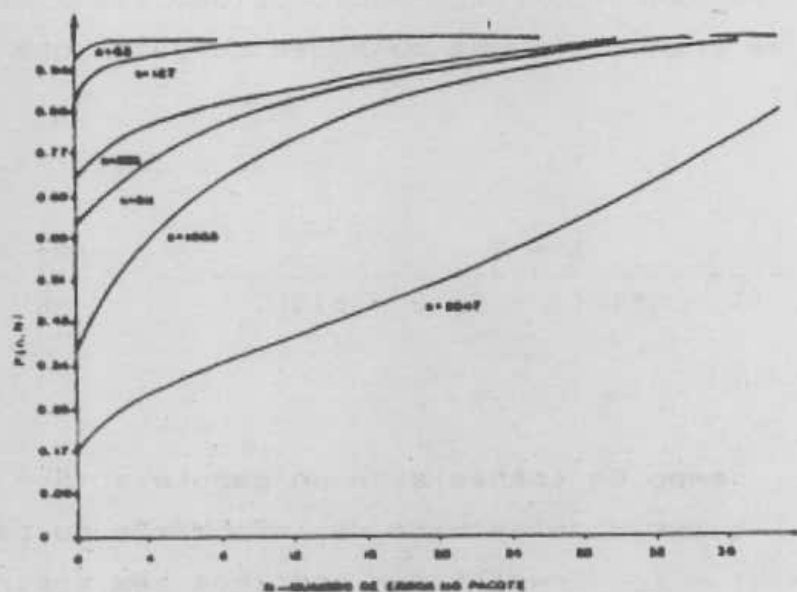


Figura 2. FDC do número de erros no pacote de tamanho n para o canal da PRNET com $R = 300$ bps, $f_c = 70,5$ MHz e modulação FSK.

Onde: $P(n, N)$ é a probabilidade de que um pacote de tamanho n contenha um número de erros $\leq N$.

A probabilidade $Pr(B + b)$, onde $n = B + b$, do pacote ser recebido incorretamente (pelo menos um bit errado) é obtida a partir da figura 2. A figura 3 ilustra a relação probabilidade de erro no pacote $Pr(B + b)$ X tamanho do pacote $(B + b)$. A figura 4 apresenta a relação tempo médio ocioso por mensagem TMO X quantidade de bits de informação no pacote (B) sem correção de erro (equação (1)).

Pode-se observar que $B = 288$ bits fornece o menor TMO por mensagem (36 seg.). Como será visto posteriormente, a utilização de um código corretor de erro reduz consideravelmente esse tempo ocioso.

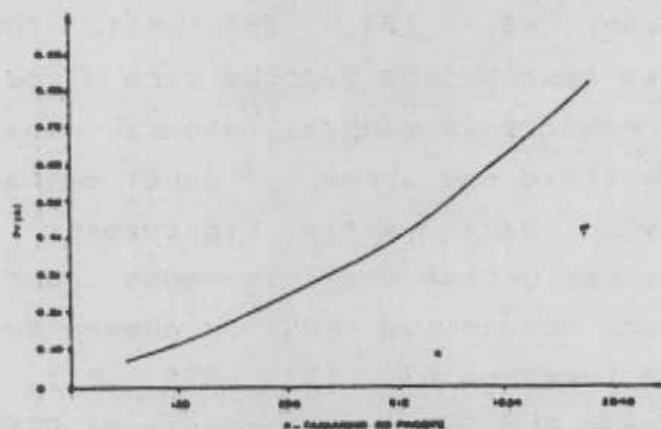


Figura 3. Probabilidade de erro no pacote $Pr(B + b)$ X tamanho do pacote $(B + b)$

