

PROPOSTA DE SIMULADOR / EMULADOR PARA AVALIAÇÃO E TESTES DO PROCESSADOR DO SISTEMA BRASILEIRO DE COLETA DE DADOS

Marcus Vinicius Cisotto¹ e Maurício Gonçalves Vieira Ferreira²

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais,
Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial,
Curso de Sistemas Espaciais (CSE), São José dos Campos, SP 12227-010
marcus.cisotto@dss.inpe.br e mauricio@ccs.inpe.br

Resumo: O crescimento do Sistema Brasileiro de Coleta de Dados, SBCD, exigiu o desenvolvimento de uma nova versão de seu processador de dados, um equipamento que busca transmissões, aleatórias no tempo e em frequência, de PCDs em uma faixa de frequências reservada para a operação do SBCD. O desenvolvimento deste processador demandou um equipamento de testes que substituísse com vantagens os equipamentos e ferramentas comerciais tradicionais gerando sinais que representem com precisão o tráfego de sinais do SBCD. Este equipamento tem capacidade par ser utilizado tanto na fase de desenvolvimento, quanto na fase operacional do processador, garantindo seu ponto ótimo da operação. A solução para o desenvolvimento deste equipamento de testes foi um simulador e emulador de sinais que trabalha conectado diretamente a uma entrada do processador podendo ser utilizado facilmente durante as fases de desenvolvimento operacional. A utilização deste simulador / emulador representou um ganho de tempo e de qualidade no desenvolvimento do processador.

Palavras chave: simulador, emulador, representação de sinais aleatórios, processador de dados, plataformas de coleta; hardware in the loop.

1.Introdução

O Sistema Brasileiro de Coleta de Dados, SBCD, implantado em 1993, tem crescido continuamente em seu número de plataformas de coleta de dados instaladas. Com o crescimento, as características de desempenho do equipamento Processador de Coleta de Dados, PROCOD, desenvolvido no INPE para a recuperação das mensagens das plataformas de coleta, tornaram-se mais críticas exigindo um contínuo aprimoramento de seu desempenho. A terceira versão do PROCOD, o PROCOD III, em desenvolvimento, pretende atingir o limite de operação do sistema, que é dado pelo número simultâneo de transmissões de plataformas de coleta de dados e pela banda do espectro destinada às transmissões. Para o auxílio ao desenvolvimento do PROCOD III tornou-se necessário uma ferramenta de apoio que explore os limites dos requisitos de desempenho do equipamento. Esta ferramenta deve criar condições de testes que se aproximem o mais possível das condições de operação reais às quais o PROCOD III será submetido. A ferramenta, além do auxílio ao desenvolvimento, deverá suprir também as necessidades de avaliação periódica do desempenho do PROCOD III em operação normal. Deve ter capacidade também de avaliar o desempenho de toda a cadeia de recepção de dados localizada na estação terrena que recebe os dados provenientes dos satélites pertencentes ao SBCD. Finalmente a ferramenta deverá ter potencial para auxiliar em uma necessidade do gerenciamento operacional do SBCD, que é de avaliar continuamente suas condições operacionais, de acordo com a sua expansão.

2.Sistema Brasileiro de Coleta de Dados

O SBCD tem como propósito principal a obtenção de dados ambientais ao longo de todo o território nacional. Basicamente o SBCD é composto por:

Uma rede de plataformas de coleta de dados, PCDs, espalhadas por todo o território nacional, que coletam dados tais como temperatura do ambiente, nível de precipitação pluviométrica, velocidade do vento, níveis de rios, concentração de CO₂ na atmosfera, etc;

Duas estações terrenas de recepção de dados, localizadas em Cuiabá e em Alcântara;

Um Centro de Missão, localizado em Natal;

Um conjunto de satélites (SCD1, SCD2 e toda a série CBERS) que retransmitem os dados recebidos das PCDs ao solo.

As plataformas efetuam periodicamente a coleta dos dados e, a intervalos que variam de 40 a 200 segundos, programados segundo a posição geográfica onde se encontra a plataforma (Costa, 1984) e formatam os dados de acordo com o padrão apresentado na Fig. 1. Em seguida modulam estes dados no padrão PSK e os irradiam por meio de sinais de rádio em uma frequência padrão na banda de VHF, de acordo com a faixa escolhida para a operação.

| Portadora Pura | Mensagem | | | | | |
|-----------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| | Portadora Modulada | | | | | |
| | a | b | c | d | e | f |
| Portadora Pura : | duração de 160ms. | | | | | |
| Tipo de Modulação: | PSK. | | | | | |
| Índice de Modulação: | $60^\circ \pm 6^\circ$. | | | | | |
| Taxa de Dados: | 400 ± 5 bits/s. | | | | | |
| Codificação: | Bifase-L. | | | | | |
| Campos da Mensagem: | | | | | | |
| a: sincronização de bits | 15 bits "1". | | | | | |
| b: sincronismo de palavra | 8 bits – "00010111". | | | | | |
| c: inicialização | 1 bit "1". | | | | | |
| d: identificação da PCD | 20 bits. | | | | | |
| e: número n de blocos da mensagem | 4 bits ($1 \leq n \leq 8$). | | | | | |
| f: campo de dados | 32n bits. | | | | | |
| Duração total da mensagem: | 360 ± 5 ms (n = 1). | | | | | |
| | 920 ± 5 ms (n = 8). | | | | | |
| Frequência da portadora:..... | 401,620 MHz \pm 1,2kHz (Faixa INPE 1) | | | | | |
| | 401,650 MHz \pm 1,2kHz (Faixa INPE 2) | | | | | |

Figura 1 – Características de uma mensagem de PCD

Um satélite pertencente ao SBCD, que porventura estiver na visada tanto das PCDs que emitiram os sinais quanto de uma estação terrena, recebe soma destes sinais, normaliza a soma dos sinais mais o ruído branco do ambiente e modula o resultado em PM em uma frequência na banda S, e o retransmite a estação terrena.

