

Detector de Sinais de Curta Duração para os Satélites do Sistema de Coleta de Dados Brasileiros Através de Análise Espectral Digital

João Carlos P. Rae; Waldecir J. Perrella e Marco A Chamon

Resumo— Este trabalho apresenta o projeto e validação com dados reais de um detector de sinais de plataformas de coleta de dados, aleatórios no tempo, em frequência e número, na faixa de frequências de 35 a 155[kHz], para aplicação nos satélites CBERS do Programa Espacial Brasileiro. A detecção dos sinais é realizada através de análise espectral digital, baseada em estimação não paramétrica direta, com janelas esféricas prolate.

Palavras-Chave— Análise Espectral, Estimação Espectral, Processamento Digital de Sinais, DSP, Sistemas de Telecomunicação, Plataforma de Coleta de Dados, Enlace Espacial e Enlace Satélite.

Abstract—This work presents the project and validation with real data of a detector for data collecting platforms signals, which occur randomly in time, frequency and number, in the frequency band of 35 to 155[kHz], to be applied in the CBERS satellites of the Brazilian Space Program. The signals' detection is performed through digital spectral analysis, based in direct nonparametric estimation with digital spheroidal prolate windows.

Keywords—Spectral Analysis, Spectral Estimation, Digital Signal Processing, DSP, Telecommunication Systems, Data Collecting Platforms, Space link and Satellite Link.

I. INTRODUÇÃO

O Sistema Brasileiro de Coleta de Dados [1] (SBCD), em operação no país desde fevereiro de 1993, tem importância estratégica para o Brasil, e tem como função a distribuição automática de informações climáticas, ambientais, hidrológicas e de geo-localização. O sistema atual conta com um conjunto de Plataforma de Coleta de Dados (PCDs) espalhados pelo país, cujas informações coletadas são retransmitidas via satélite para um centro de recepção de dados. Atualmente esses satélites operam apenas como repetidores analógicos dos sinais das PCDs, com processamento mínimo a bordo. O presente estudo é um primeiro passo para a introdução de sistemas regenerativos no SBCD, ou seja, com demodulação dos sinais das PCDs a bordo. Estes sistemas oferecem inúmeras vantagens do ponto de vista técnico e operacional,

João Carlos P. Rae, Divisão de Eletrônica Aeroespacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, E-mail: rae@dea.inpe.br ;

Waldecir J. Perrella, Divisão de Eletrônica e Telecomunicações, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, E-mail: waldecir@ita.br ;

Marco A. Chamon, Divisão de Eletrônica Aeroespacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, E-mail: chamon@dss.inpe.br .

pois melhoram as características de transmissão uma vez que separam os enlaces de subida e descida. Além disso, permitem processamento e eventual armazenamento a bordo.

Para isso, técnicas de estimação e detecção espectral foram estudadas [2 a 6] para se avaliar o método de detecção mais eficiente à aplicação, considerando-se os limites do sistema. Foram considerados não apenas o desempenho das técnicas de estimação, mas também a complexidade computacional e a capacidade de se processar em tempo real sinais com um número de PCDs desconhecido a priori, obtendo uma estimativa linear direta do seu espectro de potências, e decidiu-se pela utilização do estimador direto constituído pelo periodograma com janela temporal de dados prolate de ordem zero. Com os resultados da análise foi desenvolvido e validado um algoritmo de detecção das PCDs utilizando a técnica de processamento digital de sinais na busca em frequência dos sinais de PCDs. Como na prática não se dispõe de dados reais da aplicação, foram utilizados para a validação do algoritmo os sinais reais recebidos no *front end* dos demoduladores e processadores de dados (PROCODs1e2 – processadores codificadores de dados de PCDs) não embarcados da estação receptora terrena de Cuiabá, que recebem os sinais na mesma faixa de frequências do detector proposto. Desta forma, como contribuição adicional, com pequenas alterações o algoritmo de detecção desenvolvido, foi também validada para o detector não embarcado PROCOD3, em desenvolvimento, que utilizará processamento digital de sinais.