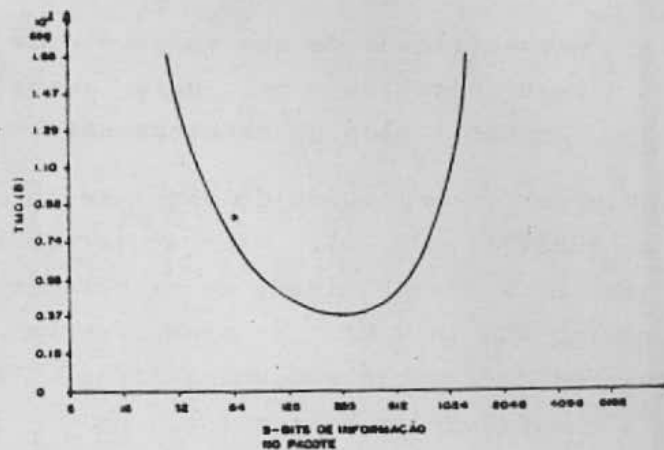


Figura 4. TMO X bits de informação no pacote (B) com BER=10⁻², R=300 bps, l=10.000 bits, A=0,2 s e b=64 bits (sem correção de erro).

O passo seguinte consiste em verificar a influência de um código corretor de erro no TMO. O código utilizado é do tipo BCH (n,k), onde o tamanho do pacote (n) é da forma:

$$n = 2^m - 1 \quad \text{com } m = 2, 3, 4, \dots$$

k - quantidade de bits de informação

A utilização deste código implica no acréscimo de bits de paridade (aumentando o "overhead" do pacote), o que, a princípio, pode representar mais um fator de degradação do desempenho do sistema. No entanto, a capacidade de correção do código reduz a probabilidade de retransmissão do pacote, melhorando o resultado final em termos de desempenho. Portanto, conhecida a distribuição do número de erros no pacote e dada uma probabilidade de retransmissão Pr, pode-se determinar a quantidade de bits t que deve ser corrigida e a quantidade de bits de paridade p necessária para a correção.

A expressão resultante para o TMO, considerando a utilização do código corretor de erro BCH (n,k), pode ser imediatamente obtida da equação (1):

$$TMO(n,p) : \frac{A + T}{(1 - q^{n-b-p}) [1 - Pr(n)]} - \frac{l + b}{R} \quad (2)$$

onde:

n - tamanho do pacote

p - quantidade de bits de paridade para corrigir até t erros no pacote

$Pr(n)$ - probabilidade de que um pacote de tamanho n seja recebido com, pelo menos, um erro (probabilidade de retransmissão)

A equação (2) pode ser interpretada da seguinte forma: conhecidos os parâmetros da PRNET (R, A, l, b), a distribuição de erro no canal e dada uma certa probabilidade de retransmissão, deseja-se dimensionar o código BCH (n, k, t). Pode-se observar, também, que existe uma relação de compromisso entre $Pr(n)$, $TMO(n, p)$ e p . Quanto maior a quantidade de bits que o código pode corrigir, menor a probabilidade de retransmissão $Pr(n)$ e maior o número de bits de paridade p . Reduzindo-se $Pr(n)$, resulta em um TMO menor, enquanto um aumento em p resulta em um TMO maior. Portanto, para cada tamanho de pacote n deve existir um código BCH ótimo que minimiza TMO.

A escolha dos parâmetros do código é feita baseada na quantidade de bits que devem ser corrigidos (t) para assegurar uma certa probabilidade de retransmissão Pr e no tamanho do pacote n . A figura 5 mostra a relação TMO X probabilidade de retransmissão Pr (função da capacidade de correção do código), tomando-se como parâmetro o tamanho do pacote n (equação (2)).