Na estação terrena, o sinal enviado pelo satélite passa por um *down-converter* que o translada para uma frequência intermediária, envia o sinal a um receptor que retira a modulação PM e disponibiliza o sinal, em uma frequência de vídeo, entre 65 e 125 kHz, ao Processador de Coleta de Dados, PROCOD.

No PROCOD o sinal proveniente da PCD é detectado e os dados são então recuperados.

3.Processador de Coleta de Dados

Como não existe sincronização entre as transmissões de PCDs, os sinais chegam aos satélites e, por conseguinte, à estação terrena, de maneira aleatória no tempo. E como as PCDs estão em posições geograficamente diferentes, o efeito Doppler, proveniente das velocidades relativas entre elas e o satélite, torna as transmissões que chegam às estações terrenas também aleatórias em frequência

Os processos de detecção e processamento dos sinais de PCDs são realizados pelo PROCOD (Pacola Sobrinho, 1988), um equipamento especializado desenvolvido no INPE, que realiza a busca de sinais de PCDs em uma faixa do espectro, identifica estes sinais e aloca canais de processamento para recuperação dos dados das mensagens.

O equipamento PROCOD foi inicialmente desenvolvido para atuar no SBCD quando este era composto por um número bastante limitado de PCDs, aproximadamente 60 até o ano de 1995. Depois, quando o número de PCDs atingiu aproximadamente 300 unidades, foi desenvolvida uma segunda versão, mais potente. Hoje, quando o número de PCDs já atingiu 830 unidades (Yamaguti, et al., 2009), e continua crescendo, tornou-se necessário uma terceira versão do PROCOD, com a capacidade de receber tantas PCDs quanto o SBCD possa suportar. A limitação do SBCD é dada pela banda reservada a ele e pelas interferências, ou intermodulação, entre os sinais transmitidos por PCDs simultaneamente que, porventura, tenham a mesma frequência ao atingir o satélite, destruindo as informações umas das outras.

O desenvolvimento da nova versão do PROCOD exigiu que os procedimentos de avaliação e testes pudessem explorar todos os limites do equipamento e do SBCD, garantindo desta maneira que toda transmissão viável de PCD, as que não forem destruídas por intermodulação ou ruído, seja efetivamente recebida e sua mensagem recuperada sem erros.

4. Indicadores de Performance do PROCOD

Para garantir o bom funcionamento do SBCD, é importante que os procedimentos de testes e avaliação do PROCOD sejam aplicados não só durante a fase de desenvolvimento do equipamento, mas periodicamente, garantindo a melhor performance possível da operação. É também importante que a avaliação periódica ocorra com o equipamento instalado na estação terrena, permitindo que toda a cadeia de recepção da estação seja testada e aferida.

Dadas as suas características, o desenvolvimento, os testes e a avaliação periódica deste equipamento são classicamente baseados em indicadores de desempenho, alguns provenientes de técnicas de radar, que são associados a alguns processos efetuados pelo equipamento processador.

Os principais indicadores são os seguintes:

4.1. Probabilidade de Detecção

A probabilidade de detecção, P_d , é obtida pela razão entre os sinais de PCDs transmitidos que chegam ao PROCOD e os sinais positivamente detectados.

A detecção positiva de um sinal ocorre quando um sinal verdadeiro for detectado em um tempo menor que 90ms.

Na análise do processo de detecção deve-se levar em conta a taxa de falso alarme, que ocorre quando um ruído é identificado como sinal levando à alocação de um canal indevidamente. Um dos requisitos do processador é possuir uma taxa de falso alarme menor que uma por segundo. Levando todos os fatores em conta, o equipamento deve apresentar, como requisito, uma probabilidade de detecção maior que 95%.

A análise do processo de detecção clássica, (Pacola Sobrinho, 1990) é baseada em um sinal, $x(t)$, composto do sinal da PCD, $s(t)$, adicionado a ruído branco gaussiano de densidade bilateral apresentado na equação:

$$n(t): x(t) = s(t) + n(t). \quad (1)$$

4.2. Aquisição de Portadora

A qualidade deste processo é medida em termos de Probabilidade de Aquisição de Portadora, P_a , que é dada pela porcentagem de portadoras adquiridas em menos de 60ms sobre o total de sinais transmitidos. Por requisito, esta porcentagem deve ser maior que 98% para um sinal com relação sinal / densidade de ruído, S/N_0 , maior que 40dB/Hz.

4.3. Recuperação de Bits

Neste processo, a qualidade é determinada pelo número de bits errados sobre o total de bits transmitidos, o "Bit Error Rate", BER.

Quando se transmite um sinal digital modulado, existe uma probabilidade que, ao recuperar o bit transmitido, este bit esteja errado. Esta probabilidade é a P_e .

A fórmula, apresentada a seguir, marca o limite teórico de desempenho de um sistema de transmissão baseado na modulação PSK bifase coerente (Haykin, 1988), a empregada no SBCD.

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{E_b/N_0}) \quad (2)$$

Onde erfc é a função de erro complementar;

E_b é a energia do bit transmitido.

N_0 é a densidade de ruído branco gaussiano.