A. O Sistema Brasileiro de Coleta de Dados

O Sistema Brasileiro de Coleta de Dados, consiste de cerca de 500 PCDs fixas e móveis distribuídas pelo Brasil, que transmitem dados ambientais e de geo-localização em UHF na banda de frequências de 401,6[MHz], para os satélites de órbita baixa SCD1, SCD2 (satélite de coleta de dados) e CBERS 2 (satélite de recursos terrestres sino-brasileiro) da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB), aleatoriamente no tempo, frequência e número de PCDs. Estes satélites modulam em fase os sinais para a banda S (2 GHz) e os retransmitem para 02 estações terrenas receptoras de dados (ETRs), onde são recebidos, convertidos para a faixa de frequências de 65 a 125 [kHz] e tem seus dados recuperados. As informações das PCDs são então enviadas para o centro de missão, onde são processadas e entregues aos usuários do sistema. A fig.1 apresenta o referido sistema.

As PCDs enviam os dados para os satélites como mensagens de 360 a 920 [ms] de duração, transmitidas a intervalos regulares de 40 a 220 [s], codificados em bi-phase

L (Manchester) em 400 [bps] e modulados em fase 60° em 401,62 [MHz] ou 401,65 [MHz]. Devido a desvios dos ajustes de frequência das PCDs e ao efeito Doppler inerente ao enlace espacial, os satélites recebem as mensagens de forma aleatória na faixa de frequência de 401,635 [MHz] ± 30 [kHz]. A Tabela I apresenta o formato da mensagem.

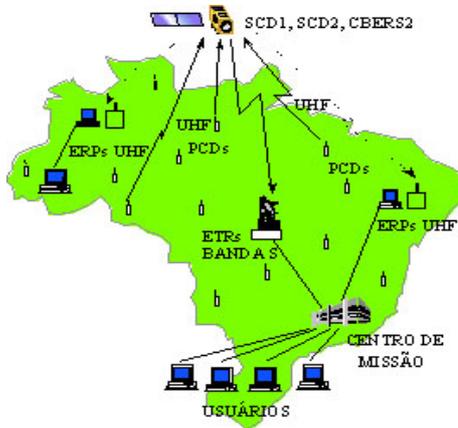


Fig. 1. O Sistema Brasileiro de Coleta de Dados.

TABELA I
Formato da Mensagem das PCDs

Portadora Pura	Portadora Modulada						
160 ms	A	B	C	D	E	F	G
• Portadora Pura	160 ± 2.5 ms						
• Estrutura da Mensagem							
A – Sincronização de Bit	15 bits “1”						
B – Sincronização de Palavra	8 bits (“00010111”)						
C – Inicialização	1 bit “1”						
D – N° de Blocos de 32 bits	4 bits (N = 1,2,...8)						
E – Identificação da PCD	20 bits						
F – Dados dos Sensores	32*N						
G – CRC (opcional)	8 bits						

B. O Estimador Não-Paramétrico Direto Utilizado

O estimador direto utilizado é constituído do periodograma das amostras temporais do sinal janeladas pela janela prolate de ordem k=0 e meia banda de frequências NW=1. A janela prolate reduz consideravelmente o vazamento espectral (aliasing) inerente ao periodograma, sem perda significativa de potência de detecção, pois são as janelas que concentram a máxima energia em uma dada banda de frequências. A figura fig.2(a) e (b) apresenta a janela temporal prolate utilizada, comparada com a janela natural ((c) e (d)) do periodograma:

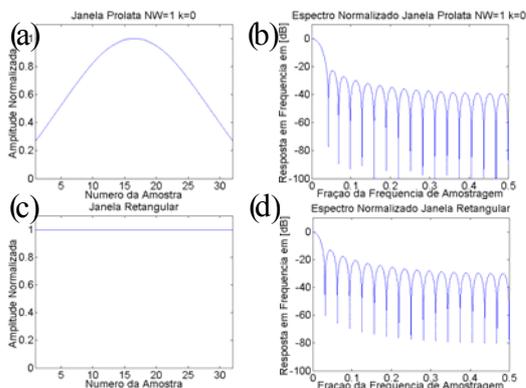


Fig. 2. Formato e Representação Espectral Unilateral das Janelas Temporais Prolate NW=1, k=0 e Retangular.

Na equação (1) apresenta-se este estimador direto do espectro verdadeiro $S_{XX}(f)$ do sinal:

$$\hat{S}_{XX}^d(f) = T_S \left| \sum_{n=1}^N h(n)x(n)e^{-j2\pi f n T_S} \right|^2, \quad (1)$$

onde: N é o número de amostras do sinal, $x(n)$ são as amostras temporais do sinal, $h(n)$ são as amostras da janela temporal h e T_S é o inverso da frequência de amostragem do sinal.