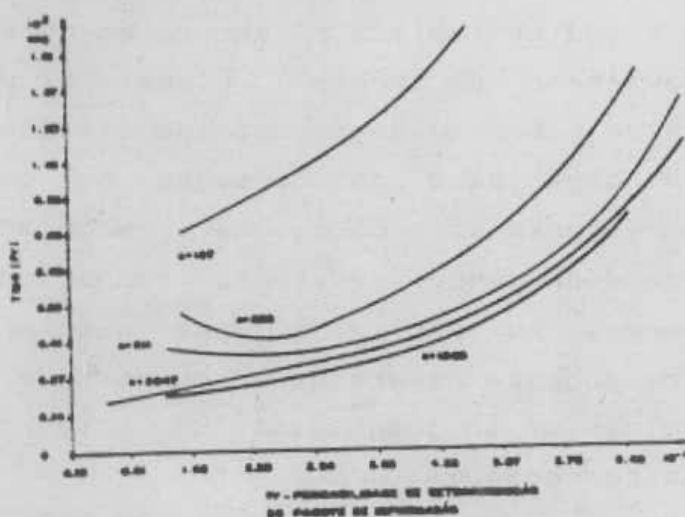


Figura 5. TMO X probabilidade de retransmissão do pacote Pr para $n = 255, 511, 1023$ e 2047 (n como parâmetro).

De acordo com o apresentado por este gráfico pode-se observar que, para uma mesma probabilidade de retransmissão Pr , o pacote de tamanho $n : 1023$ fornece o menor tempo médio ocioso por mensagem. Resta, agora, determinar a quantidade de bits que devem ser corrigidos. Isto é feito baseado na probabilidade de retransmissão desejada, cuja relação com o gráfico da figura 2 é a seguinte:

$$Pr(n) = 1 - P_{n..e}$$

onde:
 $Pr(n)$ - probabilidade de retransmissão do pacote de tamanho n
 $P_{n,0}$ - probabilidade do pacote ser recebido corretamente

Uma vez escolhida a probabilidade de retransmissão $Pr(n)$, determina-se $P_{n,0}$ através da relação acima. O valor de $P_{n,0}$ (nova probabilidade do pacote ser recebido corretamente) é, então, utilizado para determinar t (quantidade de bits a serem corrigidos) através do gráfico da figura 2.

A escolha da probabilidade de retransmissão e, por conseguinte, do código BCH, está condicionada à otimização da utilização do canal. O modelo simples apresentado em [TANES1] para o protocolo de retransmissão "Stop-and-Wait" com pacotes de comprimento fixo fornece:

$$U = \frac{D}{Nr(n + RT) + (n + K + 2RI)}$$

onde:

- U - utilização do canal (eficiência).
- D - quantidade de bits de informação no pacote.
- Nr - número médio de tentativas para se transmitir um pacote corretamente ao seu destino.
- n - tamanho do pacote (bits de informação + bits de "overhead").
- R - taxa de transmissão.
- T - tempo de "timeout" a espera do pacote de reconhecimento.
- K - quantidade de bits do pacote de reconhecimento.
- I - tempo de serviço do pacote de informação na estação + atraso de propagação + tempo de "turn-around" do modem.

Os parâmetros da rede são os seguintes: $D=800$ bits, $n=1023$ bits (calculado a partir do gráfico da figura 4.6), $R=300$ bps, $K=48$ bits.

- Cálculo de T :

$$T = 2 \times \text{tempo de propagação} + \text{tempo de serviço na estação} + \text{tempo de transmissão do pacote de reconhecimento} + \text{"turn-around" do modem.}$$

$$T = 2 \times 0,0034 + 3850 + 160 + 100 \quad (\text{unidades em } \mu\text{seg.})$$

$$T = 4,11 \text{ seg.}$$

O valor do tempo de serviço na estação foi medido para o

caso mais crítico, considerando a ocorrência de 18 ou mais erros no pacote.

- Cálculo de I:

I = tempo de serviço do pacote na estação + atraso de propagação + "turn-around" do modem.

I = 3850 + 0,0034 + 100 (unidades em mseg.)

I = 3,95 seg.