Por sua vez $E_b/N_0 = S/N_0 \cdot T_b \cdot \sin^2\theta$ onde:

T_b é a taxa de bits transmitidos, no caso do SBCD 400 b/s;

θ é o ângulo da modulação PSK empregada, no caso do SBCD $\pm 60^\circ$;

S/N_0 é a relação sinal / densidade de ruído onde ocorre a transmissão.

Temos S/N_0 de 40dB/Hz como requisito do PROCOD III.

Como requisito de projeto, já levando em contas as perdas de implementação do circuito, BER deve ser menor ou igual a 1×10^{-4} .

4.4.Sincronismo de Palavra

Este processo compara os bits recuperados pelo PROCOD à palavra de sincronismo do cabeçalho da PCD. Quando ocorre a coincidência o circuito sinaliza a identificação. É a partir da identificação da palavra de sincronismo que os dados da mensagem em recuperação são armazenados.

Para que seja possível encontrar a palavra de sincronismo corretamente, é preciso que os processos que atuaram previamente disponibilizem os bits em um tempo inferior a 197,5 ms, a partir do início da transmissão da PCD.

O índice que mede a qualidade do processo de sincronismo de palavra é a Probabilidade de Sincronismo, Psp, que pode ser determinada analiticamente pela seguinte equação (Coats, 1974):

$$P_{sp} \approx (1 - \alpha)^{n-1} (1 - \beta) \quad (3)$$

Onde n = número de bits entre o instante de aquisição de portadora e o início da palavra de sincronismo;

α = probabilidade de se achar o padrão da palavra de sincronismo em uma sequência aleatória de bits. $\alpha = (1/2)^k$, onde k é o comprimento da palavra de sincronismo;

β = é a probabilidade de ocorrência de um erro na palavra de sincronismo.

Como requisito a Psp deve ser maior que 0,912.

4.5.Probabilidade de Sucesso

A probabilidade de sucesso, Ps, é o índice global de avaliação do PROCOD, incorporando em série, todos os processos de recuperação das mensagens de PCDs. É calculada pela seguinte equação:

$$P_s = P_d \times P_a \times P_{sp} \times P_{sc} \quad (\text{Pacola Sobrinho, 1990}) \quad (4)$$

Onde Ppc é a probabilidade de todos os bits da mensagem da PCD estejam corretos.

Como a probabilidade de um bit ser errado é de 10^{-4} , e um comprimento médio de mensagem é de 168 bits, temos:

$$P_{sc} = (1 - 10^{-4})^{168} = 0,983.$$

Como medida prática, Ps é dada pela razão entre as mensagens de PCDs recebidas sem nenhum erro sobre o total de mensagens de PCDs transmitidas. Como requisito, a Ps do PROCOD III deve ser maior que 0,835.

5.Procedimentos de Testes e Avaliação do Processador de Coleta de Dados e do SBCD

Podem-se dividir os procedimentos de testes do PROCOD III em duas fases distintas:

- 1-Fase de desenvolvimento, quando os módulos que efetuam os processos estão desconectados e podem ser avaliados individualmente ou em conjunto;
- 2-Fase de operação, quando o equipamento já está integrado e conectado ao resto da cadeia de recepção de dados. Nesta fase a avaliação de processos individuais torna-se mais complicada, especialmente com o uso somente de ferramentas comerciais.

Em ambas as fases, os procedimentos se baseiam na geração de sinais que emulam transmissões de PCDs. Uma somatória de sinais de PCDs mais ruído branco gaussiano criam o ambiente de transmissões encontrado no SBCD. Uma transmissão de PCD, devido às peculiaridades do sistema, apresenta as seguintes características:

- 1-Aleatória no tempo;
- 2-Com duração variável;
- 3-Aleatória em frequência, dentro de uma faixa esperada;
- 4-Com variação Doppler constante,
- 5-Com variação dinâmica de potência;
- 6-Com relação sinal / ruído variável, dentro de uma faixa conforme requisito.

Com as ferramentas comerciais padrão é muito difícil se criar um ambiente de testes que se aproxime do ambiente real do SBCD, por isto as avaliações das versões anteriores do PROCOD foram realizadas utilizando-se aproximações, como, por exemplo, a adotada na Probabilidade de Detecção utilizando-se da equação (1). Estas aproximações, que na fase inicial do SBCD, devido à baixa densidade de transmissões de PCDs, eram razoáveis tornaram-se inapropriadas nas condições atuais.

A criação do ambiente de testes que se aproxima mais do real atual e as facilidades de obtenção de dados estatísticos pela facilidade emulação massiva de transmissões de PCDs são fatores que tornam o emulador / simulador desta proposta uma ferramenta mais apropriada para a avaliação do processador do SBCD.

5.1.Procedimento de avaliação da Probabilidade de Detecção

Esta avaliação se dá classicamente com envio de uma série de transmissões de portadoras puras, na faixa de recepção do PROCOD, com duração de 160ms cada, em um ambiente com ruído branco gaussiano. As S/N_0 são variáveis entre 40dB/Hz e 60db/Hz. Após o envio de um número conhecido de transmissões, computa-se o número de detecções realizadas pelo PROCOD. Como não se sabe se o PROCOD detectou somente sinais reais, ou também ruído como se fosse sinal, é necessário que se tenha uma idéia precisa do indicador de taxa de falso alarme. A medida de falso alarme é efetuada enviando-se apenas ruído branco ao PROCOD e computando-se as falsas detecções por intervalo de tempo. Sabendo-se quantos falsos alarmes ocorrem em um intervalo de tempo e tendo-se a duração do teste de probabilidade de detecção, pode-se então determinar a Probabilidade de Detecção. Esta técnica deriva da tecnologia de radar e de recepção de sinais digitais [Difranco, 1968, Whalen,1971)]. Acontece que o ambiente do SCDB, devido à grande densidade de transmissões de PCDs, não pode mais ser representado com precisão aceitável como sendo um ambiente apenas de ruído branco. Uma transmissão de PCD, durante sua fase modulante, gera inúmeras raias em torno de sua frequência central, de acordo com os dados que realizaram esta modulação. E o que é sinal para aquela PCD é ruído para o processo de detecção. Desta maneira procurou-se um procedimento para a avaliação que fosse mais fidedigno em relação ao SCDB real, sendo efetuada em um ambiente de transmissões de PCDs mais ruído e não apenas de ruído branco. Um fator de dificuldade é que este ambiente não pode ser emulado facilmente e de maneira econômica apenas com equipamentos de medidas comerciais.

