



ALR_Sim[®] - Software Simulador da Operação do ALR, o Altímetro Laser para a Missão Espacial Brasileira ASTER

Antonio Gil Vicente de Brum¹

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, UFABC, Santo André, SP.

Resumo. Este trabalho está diretamente relacionado ao desenvolvimento do altímetro laser para a missão ASTER, denominado ALR. A primeira missão brasileira ao espaço profundo planeja enviar uma nave sonda para explorar o asteroide triplo 2001-SN263. O ALR será utilizado na investigação científica da forma, topografia e distribuição de massa dos componentes do asteroide triplo. O instrumento desempenhará também papel auxiliar na navegação da nave. Coordenado pela UFABC, o desenvolvimento proposto envolve uma parceria entre a UFABC, UNICAMP e empresas do setor aeroespacial nacional. Este trabalho relaciona-se com o esforço para modelagem do aparelho tendo em vista a simulação da operação deste. Como resultado principal, um ambiente de simulação da operação do aparelho foi criado e denominado *ALR_Sim*². A simulação envolve as características do aparelho (emissor e receptor) e do ambiente em que ele opera (meio e alvo: transmissividade, refletividade, rugosidade e outras peculiaridades das superfícies, etc.). O simulador produz como saída as formas de onda que se espera obter como sinal de retorno para diferentes formas de pulsos emitidos. Estas formas de onda deverão ser pós processadas para extração de informação das características topográficas da superfície alvo. Registrado em 2014, o *ALR_Sim* foi testado com sucesso com relação às situações mais comuns esperadas. Hoje em sua 2ª versão, o simulador foi melhorado para representar melhor o realismo da operação do aparelho durante a missão.

Palavras-chave. Missão Espacial Brasileira ASTER, Altímetro Laser, ALR, laser rangefinder, software simulador *ALR_Sim*, asteroide 2001-SN263

1 Introdução

A altimetria espacial, sua importância, uso e fundamentos

Os aparelhos conhecidos como “laser rangefinders” são utilizados com sucesso na medição precisa de distâncias desde a fonte emissora até o alvo. LIDAR é um dos nomes comumente dados a estes aparelhos (LIDAR = “Light Detecting and Ranging”). Dentre estes, os que têm operação baseada na medição do TOF, isto é, o tempo de ida e volta do pulso laser emitido (TOF = “time of flight”) são de interesse neste trabalho.

Quando utilizados em missões espaciais, estes aparelhos assumem funções de importância relativas à navegação da nave e à investigação do corpo alvo. Em termos de

¹ antonio.brum@ufabc.edu.br

² ALR_SIM – certificado de registro BR51 2013 001233-3, Inst. Nac. de Propriedade Intelectual, INPI.

navegação, oferecem medição precisa da distância e da velocidade entre o veículo espacial e o corpo celeste. Como instrumento científico, são utilizados nas fases de maior aproximação e proximidade com o alvo, principalmente para o levantamento das características topográficas da superfície deste. Adicionalmente, informações relativas ao campo gravitacional do corpo alvo e à característica de refletividade da sua superfície (albedo) também podem ser obtidas com seu uso. A Fig. 1, a seguir, ilustra a operação de um aparelho deste tipo. A informação relativa ao relevo da superfície do corpo alvo é extraída por processamento, normalmente feito em terra, da forma de onda do pulso refletido, que é detectado amostrado, e gravado pelo instrumento, sendo depois enviado para a Terra.

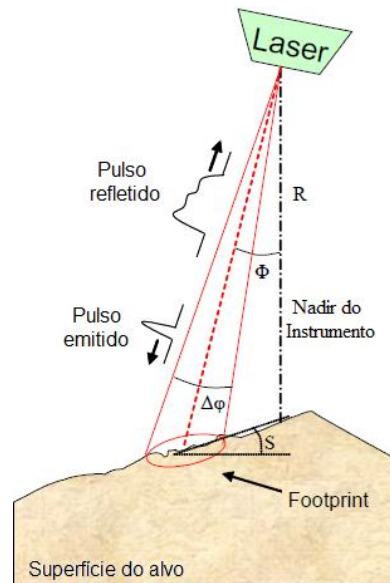


Fig. 1 – Ilustração da operação de um altímetro laser em missão de exploração espacial.

Fonte: Adaptado de [1], p. 8.