- Cálculo de Nr:

$$Nr = \frac{1}{(1 - Pa)(1 - Pr)} - 1 \quad [TANES1]$$

onde:

Pa = 0,04 - probabilidade de que o pacote de reconhecimento seja recebido com erro (valor obtido a partir do gráfico da figura 4.3).

Pr - probabilidade de que o pacote de dados seja recebido com erro.

O valor de Pr deve ser escolhido de forma a maximizar a utilização do canal (U). A figura 6 mostra a relação U X Pr para alguns valores de probabilidade de retransmissão. Pode-se observar que a utilização do canal é máxima para valores de Pr próximos a 10%. Portanto, o código BCH corretor de erro aleatório é o seguinte:

$$\left(\begin{matrix} 1023 & 848 & 18 \\ n & k & t \end{matrix} \right)$$

A figura 7 mostra a relação TMO X B para os casos "sem correção de erro" e "com correção de erro" (probabilidade de retransmissão < 0,10). Observa-se que o TMO é reduzido de aproximadamente 36 s para 7 s (redução de 80 %) com a utilização do código corretor de erro.

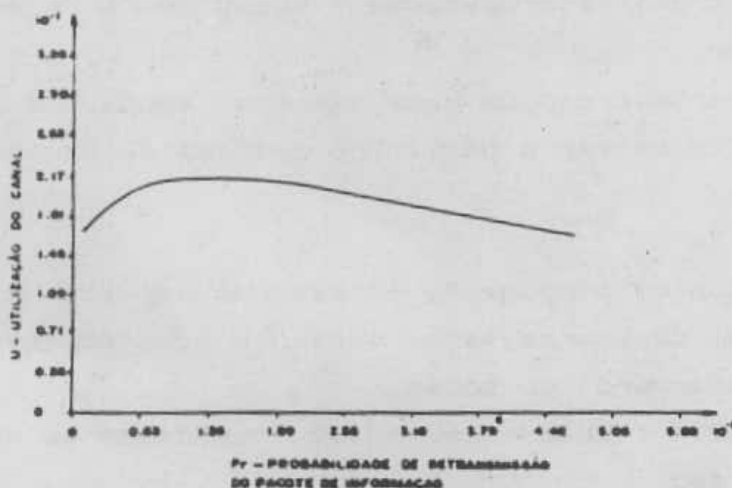


Figura 6. Utilização do canal X probabilidade de retransmissão do pacote.

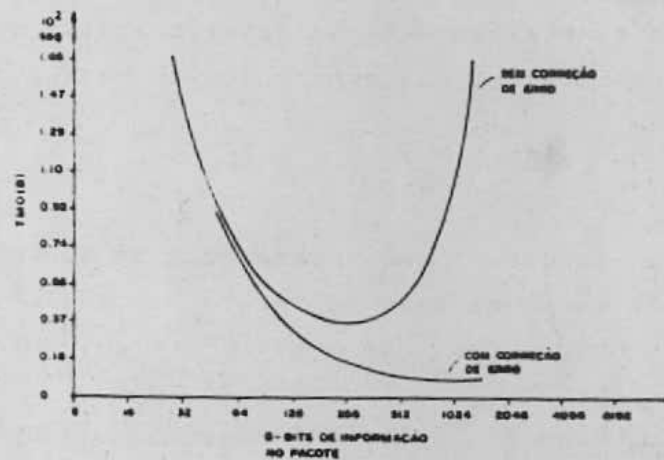


Figura 7. TMO X B "sem correção de erro" e "com correção de erro" ($Pr \ll 0,10$).

Em suma, a estratégia de controle de erro da PRNET utiliza um código BCH com capacidade de correção de até 18 bits. Caso o código não tenha condições de corrigir a estrutura de erro, o pacote é retransmitido ao final do "timeout". Este processo continua até que o pacote seja recebido corretamente ou um certo número de tentativas seja atingido. Na versão atual esse número de tentativas é igual a 30. Se até esse ponto, o pacote transmitido não for positivamente reconhecido, a estação aborta a transmissão.