5.2.Procedimento de avaliação da Taxa de Erro de Bits, BER

Este procedimento avalia o índice de qualidade do demodulador PSK do PROCOD III que deve ser de, no máximo, 10^{-4} para S/N_0 de 40db/Hz.

Durante a fase de desenvolvimento, com todo o acesso aos demoduladores PSK, a taxa de erro pode ser medida enviando-se uma sequência pseudo-aleatória de bits modulada em PSK, demodulando esta sequência, recuperando-se os bits e comparando com a sequência transmitida. A geração dos bits e a comparação desta sequência com a recuperada pelo demodulador podem ser efetuadas por um medidor comercial de BER. A modulação dos bits pode ser efetuada por um gerador de sinais comercial. Ao sinal modulado se acrescenta ruído branco, obtido de um gerador de ruído, para se obter as relações sinal / densidade de ruído de interesse.

Esta metodologia não é facilmente aplicável durante as fases de aceitação e operacional, com os demoduladores do PROCOD III já integrados aos restantes módulos do equipamento. E, novamente, o ambiente de ruído branco não representa o comportamento do SCDB de maneira realista. Inclusive, como observado empiricamente, a grande maioria dos erros de bits não ocorre devido ao ruído branco e sim devido à intermodulação resultante das transmissões simultâneas de PCDs.

Neste caso, uma maneira mais apropriada para se obter o BER, tanto na fase de desenvolvimento quando na operacional, seria o envio da sequência pseudo aleatória dividida em diversas mensagens de PCDs sequenciais, recuperar estas mensagens com o PROCOD III e aí então comparar os bits transmitidos com os recuperados. A implementação deste procedimento e do ambiente necessário já não pode ser efetuada facilmente e economicamente por equipamentos comerciais.

5.3. Procedimento de avaliação do Sincronismo de Palavra

Nas primeiras versões do PROCOD o sincronismo de palavra era determinado apenas analiticamente, segundo a Eq (3):

$$P_{sp} \approx (1 - \alpha)^{n-1}(1 - \beta)$$

o valor de n, nos casos das duas primeiras versões do PROCOD, foi estimado em 48 (Pacola Sobrinho, 1990);

$$\alpha = (1/2)^8.$$

$\beta = 8 \times 10^{-4}$, já que $P_e = 10^{-4}$ para S/N_0 de 43dBHz, requisito das duas primeiras versões do PROCOD.

Logo $P_{sp} = 0,832$.

Pode também ser efetuada uma medida prática do valor de P_{sp} , computando-se a razão do número de PCDs em que a palavra de sincronismo foi detectada pelo número de mensagens de PCDs detectadas pelo PROCOD III. Neste caso é necessária a emulação massiva de mensagens de PCDs, nas condições do SBDCD, para que a avaliação estatística seja apropriada. Este procedimento requer a utilização do simulador e emulador da proposta.

5.4. Procedimento de avaliação da Probabilidade de Sucesso

Esta avaliação pode ser obtida tanto analiticamente, com auxílio da Eq(4), como computando a razão das transmissões de PCDs recebidas pelas transmitidas, praticamente da mesma forma como se calcula a

Probabilidade de Detecção. A diferença é que aqui a mensagem tem de ser recuperada pelo PROCOD III integralmente, sem nenhum erro de bit em nenhum campo. Do mesmo modo como a probabilidade de detecção, o ambiente mais apropriado para a medida é o de transmissões simultâneas de PCDs, com todas as intermodulações resultantes.

A medida da Probabilidade de Sucesso apresenta o indicador de qualidade global do PROCOD III e deve ser efetuada regularmente durante a fase operacional do PROCOD III. Para isto, é necessário que o equipamento que simule emule as transmissões de PCDs possa ser inserido na cadeia de recepção sem afetar o desempenho da mesma.

6. Proposta de Ferramenta de Avaliação e Teste do PROCOD III

A solução proposta é um equipamento que possa simular com precisão o comportamento dinâmico do ambiente de transmissões de PCDs do SBCD e emular os sinais de PCDs resultantes da simulação. Deve ser compatível com a utilização durante as fases desenvolvimento e operação do PROCOD, sem afetar o desempenho da cadeia de recepção. Por fim deve possuir recursos para o auxílio ao gerenciamento do SCDB, permitindo a simulação de condições de crescimento da rede de plataformas, assim como de degradação ou alteração de desempenho destas plataformas.

6.1. Simulador / Emulador do comportamento do SCDB

As técnicas de simulação do “Hardware In the Loop” possuem conceitos aplicáveis ao desenvolvimento do Simulador / Emulador do SCDB (Syed, M S, Muhammad, Irfan, 2005):

- 1- Prestam a simulação e emulação de sinais dinâmicos e complexos, que são característicos do SBCD, em tempo real;
- 2- São soluções de baixo custo, especialmente se comparado ao custo do SBCD;
- 3- São utilizadas para testar hardware e softwares embarcados reais;
- 4- Geram equipamentos facilmente instalados em um ambiente de laboratório.