Missões espaciais passadas, em andamento e futuras fizeram uso deste tipo de equipamento, como é o caso das missões de exploração de asteroides NEAR-Shoemaker [2], encerrada em 2001, Hayabusa 1 [3], encerrada em 2010, Hayabusa 2 [4], em andamento] e da futura missão BepiColombo (lançamento em 2018) para exploração do planeta Mercúrio.

A missão ASTER e o ALR

A 1ª missão espacial brasileira ao espaço profundo tem como alvo o asteroide triplo 2001-SN263. Dentre os instrumentos que voarão na missão, o altímetro laser, denominado ALR (ASTER Laser Rangefinder), está em desenvolvimento com coordenação de engenharia da UFABC numa parceria entre a UNICAMP, UFABC e empresas do setor aeroespacial. A descrição da missão bem como as características do instrumento são assunto das referências [5, 6].

Instrumento crucial para a missão, o ALR contribuirá para a caracterização geodésica e geofísica dos componentes do asteroide triplo, além da contribuição que oferecerá para a navegação da nave.

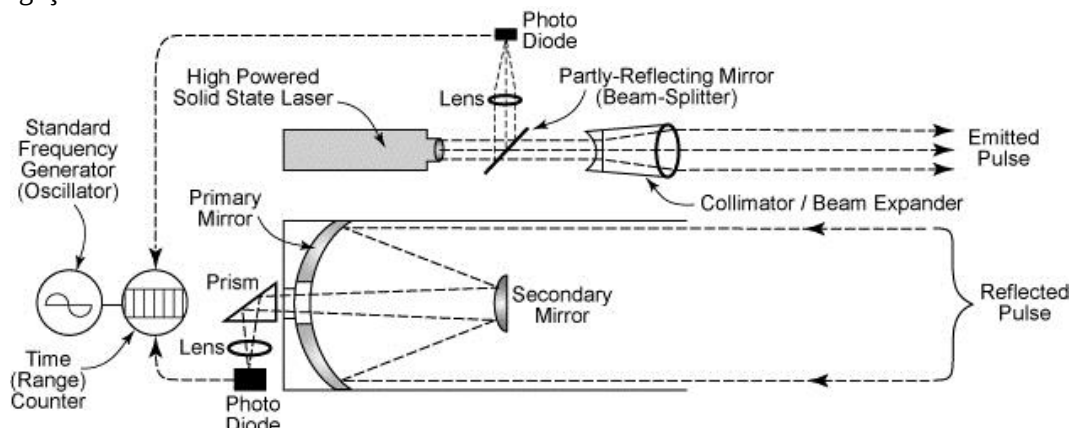


Figura 2: Diagrama dos principais componentes de um Laser Rangefinder pulsado com operação baseada na medida do tempo de voo (TOF) do pulso emitido.
FONTE: [7], p. 15.

Segundo o seu projeto, em andamento, o ALR será um equipamento que terá como emissor um laser de estado sólido pulsado de Nd: YAG (neodímio dopado com ítrio granada de alumínio), bombeado a diodo e com chaveamento Q; a frequência da luz emitida será 1064 nm.

Os estudos sobre o instrumento e sua operação tiveram como resultado principal a criação do software, que simula a operação de um altímetro a laser pulsado com as características do ALR. O pacote de programa inclui a simulação do ambiente e das condições de operação do instrumento e engloba:

- i. a emissão de pulsos laser de vários tipos (formas de onda);
- ii. a amostragem e detecção do pulso emitido;
- iii. a propagação no meio, as características do *footprint* (área iluminada pelo pulso na superfície do alvo) e a reflexão em alvos com características diferentes;
- iv. a amostragem, detecção e processamento das formas de onda dos pulsos que retornam refletidos pelo alvo.

As Figuras 3 e 4 ilustram parte dos fundamentos utilizados nas modelagem efetuadas.

2 O software simulador *ALR_Sim*® (Simulador de Altímetro Laser)

O objetivo geral do simulador é servir como laboratório para compreensão, implementação e testes de todos os conceitos envolvidos na detecção de distâncias com uso de um aparelho laser rangefinder pulsado baseado no tempo de voo da luz emitida.

As modelagens e simulações efetuadas possibilitam a compreensão dos detalhes da operação do aparelho que é objeto da simulação. Tal compreensão permite a identificação e definição de parâmetros de projeto essenciais à operação que ainda não tenham sido

identificados, assim como o refinamento de valores previamente estabelecidos em projeto para alguns parâmetros. O simulador oferece ambiente apropriado à implementação e teste das rotinas que compõem o software de controle e processamento de sinais do instrumento. Adicionalmente, os resultados das simulações oferecem informação importante para a definição dos componentes específicos adequados para composição do aparelho real, tendo em vista os objetivos do aparelho dentro da missão.