II. O ALGORITMO DE DETECÇÃO:

Foram estabelecidos os seguintes requisitos de desempenho para o detector embarcado:

TABELA II
Requisitos de Desempenho para o Detector Embarcado

4 Faixas de Operação (*):	35 a 155kHz .
Relação Sinal/Ruído (P/N_0):	≥ 43,59 [dBHz].
Faixa Dinâmica de Potência :	17,66 [dBHz].
Potência Máxima Recebida:	$P_{MAX} = -142,34$ [dBW]
Probabilidade de Detecção (P_D):	≥ 0,95
Taxa de Falso Alarme (T_{FA}):	≤ 1 falso alarme por segundo ([fa/s]).
Variação do Doppler da PCD:	< 120[Hz/s]
Ruído Espectral Médio:	$N_0/2 = -206,60$ [dBW/Hz] FIXO

* O sistema será expandido para 4 canais de operação.

Com os requisitos do projeto foi desenvolvido o algoritmo de detecção conforme fluxograma da fig.3:

- O sinal das PCDs, recebido na faixa de frequências de 35 a 155[kHz] é amostrado à taxa de 330[kamostras/s], em seguida, a cada 49,65[ms], o segmento de 16384 amostras obtido é janelado pela janela prolate $NW=1$ $k=0$, gerando-se o estimador direto correspondente, com 100% de zero-padding.

- Para cada uma das 4 faixas de operação, compara-se as amostras espectrais geradas com o limiar espectral de detecção estabelecido $\lambda_{DET} = (\lambda_D - 3$ [dB]) = -180,41[dBW/Hz], onde λ_D é o limiar espectral mínimo para a probabilidade de detecção $P_D \leq 0,95$, para a PCD de potência mais fraca recebida.

- Em seguida, detectam-se as amostras espectrais do estimador acima do limiar de detecção λ_{DET} e mantém-se apenas a amostra de maior potência entre amostras adjacentes (refinamento).

- Verifica-se se esta amostra foi detectada no estimador anterior, neste caso considera-se detectada uma PCD, e estabelece-se uma faixa de bloqueio de detecção de ±120[Hz] em torno da PCD para detecção de sinais de potência ≥6[dB] superiores e uma faixa de ±1600[Hz] para os outros sinais, para prevenir a detecção de PCDs em conflito.

A informação de PCD detectada é enviada para o suposto demodulador e o processo de detecção é reiniciado.

Observações:

- O limiar λ_{FA} calculado para a taxa de falso alarme $T_{FA} = 1$ [fa/s] é 28,51 vezes (14,55[dB]) inferior ao limiar λ_D . Observa-se, portanto, que os requisitos de desempenho de P_D e T_{FA} do detector são cumpridos com muita folga para esta aplicação.

- Na aplicação terrena PROCOD, o nível do ruído recebido é variável, devendo ser estimado, o que é realizado calculando-se a média espectral do ruído nas 2 faixas laterais de 500[Hz] de cada uma das 4 faixas de recepção onde praticamente não ocorrem sinais de PCDs.

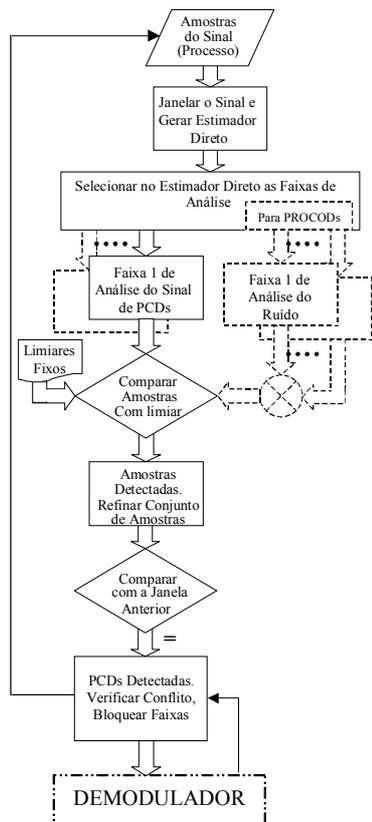


Fig. 3. Fluxograma do algoritmo do detector de sinais de PCDs.