É possível criar um equipamento de teste, baseado nas características acima que, possuindo um modelo adequado do comportamento dinâmico das transmissões de PCDs do SBCD, seja virtualmente indiferenciado SBCD real do ponto de vista do PROCOD III.

Observando-se as características do PROCOD III, pode-se notar que, embora processe sinais aleatórios que variam dinamicamente, este não fornece realimentação em tempo real ao simulador. Desta maneira uma das características do HIL seria desprezada, justamente a característica de loop fechado. A simulação, portanto, não precisaria ser efetuada em tempo real e o resultado desta simulação seria convertido em sinais que emulariam o tráfego de sinais do SBCD. Este sinal emulado seria a entrada do PROCOD III e os dados, frutos do resultado do processamento deste sinal, seriam então comparados aos transmitidos, também no modo *off-line*, possibilitando a análise do desempenho do equipamento. Esta forma de atacar o problema torna mais simples e barato o desenvolvimento do equipamento simulador / emulador, que seria totalmente desenvolvido em um computador com sistema operacional padrão, não de tempo real, sem prejuízo de sua qualidade.

6.2. Arquitetura do Simulador / Emulador do SBCD

O Simulador / Emulador, denominado UTV III, possui uma arquitetura desenvolvida para operar em um computador do tipo PC, utilizando o sistema operacional Windows XP ou equivalente. É composto de módulos de software, desenvolvidos em C++, e módulos em hardware, implementados em componentes do tipo FPGA, conectados ao PC via interface PCI.

De uma maneira didática, o equipamento pode ser dividido em quatro subsistemas:

- Um subsistema que tem a função de Simulador;
- Um que tem a função de Emulador;
- Um subsistema de Comunicação com o usuário;
- Um subsistema de Processamento de Testes.

O enfoque dado neste trabalho é somente sobre os subsistemas Simulador e Emulador.

Figura (2) mostra a arquitetura da UTV III, realçando o fluxo de dados entre os módulos componentes do equipamento.

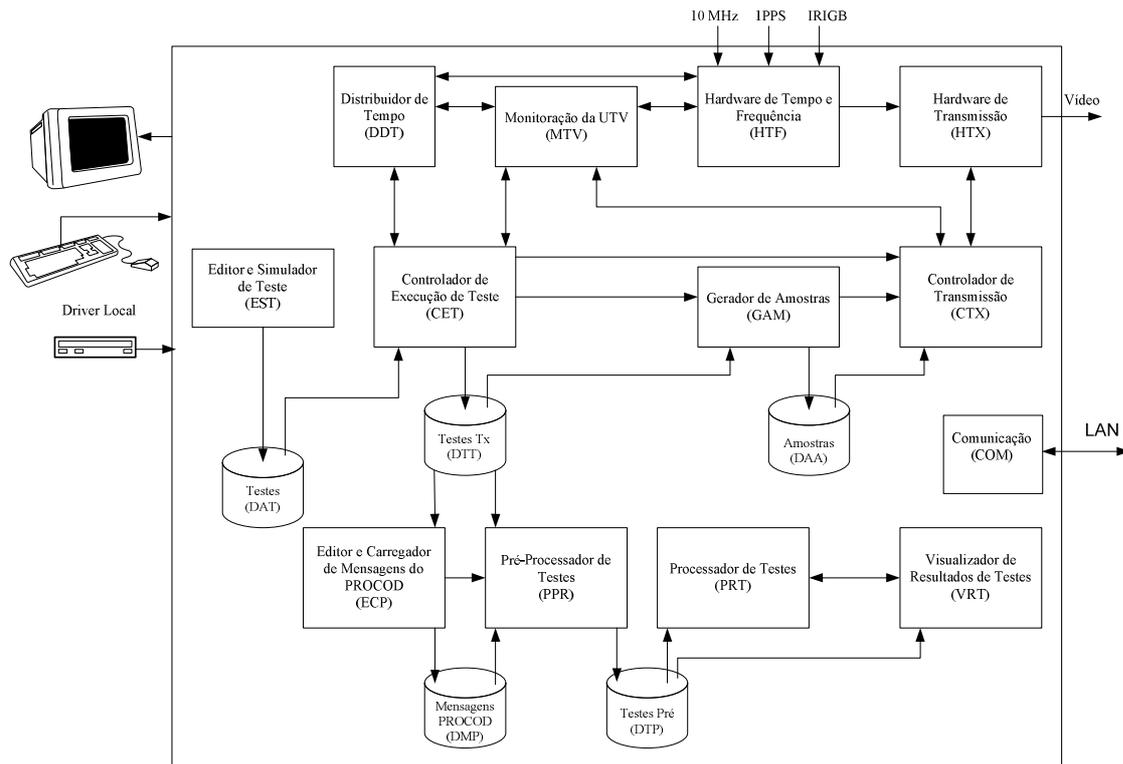


Figura 2 – Arquitetura da UTV III

6.2.1.0 Subsistema Simulador

O subsistema Simulador é composto pelo módulo:

6.2.1.1. Módulo Editor e Simulador de Testes

O módulo Editor e Simulador de Testes, EST, possui o modelo do SCDB adotado pelo simulador. Este modelo pode ser tão fidedigno ao SBCD quanto se queira, mas deve-se levar em conta sempre que não deve ser mais complexo que o necessário para uma dada aplicação. O módulo também permite que o operador programe os parâmetros de saída diretamente, sem que o modelo precise ser acionado. Isto viabiliza testes em que se queira avaliar o PROCOD III em determinadas condições específicas, todas sob controle.

