

(12) FASCÍCULO DE PATENTE DE INVENÇÃO

(22) Data de pedido: 2013.09.09	(73) Titular(es): ACTIVE SPACE TECHNOLOGIES, ACTIVIDADES AEROESPACIAIS, LDA. RUA PEDRO NUNES 3030-199 COIMBRA PT
(30) Prioridade(s):	
(43) Data de publicação do pedido: 2015.03.09	
(45) Data e BPI da concessão: /	(72) Inventor(es): FERNANDO ANTÓNIO DOS SANTOS SIMÕES PT ABEL BORGES FERREIRA MENDES PT IVO ALEXANDRE DE OLIVEIRA RIBEIRO PT TIAGO MANUEL DE OLIVEIRA MARQUES PT JOAQUIM MIGUEL NUNES VARANDAS PT
	(74) Mandatário:

(54) Epígrafe: **MÉTODO E SISTEMA PARA A MONITORIZAÇÃO DE PROCESSOS DE ABLAÇÃO EM SISTEMAS DE PROTECÇÃO TÉRMICA**

(57) Resumo:

A INVESTIGAÇÃO DE PROCESSOS DE ABLAÇÃO QUE OCORREM NA SUPERFÍCIE DE SISTEMAS DE PROTECÇÃO TÉRMICA DURANTE A ENTRADA OU REENTRADA ATMOSFÉRICA É FUNDAMENTAL PARA A AVALIAÇÃO DO RISCO DA MISSÃO E DOS REQUISITOS DE MASSA DO SISTEMA. ESTA INVENÇÃO APRESENTA UM CONCEITO DE UM SENSOR ELÉCTRICO NÃO INTRUSIVO, COM MASSA REDUZIDA E BAIXA POTÊNCIA, PARA MONITORIZAR OS PROCESSOS DE ABLAÇÃO EM SISTEMAS DE PROTECÇÃO TÉRMICA. ESTE SENSOR ELÉCTRICO É INSPIRADO NA TÉCNICA DE IMPEDÂNCIA MÚTUA E APROPRIADO PARA APLICAÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO ESPACIAL. O SENSOR ATINGE UMA RESOLUÇÃO MELHOR QUE 0,5 MM PARA ESCUDOS TÉRMICOS DE PELO MENOS 50 MM DE ESPESSURA.

Resumo

Método e sistema para a monitorização de processos de ablação em sistemas de protecção térmica

A investigação de processos de ablação que ocorrem na superfície de sistemas de protecção térmica durante a entrada ou reentrada atmosférica é fundamental para a avaliação do risco da missão e dos requisitos de massa do sistema. Esta invenção apresenta um conceito de um sensor eléctrico não intrusivo, com massa reduzida e baixa potência, para monitorizar os processos de ablação em sistemas de protecção térmica. Este sensor eléctrico é inspirado na técnica de impedância mútua e apropriado para aplicações de instrumentação espacial. O sensor atinge uma resolução melhor que 0,5 mm para escudos térmicos de pelo menos 50 mm de espessura.

Descrição

Método e sistema para a monitorização de processos de ablação em sistemas de protecção térmica

Domínio Técnico da Invenção

A presente invenção está associada com um método e sistema para aplicações espaciais. Nesta patente é descrita instrumentação espacial que tem por objectivo aumentar a segurança dos veículos e missões espaciais. Para além disso, pretende-se otimizar os requisitos de massa de sistema de protecção térmica (TPS) sem aumentar o risco de falha da missão. A investigação do desempenho de TPS durante e após reentrada na atmosfera é normalmente ineficiente ou impossível. Sendo o escudo térmico de veículos espaciais um elemento crítico, os requisitos da missão englobam sempre uma sobre-estimação significativa da massa do TPS de modo a mitigar o risco de falha do veículo. Nesta patente apresenta-se um sensor eléctrico, baseado na técnica de impedância mútua (MI), para a monitorização da taxa de ablação de escudos térmicos. Este sensor eléctrico não invasivo é apropriado para sondas planetárias assim como missões tripuladas. Para além disso, o sensor pode ser utilizado na investigação de física de plasmas e processos aerotermodinâmicos na ionosfera durante a reentrada na Terra ou durante a entrada na atmosfera de outros planetas.

A Técnica Anterior

Veículos espaciais que entrem numa atmosfera planetária requerem o uso de um escudo térmico para os proteger de aquecimento aerodinâmico. O aquecimento aerodinâmico é gerado na superfície de um objecto durante a entrada na

atmosfera devido à combinação de fenómenos de compressão e fricção dos gases envolventes. A energia gerada pelos processos de aquecimento aerodinâmico é radiada novamente para o meio exterior devido à elevada temperatura da superfície do objecto. Variação de ablação do TPS está intimamente ligada à sua massa assim como à transferência de calor e reacções químicas que ocorrem na camada limite do gás. Na presente invenção, o termo ablação é utilizado para denotar a remoção de material do escudo térmico devido a aquecimento e pirólise causados por resistência de gás atmosférico.