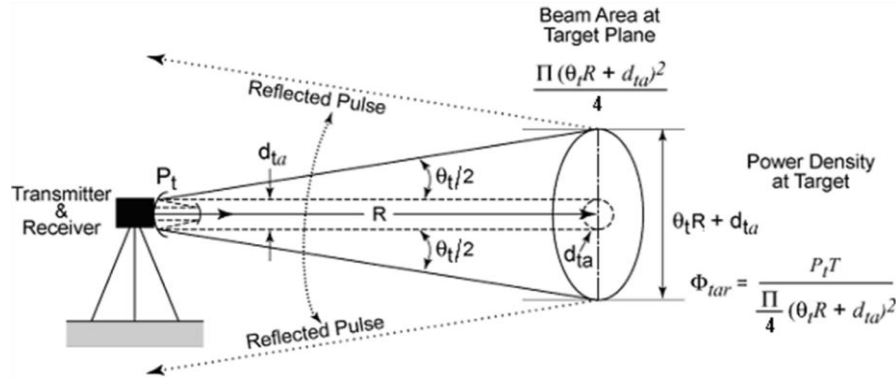


Figura 3: Área iluminada pelo feixe incidente (*footprint*) e densidade de potência no alvo. Fonte: adaptado de [7]; p. 22.

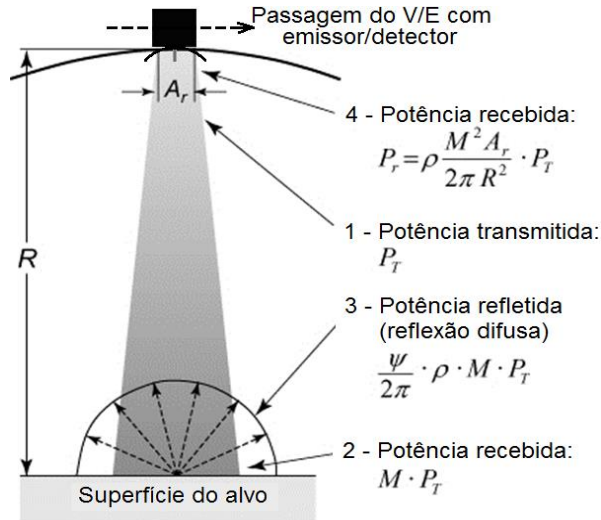


Figura 4: A potência transmitida, refletida e recebida pelo detector (após reflexão) é ilustrada neste diagrama, onde Ψ representa o elemento de ângulo sólido (unidade do SI: sr = sterradiano) relacionado ao elemento de área dA iluminada na superfície da esfera gerada pela irradiação da fonte de luz em todas as direções. No caso em questão, a irradiação se dá hemisfericamente (área da superfície da hemisfera = $4\pi R^2/2$, com ângulo sólido total igual a $4\pi/2=2\pi$ sr). Sabendo que $dA = r^2 \cdot d\Omega$, temos que a expressão utilizada representa a fração de área iluminada com relação à área total iluminada (da hemisfera), isto é, $dA/A_{\text{hemisfera}} = R^2 \cdot \Psi / (2\pi R^2) = \Psi/(2\pi)$.

Fonte: Adaptado de [8].

O simulador inclui todas as principais condições envolvendo a operação do instrumento, quais sejam: i) as características físicas do instrumento (parâmetros, especificações e características do transmissor/detector); ii) as características do ambiente onde se dará a operação do instrumento; iii) as características físicas da superfície-alvo.

Características físicas do instrumento

- Tipo de laser: pulsado, de Nd: YAG com chaveamento Q, operando a 1064 nm de comprimento de onda. Medida da distância baseada no tempo de voo (tof).
- Energia de um pulso ($\cong 16$ mJ) $\Rightarrow$ intensidade de pico da ordem de MW.
- Tempo total de emissão de um pulso: aproximadamente 15 ns;
- Frequência de repetição dos pulsos: 1 Hz.
- Abertura da saída do emissor: < 1 cm de diâmetro.
- Abertura do telescópio detector: 12 cm de diâmetro.
- Ângulo de divergência do feixe: 500-800 μ rad (cone completo).
- Intervalo de tempo de amostragem do sinal: i) emitido: 1 ns; ii) recebido: 5 ns;

Características do ambiente:

- Operação no ambiente espacial: transmissividade da luz: 100%;
- velocidade na luz no vácuo: $c = 299\,792\,458$ m/s

Características do alvo:

Na modelagem inicial, a área iluminada pelo laser sobre a superfície do alvo (*footprint*) foi dividida em 4 áreas com distâncias verticais instrumento-alvo dadas por R1, R2, R3 e R4 (ajustável, em metros). Exemplo: R1 = 1000,0; R2=R1+2,0; R3=R1+3,0; R4=R1+4,0; superfícies mais complexas, como a com cratera [9, 10], também fazem parte do simulador.