III. RESULTADOS

Foi avaliado o desempenho do detector nas aplicações espacial e terrena, obtendo-se os resultados a seguir.

A. Simulação da Aplicação Espacial:

Foi gerado um sinal simulado com duração 1,5[s] e frequência de amostragem $f_s=300$ [kHz], embebido em ruído gaussiano branco com densidade espectral de potência -206,6[dBW/Hz], com algumas PCDs em condições limites da aplicação, conforme a tabela III:

TABELA III
Características das PCDs do Sinal Simulado da Aplicação Espacial

Nº PCD	Característica Principal	Potência [dBW]	Frequência [Hz]	Ac. Doppler [Hz/s]	Início[s]:
1	Potência 3[dB] acima λ_{FA}	-170,00	42500	0	0,075
2	Potência mínima das PCDs	-160,00	57500	0	0,15
3	Potência Média e Variação máxima do Doppler	-147,67	79400	-120	0,225
4	Potência Média e Conflito com PCD3	-147,67	80600	0	0,30
5	Potência mínima PCDs Fixas	-153,00	102500	0	0,375
6	Potência Média e f_c coincide com o bin espectral	-147,67	117496,03	0	0,40
7	Potência Média e f_c no meio de 2 bins espectrais	-147,67	132496,49	0	0,475
8	Potência máxima PCDs fixas	-142,34	147500	0	0,55

Na fig.4 têm-se, em formato de espectrograma, os 30

estimadores diretos gerados no processo de detecção do sinal simulado. Na fig.5 submetem-se os estimadores ao limiar de falso alarme, para verificação da simulação e do detector; onde se verifica, em (1), que a portadora pura da PCD1 apresenta seu máximo espectral em torno de 3[dB] acima do referido limiar, conforme especificado, e observa-se o formato da PCD: Os primeiros 160[ms] de portadora pura (2), seguidos de 15 bits "1" (3) e dos bits de informação (4), modelados como pseudo-aleatórios, modulando parcialmente a portadora. Observa-se também, em (5), a portadora residual do período modulado da PCD. Estas observações indicam que a simulação e o limiar estão corretos.

Periodogramas [dB] dos Segmentos 1 a 30 do Sinal >-220[dB] JanelaProlata NW=1 k=0

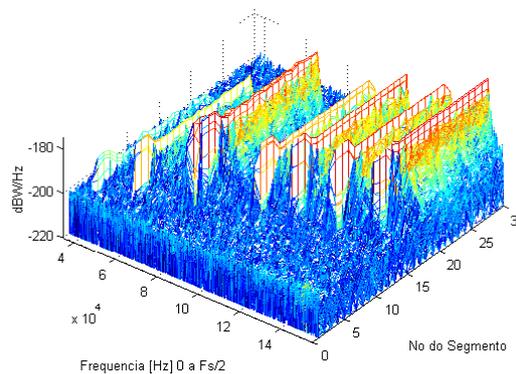


Fig. 4. Espectrograma dos Estimadores Diretos Gerados na Detecção dos Sinais das PCDs da Simulação da Aplicação Espacial.

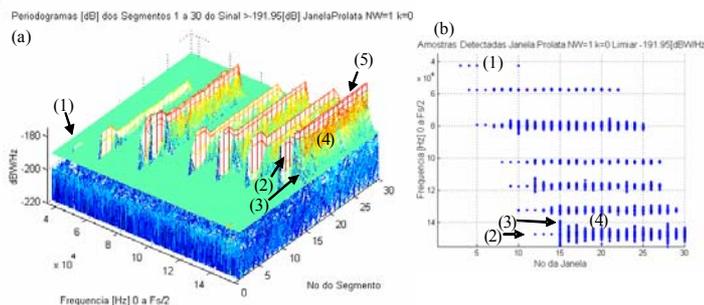


Fig. 5. Espectrograma dos Estimadores Diretos, Cortado pelo Limiar de Falso Alarme, e Mapa de Amostras Acima do Limiar, Simulação Espacial.

Na fig.6 apresenta-se o espectrograma submetido ao limiar de detecção λ_{DET} estabelecido e o seu correspondente mapa de amostras acima deste limiar. Nesta figura observa-se, na PCD2, com potência mínima dentro da faixa dinâmica, que as amostras da sua portadora pura (1) estão em torno de 3[dB] acima do limiar, o que indica que este limiar está correto.