1-Modelo para desenvolvimento

Para a fase de desenvolvimento do PROCOD III adotou-se um modelo simplificado, descrito a seguir. Os parâmetros de entrada necessários ao Simulador são:

1. Total de PCDs instaladas no SBCD;
2. Faixa da relação sinal / densidade de ruído de interesse;
3. Faixa da frequência inicial de transmissão das PCD de interesse;
4. Tempo máximo e mínimo das mensagens de PCD.
5. Faixa de interesse da taxa de variação Doppler.

A partir destes parâmetros de entrada, o simulador gera os seguintes parâmetros para o subsistema emulador:

1. Número de sinais simultâneos de PCDs;
2. Relação sinal / densidade de ruído de cada sinal de PCD;
3. Frequência de cada sinal de PCD;
4. Tempo de cada mensagem de PCD.
5. Taxa de variação Doppler do sinal de cada PCD.

Neste modelo foram adotados os cálculos seguintes segundo Tude, 1986.

Para determinação do parâmetro Número de transmissões simultâneas de PCD's:

τ = tempo médio de transmissão de uma PCD = 640 ms.

T = Taxa média de repetição de uma PCD = 120s.

O número de sinais simultâneos segue uma distribuição de Poisson, cuja função de probabilidade é dada por:

$$p(k, \lambda\tau) = \exp(-\lambda\tau) (\lambda\tau)^k/k! \quad (5)$$

k= número de PCDs simultâneas;

$\lambda = N/T$ = taxa média de emissões do sistema inteiro;

N= número total de PCDs.

Para os parâmetros Relação sinal / densidade de ruído, Frequências do sinal, Taxa de variação Doppler e Duração das transmissões, adota-se no modelo uma distribuição linear de probabilidade. Para efeito da simulação, divide-se o tempo total da simulação, que seria de, no máximo 15 minutos, o tempo máximo de uma passagem de satélite, em intervalos de 1s. A cada segundo o modelo seria aplicado com a conseqüente geração dos parâmetros gerados pelo simulador. Estes parâmetros são então disponibilizados ao emulador que vai transformá-los em sinais nas bandas de vídeo atualmente em uso pelo SBCD.

2-Modelo para auxílio ao gerenciamento do SBCD

No caso da utilização da UTV III como ferramenta de auxílio ao gerenciamento do SBCD, o modelo do simulador apresentado acima não é apropriado, pois não representa fielmente o suficiente a dinâmica do fluxo de sinais de PCDs em relação ao sistema real. Para isto é necessário que o modelo tenha a capacidade de realizar a simulação a partir de parâmetros de entrada que seriam:

- 1-O posicionamento geográfico de um número arbitrário de PCDs;
- 2-O posicionamento geográfico de um número arbitrário de estações terrenas de recepção de dados;
- 3-Os *Two Line Elements* de um número arbitrário de satélites;
- 4-A potência de emissão de sinal de cada PCD;
- 5-A frequência de transmissão de cada PCD;
- 6-A taxa de repetição de transmissão de cada PCD.

A partir da entrada destes parâmetros, o modelo poderia propagar a órbita dos satélites cadastrados e estabelecer o fluxo de transmissão de sinais das PCDs, gerando os mesmos tipos de parâmetros de entrada para o subsistema Emulador que o modelo utilizado para testes e avaliação. Um modelo desenvolvido por Leonel Fernando Perondi (Perondi, 2011) pode, com pequenas adaptações, ser integrado à UTV III e atender aos requisitos necessários.

6.2.2.Subsistema Emulador

Este sistema é responsável pela geração física dos sinais que representam o fluxo de transmissões de PCDs a partir dos parâmetros pelo simulador. Como o Simulador gera os parâmetros individualmente para cada PCD presente a cada instante da simulação, o Emulador vai primeiramente realizar a emulação de cada PCD individualmente. Depois vai efetuar a somatória dos sinais obtidos e aplicar uma normalização, nos moldes do receptor de bordo do satélite que também normaliza a potência recebida. Em seguida converte os dados digitais para analógicos, em uma frequência precisa, associada a uma referência.

Este subsistema é composto pelos módulos de software e hardware seguintes:

6.2.2.1.Módulo Controlador de Execução de Testes

Este módulo, CET, permite que o operador escolha um arquivo de teste, simulado, editado e armazenado previamente. A partir da seleção, dá um nome único ao arquivo e passa-o ao módulo Gerador de Amostras.

6.2.2.2.Módulo Gerador de Amostras

O módulo Gerador de Amostras, GAM, transforma o arquivo de dados, com os parâmetros referentes aos sinais de PCDs recebido do Simulador, em um arquivo de sinais de vídeo digitalizados, na taxa de amostragem de 1,25MS/s.

6.2.2.3.Módulo Controlador de Transmissão

O sinal de vídeo de saída do emulador precisa ser recomposto a uma taxa precisa e referenciado a um tempo exato. O módulo Controlador de Transmissão, CTX, em associação com o módulo Hardware de Transmissão, foram desenvolvidos para garantir que o fluxo de saída de dados de vídeo digitalizado se mantenha em uma taxa suficiente para que o teste não sofra interrupção depois de iniciado. Este módulo pode receber como entrada arquivos contendo dados reais de passagens de satélites digitalizadas. Estes arquivos são importantes para os ajustes de parâmetros configuráveis do PROCOD III, garantindo o ponto ótimo de operação.