O TPS pode englobar uma fracção significativa da massa da nave espacial ou sonda planetária. Por exemplo, o escudo térmico ablativo do módulo de comando Apollo compreendia cerca de $1/3$ da massa total do veículo, e a fracção na sonda Huygens era cerca de $1/4$. Para comparação, a carga útil científica na sonda Huygens era cerca de metade da massa do escudo térmico. A massa do escudo térmico é normalmente sobre-estimada para aumentar a margem de segurança da missão. Como a análise do desempenho do TPS durante e após a ablação é normalmente ineficiente ou impossível, e sendo o escudo térmico um ponto crítico de falha, os requisitos da missão englobam uma sobre-estimação significativa da massa do TPS. Assim sendo, monitorização da recessão da superfície do escudo causada por processos de ablação durante a entrada atmosférica é crucial para avaliar e quantificar a perda de massa, e consequentemente aumentar o desempenho do TPS.

Para além disso, monitorização do desempenho do escudo térmico pode ser útil para investigar fenómenos aerotermodinâmicos e a interacção do material ablativo com o plasma envolvente. Algumas ligas metálicas de alta temperatura conseguem resistir ao aquecimento durante a reentrada devido ao facto de grande parte da energia ser

re-radiada. Esta técnica é chamada de dissipação térmica, porém a quantidade de metal necessária para proteger o veículo é elevada. Materiais cerâmicos resistentes a altas temperaturas fazem parte de uma família adequada para aplicações de TPS, garantindo melhor operacionalidade. Para cerâmicos monolíticos, estes materiais possuem um ponto de fusão extremamente elevado, alta resistência à oxidação em ambientes típicos de reentrada e resistência mecânica razoável.

O desenho do escudo térmico é complexo e requer normalmente a inclusão de múltiplas camadas para aumentar a protecção da nave espacial ou da sonda. Materiais refractários ablativos são a solução mais adequada para controlar e canalizar os fluxos térmicos durante a reentrada. Materiais compósitos como carbono fenólico, nylon fenólico e resinas carbono-carbono reforçadas têm sido usados no projecto de escudos térmicos. Por exemplo, no TPS do Space Shuttle era utilizada uma resina carbono-carbono reforçada, um material compósito feito de grafite impregnada com resina. Depois de curado a alta temperatura, o laminado era pirolisado para converter a resina em carvão. O produto resultante era depois impregnado com álcool furfural numa câmara de vácuo, sendo novamente curado e pirolisado para carbonizar o álcool. De modo a aumentar a resistência à oxidação e a sua capacidade de reutilização, as camadas exteriores das resinas carbono-carbono reforçadas são convertidas em carboneto de silício. O revestimento em carboneto de silício protege a matriz carbono-carbono de oxidação.

O escudo térmico do Space Shuttle incluía ainda outros tipos de telhas, nomeadamente com isolamento compósito fibroso refractário e materiais de fibras de vidro de sílica pura (e.g., LI-900). Alguns materiais incluem uma cobertura de vidro curado à base de sílica e óxido de alumínio. O escudo da sonda Huygens incluía um escudo

frontal feito de uma estrutura em sanduíche composta por uma estrutura de alumínio em favo de mel e uma cobertura em plástico reforçado com fibra de carbono, bem como duas protecções térmicas ablativas. O escudo frontal incluía um feltro feito com fibras curtas reforçadas com resina fenólica (e.g. AQ60/I). Essas telhas eram ligadas à estrutura e unidas com cola de silicone. Outros materiais, nomeadamente carboneto de silício e Calcarb®, têm sido utilizados para investigar a radiação através da superfície do TPS submetido a altas temperaturas. Este último é um material feito de fibras de carbono curtas, interligadas numa matriz produzida por carbonização de resina fenólica. Um outro compósito frequentemente utilizado em aplicações espaciais, nomeadamente em escudos térmicos, é a cortiça P50. Este compósito celular combina alto teor de cortiça (geralmente acima de 70%) com um termoendurecedor (resina fenólica termoendurecida com plastificador poliol) para produzir um material com elevada capacidade isolante. Embora possuindo propriedades mecânicas e térmicas claramente diferentes, estes materiais são maus condutores eléctricos, permitindo uma avaliação operacional da sua polarizabilidade e propriedades dieléctricas.