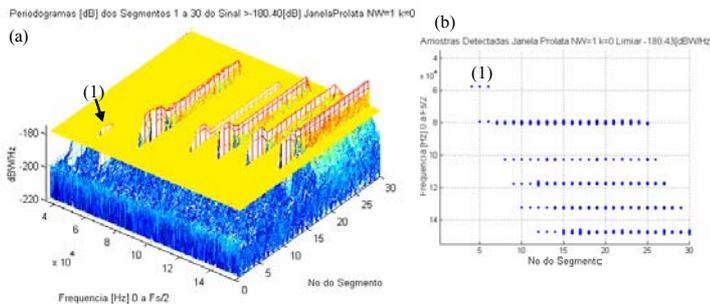


Fig. 6. Espectrograma dos Estimadores Diretos, Cortado pelo Limiar de Detecção λ_{DET} , e Mapa de Amostras Acima do Limiar, Simulação Espacial.

Na fig.7 apresenta-se o mapa de detecção das PCDs, com

as PCDs detectadas (pontos em vermelho) e suas faixas de bloqueio em vermelho. Dentro destas faixas, o algoritmo não verifica a presença de sinais de PCDs. As amostras em azul dentro das faixas são apresentadas apenas para visualização da eficiência do bloqueio de detecção. Devido à proximidade das PCDs 3 e 4, em conflito, a PCD 4, não foi detectada corretamente, como esperado, logo não teve sua faixa de guarda estabelecida, possibilitando a detecção errônea da amostra (1). Neste caso, é estabelecida a faixa de guarda em azul, o demodulador envia a informação de falha, e a faixa de guarda é diminuída para ± 120 [Hz] pelo restante do período de duração máxima da PCD, conforme esperado.

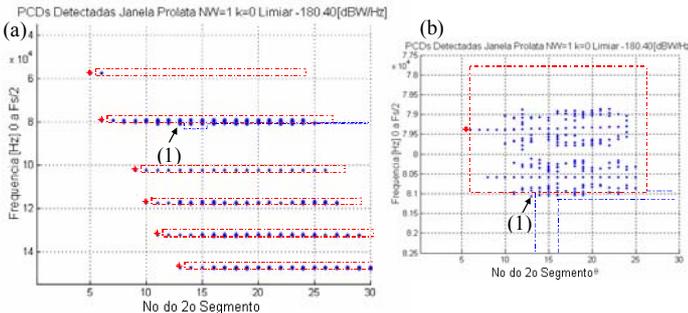


Fig. 7. Mapa de Detecção das PCDs com as Faixas de Bloqueio e Mapa das PCDs Detectadas (a); Mapa ampliado (b); Simulação Espacial.

Na fig.8 e na tabela IV apresentam-se o mapa das PCDs detectadas da simulação espacial conforme o algoritmo de detecção proposto, e as seus valores obtidos.

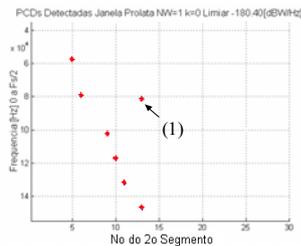


Fig. 8. Mapa das PCDs Detectadas, Simulação Espacial.

TABELA IV
PCDs Detectadas Pelo Algoritmo Proposto na Simulação Espacial

Nº PCD	Potência [dBW]	Frequência [Hz]	Ac. Doppler [Hz/s]	Início[s]:
2	-160,47	57504,27	0	0,2482
3	-147,97	79398,19	-120	0,2978
4 (1)	-163,45	81069,95	0	0,6454
5	-152,95	102500,61	0	0,4468
6	-147,77	117496,03	0	0,4965
7	-148,24	132491,46	0	0,5461
8	-142,59	147496,95	0	0,6454

Comparando-se os valores obtidos com os valores especificados na simulação, verifica-se que todas as PCDs, exceto a PCD4 em conflito, foram detectadas nos primeiros 71,1 a 98,2[ms] do período de 160[ms] de portadora pura, portanto com larga margem para sincronismo de portadora antes do início do período modulado de cada PCD, possibilitando as suas corretas demodulações. Verifica-se também que as potências obtidas para estas PCDs diferem dos valores especificados em no máximo 0,57[dB] (14%), para a PCD7, que tem a portadora localizada no meio de dois bins espectrais. Estes valores, portanto, podem ser utilizados com razoável precisão para a estimação das potências das PCDs. Observa-se também, para estas PCDs, que as frequências

obtidas estão bem próximos dos valores simulados, com erro máximo de 5,03[Hz] na PCD7, que é o erro esperado da resolução do estimador (330 [kHz]/(2×32768)). Em uma implementação prática as informações de frequência das PCDs enviadas ao demodulador possibilitam o rápido sincronismo de portadora para início da demodulação dos sinais das PCDs.