- tipo de reflexão considerada no modelo adotado: superfície reflete difusamente a luz.
- refletividades (ajustável) das áreas 1, 2, 3 e 4 (resp.): ρ_1 ; ρ_2 ; ρ_3 ; ρ_4 .
- inclinação das áreas 1, 2, 3 e 4 (resp.): inc_1 , inc_2 , inc_3 e inc_4 .

Obs.: A refletância ou refletividade foi estimada com uso da referência [9], onde os autores publicaram uma tabela com informação fornecida pela companhia Riegl que manufatura medidores lasers aéreos e terrestres, perfiladores e varredores. A tabela mostra a refletividade típica de vários refletores difusos para a radiação laser com comprimento de onda (λ) de 900 nm (por exemplo, ρ do asfalto = 17%, concreto liso = 24%, calcáreo = 75%); até o momento, não se sabe ao certo a refletância do 2001-SN263 para o comprimento de onda de 1064 nm. Este valor, contudo, pode ser menor. Quanto às inclinações, a inclinação crescente do terreno modifica a intensidade da luz que retorna ao detector, reduzindo-a com o cosseno do ângulo entre a normal à superfície e a direção da fonte emissora até o detector; a distância fonte-detector também aumenta ou diminui com a inclinação, o que, respectivamente, reduz ou aumenta ligeiramente a intensidade da luz detectada.

3 Descrição dos módulos que compõem o simulador

O pacote de programas foi desenvolvido em ambiente MATLAB[®] e é composto por várias rotinas cuja função é descrita aqui de forma agrupada, modularmente, segundo a operação que

realizam. Alguns módulos ainda estão em processo de refinamento ou ampliação. Os 6 módulos que compõem o pacote simulador são:

Módulo 1 - “Instrumento” – características do aparelho: transmissor e receptor

Neste módulo, todos os parâmetros do instrumento têm seus valores definidos para uso na simulação. Os parâmetros relativos aos tempos de amostragem dos sinais (dt_r = recebido e dt_e = emitido), também são definidos aqui.

Módulo 2 - “Modelagem do Pulso Emitido”

Neste módulo, a função que modela o pulso emitido para a simulação é escolhida e a sua amostragem, em intervalos de tempo dt (característica ligada ao oscilador que compõe o detector do instrumento), é realizada.

A escolha pelo tipo de pulso emitido é feita no programa. Os tipos de pulso modelados são: pulso retangular, trapezoidal, gaussiano, exponencial, exponencial ajustado (em termos da potência de pico = 1 MW, largura do pulso na meia potência = 10 ns, tempo máximo p/ atingir pico do pulso), exponencial com chaveamento Q e impulso Q ajustado (ambos com 15-16 mJ de energia). Sendo que os dois últimos são os que mais se ajustam ao caso real, em termos da emissão do laser pretendido para o ALR. Os outros modelos são utilizados para familiarização com a simulação, experimentação e validação de resultados (a partir da comparação entre resultados esperados e obtidos). O pulso emitido é amostrado, a intervalos de tempo dt_e . A Figura 5 apresenta alguns dos pulsos de entrada disponíveis.

Módulo 3 - “Alvo e Ambiente”

Neste módulo, os parâmetros que definem o ambiente de operação do instrumento (ar, vácuo, etc.) são estabelecidos. Este módulo também contém os parâmetros que definem as características do alvo a ser iluminado pelo instrumento e os valores atribuídos a estes. Aqui são inseridas as distâncias instrumento-alvo e a inclinação relativa entre estes. Os modelos relativos ao tipo de superfície, quanto à absorção da luz incidente e sua refletividade para o comprimento de onda do aparelho e quanto ao tipo de reflexão considerada (reflexão difusa), juntamente com o modelo adotado para simulação da reflexão da luz incidente (*modelo das N pequenas fontes pontuais* [10]) são parte deste módulo. A Figura 6 apresenta dois tipos de superfície modeladas.