6.2.2.4.Módulo Hardware de Transmissão

O módulo hardware de transmissão, HTX, recebe os dados de vídeo digitalizados pelo GAM e os converte para o domínio analógico. Esta conversão é feita numa taxa precisa de 1,25MS/s para garantir que os sinais simulados pelo EST sejam perfeitamente construídos no mundo analógico.

6.2.2.5.Módulo Hardware de Tempo e Frequência

Este módulo, HTF, gera as informações de data: dia do ano, hora, minuto, segundo e milissegundos, a partir da demodulação de um sinal no padrão IRIG-B, garantindo a referência de tempo precisa.

6.2.3.Subsistema Processador de Testes

Este subsistema é responsável pela consolidação dos resultados dos testes efetuados. A partir de um arquivo de registro, com todos os parâmetros dos sinais gerados pela UTV III para um determinado teste, o Processador de Testes compara os parâmetros deste arquivo com os resultados do processamento dos sinais do teste pelo PROCOD III, emitindo relatórios adequados para cada tipo de teste efetuado. Este subsistema é composto pelos seguintes módulos:

6.2.3.1.Módulo Editor e Carregador de Mensagens do PROCOD III

Este módulo, ECP, é responsável pelo recebimento das mensagens processadas pelo PROCOD III, disponibilizando-as para posterior análise.

6.2.3.2.Módulo Pré-Processador de Testes

Este módulo o, PPR, permite que o operador selecione o arquivo de teste a ser processado e o tipo de teste a ser analisado. Permite também a configuração dos parâmetros que serão usados para o processamento do teste.

6.2.3.3.Módulo Processador de Testes

O módulo PRT, a partir das informações contidas nos arquivos de testes gerados pelo EDT, dos arquivos de mensagens de testes recebidos do PROCOD III e dos parâmetros inseridos pelo PPT, processa os testes escolhidos, gerando os relatórios resultantes do processamento.

6.2.3.4.Módulo Visualizador de Resultados de Testes

O módulo VRT apresenta os relatórios gerados pelo PRT ao operador, através de uma interface gráfica.

6.2.4.Subsistema de Comunicação

Este subsistema permite a comunicação do operador com o UTV III e do UTV III com o PROCOD III.

6.2.4.1.Módulo de Comunicação

O módulo COM permite que o UTV III se conecte, via LAN, ao PROCOD III.

Através deste enlace o UTV III envia arquivos de configuração de testes ao PROCOD III e recebe os resultados dos testes efetuados.

6.2.4.2.Módulo de Monitoração

O módulo de monitoração, MTV, coleta dados importantes referentes ao funcionamento do equipamento e apresenta ao operador por meio de interface gráfica.

7.Resultados da utilização do UTV III

Todos os resultados obtidos até o momento são considerados preliminares, já que a implementação do UTV III não está completa. Até o presente todas as versões preliminares dos módulos componentes dos subsistemas Simulador e Emulador foram implementadas e integradas, mas ainda são necessários ajustes de parâmetros de saída que mantenham os níveis do sinal gerado dentro da faixa dinâmica adotada pelo PROCOD III. Até o presente, nenhum trabalho foi efetuado visando à integração com o simulador mais complexo, que habilitará a função de auxílio ao gerenciamento. Abaixo seguem os resultados da utilização do UTV III na melhoria de alguns índices do PROCOD III.

7.1.Probabilidade de Detecção

A grande contribuição do UTV III na melhoria deste índice foi na facilitação para se desenvolver o algoritmo que efetua detecção. Classicamente o processo de detecção se dá observando-se uma faixa do espectro onde só exista ruído e comparando o valor da integração desta faixa com a integração de uma faixa de interesse, onde

possa haver sinal. Caso o valor da integração da faixa de interesse seja maior que a do ruído, determina-se a detecção. Mesmo no caso de ambientes onde só existam sinais e ruído branco, existe uma probabilidade de falso alarme associada ao processo. Com o auxílio do UTV III foi possível, observando-se os resultados da Transformada Rápida de Fourier utilizada no processo de detecção, aplicada na banda de frequências de interesse, reconhecer um padrão nos dados de saída desta Transformada, e reduzir o falso alarme na presença de ruído branco a virtualmente zero. Mas pôde-se notar também, a partir das observações, que os casos de falso alarme em um ambiente próximo ao real do SBCD se dão muito mais devido às raias geradas pela modulação de uma PCD, que se torna ruído para outra, do que devido ao ruído branco.

A partir destas observações, pode-se elaborar um algoritmo melhorado que leva em conta estas raias, melhorando de forma considerável seu desempenho global. Comparando-se a primeira versão do algoritmo desenvolvido com os resultados do mecanismo de busca e detecção adotado pelas versões anteriores do PROCOD, conseguiu-se um ganho expressivo, chegando a 99% de probabilidade de detecção em um ambiente emulado do SBCD.

7.2.Taxa de Erro de Bits, BER

Como dito anteriormente este indicador era avaliado, nas versões anteriores do PROCOD, somente durante a fase de desenvolvimento com os demoduladores desacoplados do resto do equipamento. A medição do BER era efetuada somente com sinal na presença de ruído branco gaussiano. Com o uso do UTV III, a medida de BER pode ser efetuada em qualquer fase da vida útil do PROCOD III, o que por si só já é um grande ganho, pois a aferição do BER na fase operacional é importante para a avaliação da cadeia de recepção como um todo. Além desta facilidade, conseguiu-se um ganho considerável na qualidade do indicador, sobretudo quando o ambiente apresenta os sinais intermodulantes, os causadores do maior número de erros de bits. O PROCOD III atingiu 1 erro em 10.000 bits, no ambiente simulado próximo ao real do SCDB, com S/N_0 de 40db/Hz. Na presença apenas de ruído branco gaussiano, o PROCOD III atingiu o mesmo índice com S/N_0 de 38dB/Hz, um ganho apreciável.