B. Análise Espectral do Sinal Real da Aplicação Terrena:

Em seguida foram analisados 4,0 [s] do sinal recebido no front end dos PROCODs da Estação Terrena de Cuiabá, da passagem do satélite CBERS2, iniciados às 14:05:28[UT] de 16/12/2003. Estes sinais foram gravados com resolução de 12 bits, à taxa de amostragem de 298507,47[amostras/s]. O sistema de coleta de dados atual opera com apenas dois canais de recepção, em 65 a 95 [kHz] e 95 a 125[KHz], com PCDs cuja relação P/N_0 útil na recepção varia de 43 a 56[dBHz]. Estes fatores não prejudicam a verificação de desempenho do detector, no entanto, torna necessário recalcularem-se os limiares espectrais de T_{FA} e P_D para a análise e detecção dos sinais reais. Com estes novos valores calculados: $\lambda_{DET} = (\lambda_D - 3$ [dB]) = $(N_0/2 + 27,64)$ [dBW/Hz] e $\lambda_{FA} = (N_0/2 + 11,59)$ [dBW/Hz], onde $N_0/2$ é o ruído medido da aplicação, realiza-se a detecção dos sinais das PCDs:

Nas fig. 9 e 10 apresentam-se os espectrogramas dos estimadores diretos gerados nos 4[s] dos sinais reais, ampliados nas 2 faixas de recepção de sinais de PCDs:

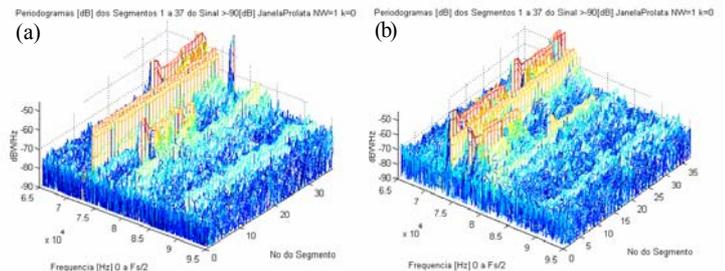


Fig. 9. Espectrograma dos Estimadores Diretos Gerados na Detecção dos Sinais Reais das PCDs, na Faixa de 65 a 95[kHz]. (a) 0 a 2[s]; (b) 2 a 4[s].

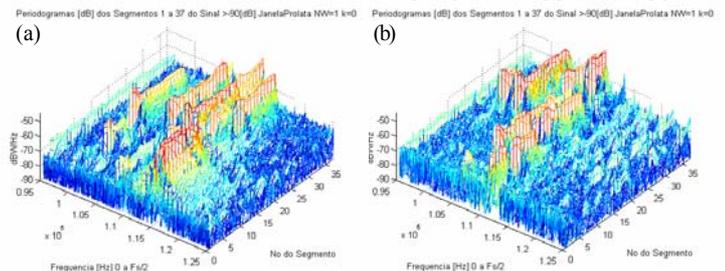


Fig. 10. Espectrograma dos Estimadores Diretos Gerados na Detecção dos Sinais Reais das PCDs, na Faixa de 95 a 125[kHz]. (a) 0 a 2[s]; (b) 2 a 4[s].

Como os sinais das PCDs são aleatórios, não se dispõe de informações a priori das PCDs presentes no sinal recebido. Desta forma, é necessário obtê-las, o que foi feito por inspeção visual dos padrões de PCDs nos seus espectrogramas cortados pelos limiares de falso alarme e detecção, e mapas de amostras acima destes limiares. Nas fig. 11 e 12 apresentam-se os mapas de amostras acima do limiar de falso alarme, com as PCDs identificadas, em ordem crescente de frequência da portadora:

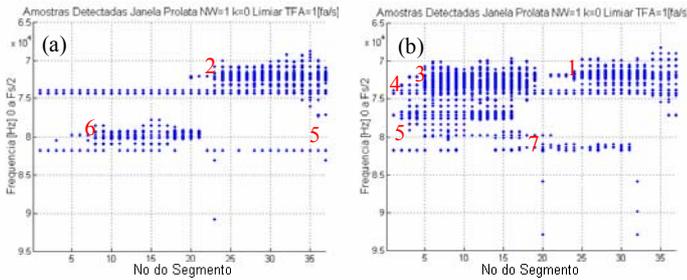


Fig. 11. Mapas de Amostras Acima do Limiar de Falso Alarme, na Faixa de 65 a 95[kHz], dos Sinais Reais das PCDs. (a) 0 a 2[s]; (b) 2 a 4[s].

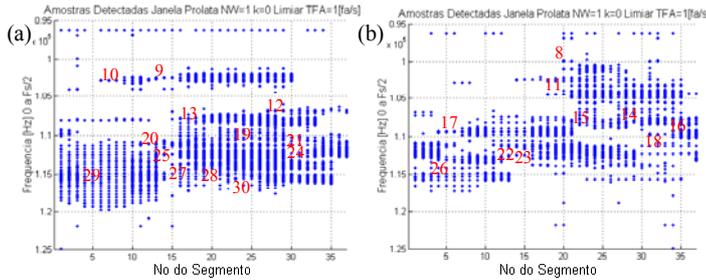


Fig. 12. Mapas de Amostras Acima do Limiar de Falso Alarme, na Faixa de 95 a 125[kHz], dos Sinais Reais das PCDs. (a) 0 a 2[s]; (b) 2 a 4[s].

Na tabela V apresentam-se as PCDs identificadas no sinal real, com as suas características relevantes estimadas:

TABELA V
PCDs Identificadas no Sinal Real

Nº da PCD	Frequência Estimada [Hz]	Relação P/N ₀ [dBHz]	Amostra Espectral Inicial	Período de Duração[s]
1	71840	52,95	14:05:04,153[s]	≥ 0,714[s]
2	72058	49,42	14:05:02,098[s]	0,988[s]
3	72090	47,94	14:05:03,165[s]	0,933[s]
4	73120	51,47	14:05:03,110[s]	0,933[s]
5	77160	46,77	14:05:02,976[s]	0,902[s]
6	79774	44,18	14:05:01,274[s]	0,933[s]
7	81410	35,61	14:05:03,768[s]	0,988[s]
8	100960	46,41	14:05:04,098[s]	0,329[s]
9	102440	46,96	14:05:01,714[s]	0,988[s]
10	102820	40,65	14:05:01,329[s]	0,439[s]
11	104400	51,34	14:05:03,988[s]	0,988[s]
12	106840	40,57	14:05:02,482[s]	0,738[s]
13	107830	46,21	14:05:01,878[s]	0,988[s]
14	108010	44,68	14:05:04,482[s]	≥ 0,604[s]
15	108560	40,31	14:05:04,153[s]	0,439[s]
16	109320	45,45	14:05:04,921[s]	≥ 0,165[s]
17	109420	45,37	14:05:03,220[s]	0,988[s]
18	109720	50,42	14:05:04,701[s]	≥ 0,384[s]
19	110360	30,37	14:05:02,317[s]	0,714[s]
20	111150	42,25	14:05:01,604[s]	0,768[s]
21	111240	41,12	14:05:02,647[s]	0,738[s]
22	111420	40,65	14:05:03,714[s]	0,604[s]
23	111682	43,88	14:05:03,823[s]	0,714[s]
24	112290	40,57	14:05:02,647[s]	0,628[s]
25	112491	54,44	14:05:01,714[s]	0,933[s]
26	113070	46,45	14:05:03,220[s]	0,439[s]
27	113780	40,48	14:05:01,823[s]	1,098[s]
28	113930	45,19	14:05:01,988[s]	0,933[s]
29	115350	55,62	<14:05:01[s]	≥ 0,768[s]
30	115650	44,68	14:05:02,262[s]	0,714[s]

Na tabela V observa-se que as PCDs 7e19, em cinza, têm P/N₀ estimada bem abaixo da relação de potência P/N₀ = 40[dBHz] de uma PCD com o máximo espectral próximo ao limiar λ_{DET} = (λ_D -3[dB]), logo não serão detectadas pelo algoritmo proposto, conforme se verificará nas fig.14e15. Também, as PCDs 3,12,14,16,21,23,24,27e28, em vermelho, estão em conflito com outras PCDs que devem ter sido

detectadas, e, conforme o algoritmo proposto, estas PCDs não serão detectadas, conforme se verificará a seguir.