Módulo 4 - “Caminho da Luz”

Este módulo contém: as modelagens e cálculos relacionados com a saída da luz emitida do aparelho, o caminho percorrido pela luz até o alvo, as características da incidência da luz na superfície do alvo (distribuição da energia do pulso sobre a área da superfície iluminada; o modelo do “chapéu plano” adotado para a distribuição da energia foi utilizado, sendo que a distribuição gaussiana da energia, mais realística, será introduzida e também poderá ser considerada em breve), a formação do *footprint*, a refletividade do alvo (para o comprimento de onda da luz incidente), as características do modelo de reflexão adotado e o caminho de retorno da luz ao aparelho.

Ao final do processamento efetuado neste módulo, dois vetores brutos, Trd_gl e Erd_gl , são produzidos e registram os valores de cada uma e todas as energias que retornaram ao detector, oriundas de cada uma das fontes de luz presentes no modelo de *footprint* utilizado, juntamente com os respectivos instantes de tempo de cada um desses retornos ao detector.

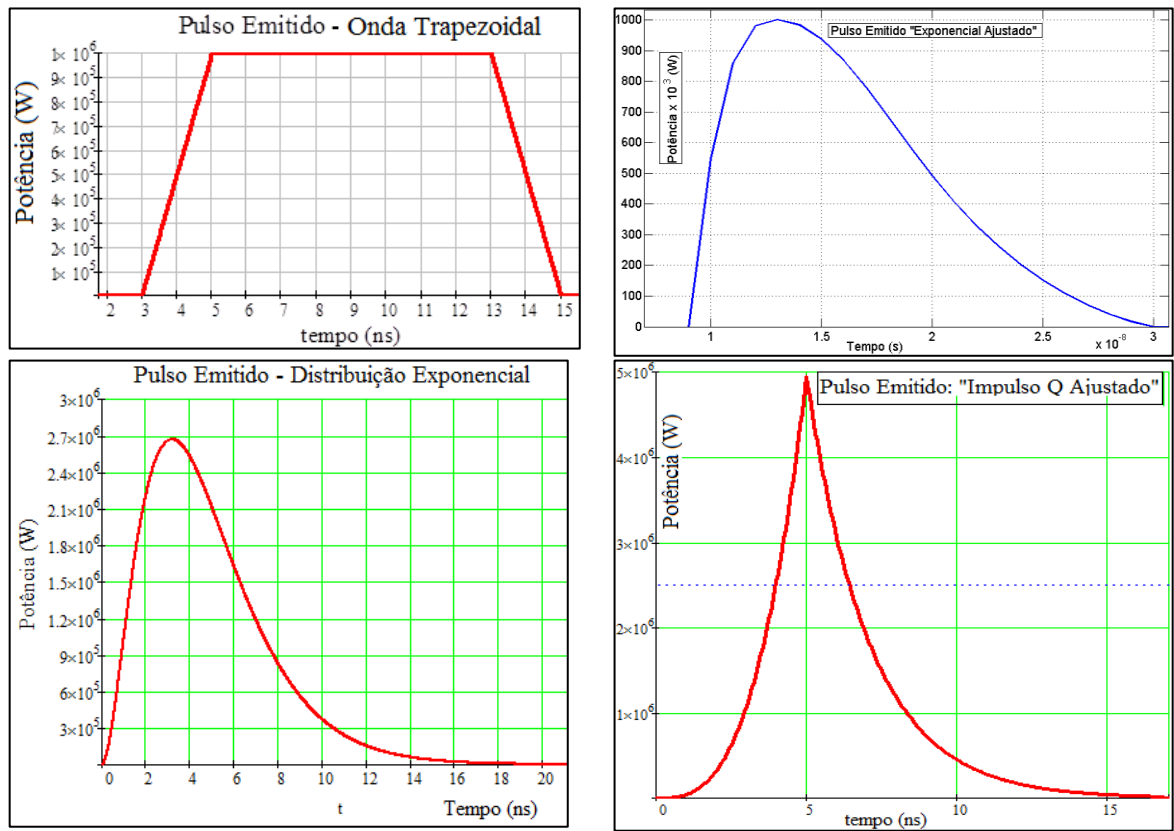


Fig. 5 – Quatro dentre as várias escolhas disponíveis para o tipo de pulso emitido.