7.3.Probabilidade de Sincronismo de Palavra

Com a utilização do UTV III, foi possível incluir no projeto do PROCODIII uma interface que permite a mediada de tempo entre o início do processo de modulação na transmissão de uma PCD e o tempo limite para o aparecimento da palavra de sincronismo. Com isto, foi possível se estabelecer uma melhor estratégia de reconhecimento desta palavra e ganhar um tempo importante no processo de detecção. Este ganho de tempo possibilitou que mais 3 bits fossem incluídos na palavra de sincronismo, diminuindo a probabilidade de falso reconhecimento, melhorando substancialmente a probabilidade de sincronismo de palavra de 0,832 para 0,987.

$$P_{sp} \approx (1 - \alpha)^{n-1} (1 - \beta)$$

o valor de n, no caso do PROCOD III é de 5 bits

$$\alpha = (1/2)^{11};$$

$\beta = 11 \times 10^{-4}$, já que $P_e = 10^{-4}$ para S/N_0 de 40dBHz, requisito nova versão.

Logo $P_{sp} = 0,987$.

7.4.Probabilidade de Sucesso

Até o momento, foi utilizado apenas o a entrada de parâmetros manual, sem auxílio dos modelos, para a medição deste índice. Procurou-se entrar com dados que representassem situações bastante desfavoráveis à detecção e recuperação das mensagens sem erros. Um exemplo de situação negativa seria uma série de transmissões de um sinal fraco de PCD, com relação sinal / densidade de ruído de 40dB/Hz, ladeado, a uma distância de 2kHz, por dois sinais de PCDs fortes, com relação sinal / densidade de ruído de 55dB/Hz. Nesta situação conseguiu-se uma Probabilidade de Detecção maior que 95%. Este é um valor preliminar, usado apenas como indicativo durante o processo de desenvolvimento. Uma avaliação mais elaborada somente se dará aplicando-se o modelo simplificado ou o modelo mais complexo do comportamento do SBCD.

8.Conclusões

A utilização do Simulador / Emulador UTV III no desenvolvimento do PROCOD III pode ser considerada bastante positiva. Facilitou muito a aplicação dos testes em todas as fases de desenvolvimento. Permitiu análises dos indicadores de qualidade do projeto com maior precisão, garantindo que os requisitos de projeto fossem respeitados e possibilitando melhorias destes requisitos. Possibilitou que a avaliação de todos os índices de qualidade do processador seja efetuada ao longo de toda sua vida útil, sem prejuízo da operação.

O tempo e os recursos utilizados no desenvolvimento do UTV III foram, em sua maioria, compensados por uma maior rapidez no desenvolvimento do PROCOD III. Mas o principal, sem dúvida, foram os ganhos de qualidade no processo e o conhecimento agregado no desenvolvimento de simuladores que poderão ser utilizados em equipamento correlatos ou em um futuro melhoramento do SBCD, com aumento de suas taxas de transmissão e de PCDs instaladas.

Agradecimentos

Agradecemos aos colegas Auro Tikami, Carlos Alberto Ferrari e Antonio Cassiano Julio Filho sem os quais o desenvolvimento deste trabalho seria muito mais difícil.

Referências

COATS, J. L. The Nimbus F random access measurement system – **IEEE Transactions on Geosciences Electronics**, V.GE-13, n_o 1,p.18-27, jan 1974.

COSTA, M.H.M. **Estudo de viabilidade do subsistema transponder de carga útil do primeiro satélite da MECB/SS**. São José dos Campos: INPE, 1984. (INPE – 3820 – RPI/90).

TUDE, E. A. P. **Análise do sistema de coleta de dados da MECB/SS**. São José dos Campos: INPE, 1986. (INPE – 3820 - NTE/253).

OLIVEIRA, J.R. et al **Missão espacial completa. Estudo de Viabilidade do satélite brasileiro**. São José dos Campos: INPE, 1979.

YAMAGUTI, W.; ORLANDO, V.; PEREIRA, S. P. – Sistema brasileiro de coleta de dados ambientais : status e planos futuros. In: SIMPÓSIO DE SENSOREAMENTO REMOTO, 14, Natal, 2009. **Anais...**
Disponível em: <http://mar.te.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.21.20.46/doc/1633-1640.pdf>.
Acesso em: 12 out. 2010.

PACOLA SOBRINHO, L. C. **Deteção, aquisição e demodulação de sinais em um sistema de comunicação com acesso aleatório**. 118p. 1988. Dissertação (mestrado em Engenharia e Tecnologia Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1988.

PACOLA SOBRINHO, L. C. **Descrição funcional e análise de desempenho do processador de coleta de dados**. São José dos Campos: INPE, 1990. (INPE – 5037 – RPE/620).

DIFRANCO, J. V. **Radar detection**.USA: Prentice Hall, 1968.

WHALEN, A. D. **Detection of signals in noise**.USA: Academic Press, 1971.

HAYKIN, S. **Digital Communications**.USA: Wiley, 1988.

SYED, M. S.; MUHAMMAD, I. Embedded Hardware/ Software Verification and Validation using Hardware In the Loop Simulation. In: IEEE 2005 International Conference on Emerging Technologies. Islamabad, 2005. **Anais...**
Disponível em:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1558931&userType=inst>. Acesso em: 18 nov.2010.

PERONDI, L.F. **Simulador do sistema brasileiro de coleta de dados ambientais**. São José dos Campos: INPE, 2011 Em processo de publicação.