Na fig.13 têm-se os gráficos da média do ruído N₀/2 medida em cada estimador gerado, de -74,5 a -81,4[dBW/Hz]:

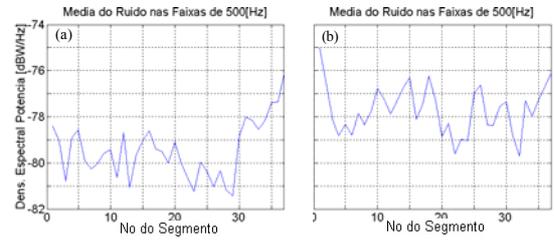


Fig. 13. Médias N₀/2 do ruído da aplicação. (a) 0 a 2[s]; (b) 2 a 4[s].

Nas fig. 14e15 têm-se os espectrogramas dos estimadores gerados, cortados pelo limiar de detecção λ_{DET}, os mapas de amostras espectrais acima do limiar, e os mapas de detecção das PCDs, com as suas faixas de bloqueio apresentadas. Observa-se as faixas de bloqueio em azul, minimizando o efeito, nas fig. 14(e)e(f) de interferências constantes ocorridas nesta frequência durante a recepção do sinal real, e na fig. 15(e) da detecção errônea de amostras do período modulado da PCD 29, devido à sua relação P/N₀ = 55[dBHz], próxima do máximo da faixa dinâmica da aplicação.

Também, comparando-se os mapas de detecção das PCDs (e) e (F) com os mapas de detecção das amostras espectrais (c) e (d), verifica-se que as PCDs, com as faixas de bloqueio em vermelho, foram todas detectadas no seus períodos de portadora pura, permitindo a sua correta demodulação:

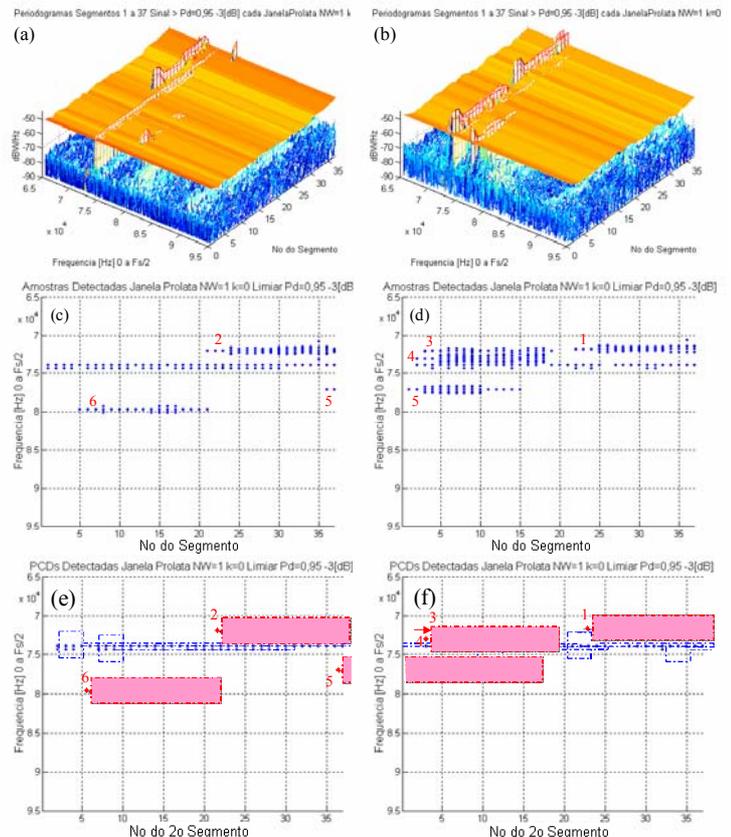


Fig. 14. Espectrogramas dos Estimadores Diretos Cortados pelo Limiar de Detecção λ_{DET}, Mapas de Amostras e Mapas de Detecção dos Sinais Reais das PCDs, na faixa de 65 a 95[kHz]. (a,c,e) 0 a 2[s]; (b,d,f) 2 a 4[s].