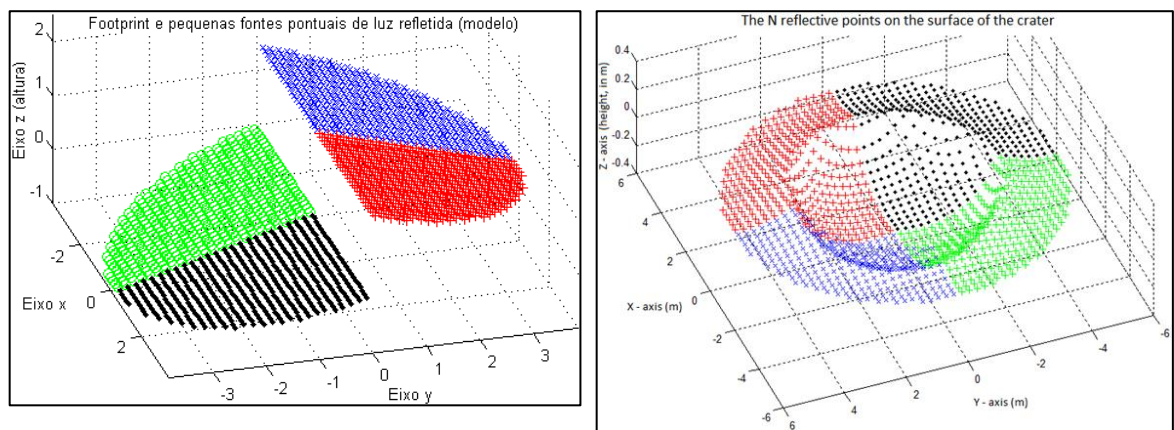


Fig. 6 – Exemplos de terrenos/superfícies modeladas para uso nas simulações.

6A) Superfície inclinada e com falésia (meio a meio, $D = 15$ km, 1,5 m de diferença de altura e inclinações -15° e $+15^\circ$ dos terrenos).

6B) Superfície com cratera.
Fonte: [11, 12]

Módulo 5 – “Detecção”

Aqui são efetuadas a modelagem da detecção da luz que retorna (após a reflexão do pulso

emitido no alvo) e a composição da respectiva forma de onda do pulso de retorno.

A amostragem é realizada distribuindo cada pacote de energia, valores contidos no vetor *Erd_gl*, de acordo com seu respectivo instante de retorno, dentro de intervalos inteiros de tempo definidos para amostragem do sinal, *dt_r* (no caso do ALR, *dt_r* = 5 ns). O instante de início da detecção, *tref*, é determinado a partir do menor valor no vetor *Trd_gl*, extraída a sua parte inteira. As energias todas são então agrupadas em seus respectivos intervalos de tempo (*tref*+*dt*, *tref*+2*dt*, *tref*+3*dt*, ..., *tmax2*+*dt*), onde *tmax2* é a parte inteira do maior instante de retorno registrado em *Trd_gl*. Após serem agrupadas, todas as energias que chegam dentro de um mesmo intervalo são somadas, simulando, assim, a integração do sinal recebido e amostrado a intervalos de tempo *dt_r*. Os parâmetros desta detecção são o intervalo de tempo de amostragem do sinal de retorno, *dt_r*, o instante de chegada do primeiro pacote de energia refletida (com ele calcula-se *tref*) e o instante de chegada do último pacote de luz refletida no alvo, utilizado para calcular *tmax*.

A função “*coleta_energia.m*” toma os vetores “*Trd_gl*” e “*Erd_gl*” como entrada e os processa, simulando a amostragem assim como realizada pelo detector. Como resultado deste processamento, os vetores “*Tfin*” e “*ETfin*” são obtidos e contém as energias já integradas e distribuídas de acordo com os seus respectivos instantes de retorno. O vetor “*Tfin*” contém os instantes médios de cada intervalo *dt_r* que são, então, utilizados para criação do gráfico final com a forma de onda detectada assim como amostrada de acordo com a simulação descrita. A Fig. 7 mostra algumas formas de onda dos pulsos de retorno obtidas nas simulações.