O algoritmo de decodificação utilizado foi o de Berlekamp-Massey [BLAH84]. Todo o sistema foi desenvolvido em C (MSC 4.0) e assembly 8088.

5. CONCLUSÕES

Uma Rede de Computadores que utiliza a tecnologia de comutação de pacote em canais de rádio (PRNET - "Packet Radio Network") possui características que permitem sua utilização em diversas áreas de aplicação. Sua maior potencialidade diz respeito ao suporte de usuários móveis em aplicações tanto na área militar como na área civil e em casos onde um meio de transmissão por cabo se torna inviável.

Um dos problemas mais críticos em sistemas de comunicação de dados via rádio é a inerente não confiabilidade do canal de transmissão. No caso da PRNET experimental, utilizou-se uma estratégia de controle de erro híbrida. Os resultados apresentados mostram considerável aumento no desempenho do sistema em comparação àquele que seria fornecido pelo esquema ARQ

('Automatic Repeat Request') puro. Conseguiu-se, por exemplo, reduzir a probabilidade de retransmissão do pacote de 50 para 10%.

Uma das diretrizes futuras deste trabalho é implementar em hardware alguns serviços dos protocolos de rede e do mecanismo de decodificação.

6. BIBLIOGRAFIA

- [TOLE88] F. B. Toledo, 'Uma Estratégia de Controle de Erro Híbrida para uma Rede de Pacote via Rádio', Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng. Elétrica, PUC/RJ, setembro 1988.
- [KAHN78] R. E. Kahn, S. A. Gronemeyer, J. Burchfiel e R. Kunzelman, 'Advances in Packet Radio Technology', Proc. of the IEEE, Vol.66, No.11, novembro de 1978.
- [JUBI87] J. Jubin e J. D. Tornow, 'The DARPA Packet Radio Network Protocols', Proc. of the IEEE, Vol.75, No.1, janeiro de 1987.
- [TANE81] A. S. Tanenbaum, 'Computer Network', Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1981.
- [TOBA84] F. A. Tobagi, R. Binder e B. Leiner, 'Packet Radio and Satellite Networks', IEEE Commun. Magazine, Vol.22, No. 11, novembro 1984.
- [DAVI87] B. H. Davies e T. R. Davies, 'The Application of Packet Switching Techniques to Combat Net Radio', Proc. of the IEEE, Vol.75, No.1, janeiro de 1987.
- [NIEL87] D. L. Nielson, B. M. Leiner e F. A. Tobagi, 'Scanning the Issue - Packet Radio Network', Proc. of the IEEE, Vol.75, No.1, janeiro de 1987.
- [ZIMM80] H. Zimmermann, 'OSI Reference Model - The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection', IEEE Trans. on Commun., Vol.COM-28, No.4, abril de 1980.
- [MILL81] M. J. Miller e S. Lin, 'The Analysis of some Selective Repeat ARQ Schemes with Finite Receiver Buffer', IEEE Trans. on Commun., Vol.COM-29, setembro de 1981.
- [WELD82] E. J. Weldon Jr., 'An Improved Selective Repeat ARQ Strategy', IEEE Trans. on Commun., Vol.COM-30, No.3, março de 1982.
- [LIN83] S. Lin e D. J. Costello Jr., 'Error Control Coding', Prentice-Hall, Inc., 1983.

- [LIN84] S. Lin, D. J. Costello Jr. e M. J. Miller, "Automatic Repeat Request Error Control Schemes", IEEE Commun. Magazine, Vol-22, No.12, dezembro de 1984.
- [LEUN81] C. S. K. Leung e A. Lam, "Forward Error Correction for an ARQ Scheme", IEEE Trans. on Commun., Vol.COM-29, No.10, outubro de 1981.
- [BLAH84] R. E. Blahut, "Theory and Practice of Error Control Codes", Addison-Wesley Publishing Comp., In.C, maio 1984.