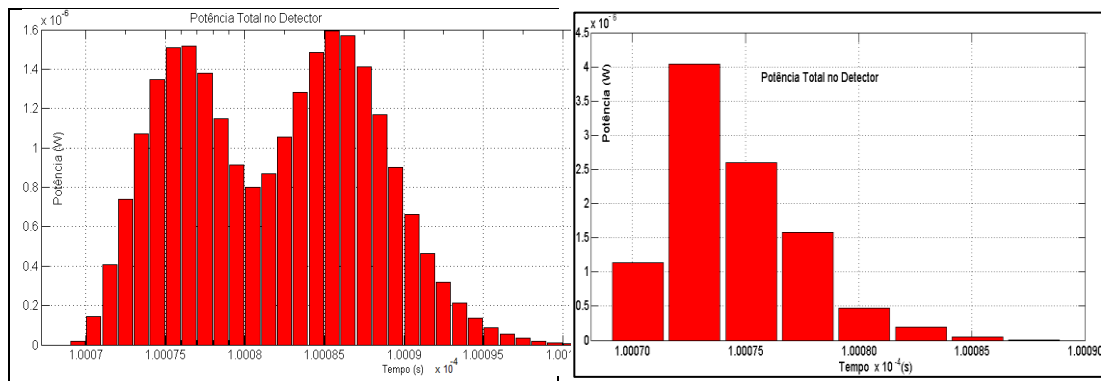


Fig. 7 – Formas de onda obtidas como retorno após reflexão do pulso exponencial com chaveamento Q em uma superfície:

- 7A) inclinada e com falésia (meio a meio; 7B) com cratera de 40 cm de desnível,
 D=15 km; 1,5 m de diferença de altura altura=15 km, *dt_r* = 2.5 ns.
 com inclinações -15° e +15°, *dt_r* = 1 ns.

É importante salientar aqui que o tempo selecionado para amostragem do sinal de retorno, *dt_r* (na Fig. 7A, *dt_r* = 1 ns; na Fig. 7B), *dt_r* = 2.5 ns), está diretamente associado com a característica de frequência do oscilador escolhido para compor o receptor, que, por sua vez, determina os intervalos de tempo para o registro da informação contida no pulso de retorno, influenciando diretamente na resolução vertical deste. Este item é definido no projeto de acordo com os requisitos de resolução e capacidade de geração, armazenamento e transmissão de dados da missão, no que tange ao aparelho. Neste projeto, definiu-se, inicialmente, *dt_r* = 5 ns => ResVert = 75 cm.

Módulo 6 - “Processamento de Sinais”

Este módulo contém menos algoritmos no momento e é nele que serão inseridos os algoritmos de processamento de sinais que se queira testar. Os testes são úteis para definição e ajustes do software de processamento de sinais a embarcar na unidade eletrônica de controle do aparelho. Por exemplo, o tipo de gatilho a utilizar para detecção da saída da luz emitida e que dispara o contador de tempo de voo do pulso (alguns deles: limiar, 50% do pulso, detecção do pico, etc.). Os algoritmos para detecção do pulso de chegada também (picos, limiar, convolução, etc.) e de processamento da forma de onda recebida, para extração de informação relativa à topografia do terreno-alvo (as formas de onda geradas como sinal de retorno; ver Fig. 7).

Observa-se que o tipo de algoritmo utilizado no processamento dos sinais influi diretamente na detecção da distância assim como calculada pelo aparelho e, portanto, na qualidade da informação extraída dos pulsos recebidos.

8 Conclusões e Comentários

O ALR_SIM foi registrado em 2013 (INPI: BR 51 2013 001233 3). A Universidade Federal do ABC é titular dos direitos patrimoniais do programa enquanto o autor deste trabalho é titular dos direitos morais do programa.

Uma breve descrição do programa é realizada neste trabalho. O pacote de programas simula a operação de um altímetro laser com as características do ALR. Os programas que compõem o simulador foram criados e testados no ambiente de programação do software MATLAB®.

Os resultados obtidos representam o esperado, de acordo com a literatura existente [1,7]. Adicionalmente, a validação dos resultados obtidos também foi realizado a partir do confronto do obtido com relação ao esperado para as situações mais simples, quais sejam, pulsos emitidos retangulares com solo plano, falésia, inclinado [10].

A distribuição espacial de energia cilíndrica (forma de “chapéu plano”) foi utilizada inicialmente. A distribuição gaussiana, que melhor aproxima o caso real, está em andamento.

As modelagens e simulações efetuadas objetivaram a compreensão dos detalhes da operação de um altímetro laser pulsado com operação baseada na detecção do tempo de voo, com as características do ALR. Tal compreensão permite a identificação e definição de parâmetros de projeto essenciais à operação do instrumento que ainda não tenham sido identificados, assim como o refinamento de valores previamente estabelecidos em projeto para alguns parâmetros. Como exemplos, cita-se o tempo de amostragem do sinal detectado. Nas simulações apresentadas utilizou-se $\Delta t_r = 1$ ns, o que confere ao aparelho maior resolução vertical (15 cm). Contudo, osciladores de até 5ns também são considerados no momento, pois seu uso deverá simplificar a composição e operação do aparelho (resolução vertical = 75 cm). O detector a utilizar deve ser adequado para registro da forma de onda do pulso que retorna (a esperada é identificada em simulação), com preservação suficiente das características mais relevantes da superfície, para extração destas, via processamento, com a resolução requerida/definida em projeto.

Superfícies-alvo com características diferentes foram modelados até então e levam em consideração a existência de falésia, inclinação, cratera, com diferentes refletividades [10,11]. Um módulo adicional está em desenvolvimento e deverá permitir que o simulador aceite como entrada superfícies irregulares diversas. Objetiva-se com isso reunir em um único terreno mais de uma característica relevante ou, então, pretende-se simular a passagem do instrumento sobre um

terreno real, desde que exista um modelo de elevação digital disponível (DEM – ‘digital elevation model’; trata-se de uma representação 3D da superfície de um terreno).

5 Referências

- [1] K. Marti. The BepiColombo Laser Altimeter - Detector Characterization and Implications for Mercury Science. Dr thesis (2005). Bern University, Switzerland.
- [2] R. W. Gaskell, O. S. Barnoiun-Jha, and D. J. Scheeres. Modeling of EROS with stereophotoclinometry. Lunar and Planetary Science XXXVIII (2007). Planetary Science Institute. Online at <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2007/pdf/1333.pdf>; accessed in May, 2017.
- [3] Katsuhiko Tsuno, Eisuke Okumura, Yoshihiko Katsuyama, Takahide Mizuno, Tatsukaki Hashimoto, Michio Nakayama, Hiroshi Hashimoto, Lidar on board asteroid explorer Hayabusa. ‘Proc. 6th Internat. Conf. On Space Optics’. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 27-30 June 2006 (ESA SP-621, June 2006).
- [4] Noda, H; Kunitomori, H; Mizuno, T et al Laser link experiment with the Hayabusa2 laser altimeter for in-flight alignment measurement. Earth, Planets and Space (2017) **69**:2. doi: 10.1186/s40623-016-0589-8
- [5] Elbert E. N. Macau ; Othon C. Winter ; Haroldo F. Campos Velho; Alexander A. Sukhanov Antônio Gil Vicente de Brum; J. Leonardo Ferreira ; Annibal Hetem; Gilberto M. Sandonato ; Rafael Sfair. The ASTER mission: exploring for the first time a triple system asteroid. Proceedings of the 62nd International Astronautical Congress (2011). Online at: <http://www.iafastro.net/iac/archive/browse/IAC-11/B4/2/10263/>; accessed in May, 2017.
- [6] A. G. V. de BRUM; A. Hetem Jr.; I. da S. REGO; C. P. F. Francisco; A. Fenili; F. Madeira; F. C da Cruz; M. Assafin. Preliminary Development Plan of the ALR, the Laser Rangefinder for the ASTER Deep Space Mission to the 2001 SN263 Asteroid. Journal of Aerospace Technology and Management, JATM (2011), DOI: 10.5028/jatm.2011.03033611.
- [7] J. Shan, and C. K. Toth. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. CRC Press (2009), 590 p. ISBN-13: 978-1420051421; ISBN-10: 1420051423.
- [8] C. Brenner. Aerial Laser Scanning. International Summer School on "Digital Recording & 3D Modeling" (2006). Greece, 24-29 April 2006.
- [9] A. Wehr; U. Lohr. Airborne laser scanning—an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (1999). P. 68–82. 1999 Elsevier Science. doi: 10.1016/S0924-2716(99)00011-8
- [10] A. G. V. de Brum, F. C. da Cruz, A. Hetem Jr.; A. P. Rodrigues. ALR—a laser altimeter for the first Brazilian deep space mission. Modeling and simulation of the instrument and its

operation. *Comp. Appl. Math.* (2015) 34:557–569. doi: 10.1007/s40314-014-0145-8

[11] A. G. V. de Brum, F. C. da Cruz, A. Hetem Jr. Laser altimeter for the deep space mission ASTER. Modeling and simulation of the instrument operation above a surface with crater. *Comp. Appl. Math.* (2016) 35: 739. DOI:10.1007/s40314-016-0322-z

[12] A. G. V. de Brum, F. C. da Cruz, A. Hetem Jr. ALR – Laser altimeter for the ASTER deep space mission. Simuled operation above a surface with crater. 2015 *J. Phys.: Conf. Ser.* 641 012007. doi: 10.1088/1742-6596/641/1/012007