Existem várias técnicas adequadas à medição de propriedades dieléctricas de materiais. A técnica MI permite a medição da parte real e imaginária da constante dieléctrica. Uma corrente sinusoidal de amplitude constante, I , e frequência angular ω , é injectada entre dois eléctrodos transmissores, Tx1 e Tx2, induzindo uma tensão, V , entre dois eléctrodos receptores, Rx1 e Rx2. A razão complexa V/I é a MI do conjunto. A Figura 1 apresenta um esboço da técnica de medição de MI.

Se A_0 e ϕ_0 forem a amplitude e fase do estímulo no vazio e A e ϕ num dado meio homogéneo, a permitividade relativa e condutividade do meio são dadas, respectivamente, por

$$\varepsilon = \frac{A_o}{A} \cos(\varphi - \varphi_o) \quad (01)$$

e

$$\sigma = \frac{A_o}{A} \omega \varepsilon_o \sin(\varphi - \varphi_o), \quad (02)$$

onde ε_o é a permissividade do vazio.

As Equações (01-02) são aplicáveis quando as fontes de corrente e tensão são perfeitas. Utilização das Equações (01-02) requer que as seguintes condições sejam cumpridas: (i) a separação entre eléctrodos é muito maior que o seu tamanho; (ii) o comprimento de onda do sinal injectado é muito maior que o tamanho do conjunto; (iii) o meio é homogéneo; (iv) a impedância do gerador de corrente e pre-amplificadores é infinita; e (v) a calibração do sensor num ambiente de referência é conhecida. A avaliação das propriedades dieléctricas requer uma análise mais elaborada quando uma ou mais condições não é cumprida. Os instrumentos são normalmente calibrados num meio onde as propriedades dieléctricas são conhecidas, e.g. em ar ou vazio. Os efeitos de polarização nos meios heterogéneos são função não só da composição e temperatura do meio mas também da frequência do estímulo.

Para além da variação com composição e geometria, as propriedades dieléctricas em meios heterogéneos exibem normalmente uma forte dependência com a frequência, podendo ser atribuída às propriedades multifásicas do meio em questão. Um exemplo dessa dependência é o mecanismo de polarização interfacial responsável por um forte aumento da constante dieléctrica a baixas frequências. Este mecanismo é originado pelo processo de acumulação de carga nas interfaces entre duas fases com diferente condutividade e

permitividade, conhecido como efeito de Maxwell-Wagner. Este efeito origina um aumento significativo das propriedades dieléctricas de misturas, nomeadamente em meios estratificados.

A técnica MI foi inicialmente introduzida em geofísica para medir a condutividade eléctrica do solo e da rocha-mãe, bem como na prospecção de petróleo. Esta técnica foi mais tarde generalizada para plasmas espaciais, nomeadamente medições a bordo de satélites nas regiões da ionosfera e magnetosfera. A técnica MI é particularmente importante em estudos de plasmas espaciais devido ao facto de os eléctrodos estarem rodeados por camadas iónicas que, através do fenómeno de blindagem de Debye, modificam a impedância própria do meio em questão. Um quadripolo baseado na técnica MI foi utilizado na sonda Huygens durante a sua descida através da atmosfera de Titã, onde foi medida a condutividade da atmosfera, assim como no solo, em que foram medidas as propriedades dieléctricas do substrato gelado (cf. F. Simões, *Theoretical and experimental studies of electromagnetic resonances in the ionospheric cavities of planets and satellites; instrument and mission perspectives*, PhD Thesis, UPMC, France, 2007, e referências inclusas). Um sensor MI faz parte do módulo de superfície Philae, parte da sonda Rosetta, que tem como destino o cometa Churyumov-Gerasimenko.

Várias patentes desenvolvem a técnica MI e descrevem funções específicas de sensores eléctricos, antenas e outros dispositivos. Embora marginalmente relacionadas com a presente invenção, é importante referir algumas onde esta técnica foi utilizada. A patente JP2003270285 propõe um método inovador com o objectivo de calcular o ponto de falha numa linha de transmissão, instalando para isso terminais eléctricos nos extremos da linha. O método apresenta várias tecnologias para determinar as falhas na

linha, incluindo a técnica IM. A patente CN102590633 apresenta um método para medir a impedância própria e a MI entre dispositivos eléctricos no subsolo. Este método permite avaliar a impedância própria e a MI entre nós correspondentes, de acordo com a relação de reciprocidade entre impedância e admitância. A patente KR20040031297 descreve uma antena que utiliza MI numa unidade compacta de banda múltipla para ser montada em diversos tipos de terminais de comunicação, e.g. sistemas globais de comunicações móveis. Os elementos de radiação apresentam uma combinação complexa de formações condutoras planares e tridimensionais numa estrutura chip multi-camada. A patente US2006192679 descreve um instrumento que indica quando a quantidade de água em plantas é insuficiente; esta invenção está ligada às aplicações mais antigas da técnica MI para medir a resistência de solos. Uma distribuição específica de eléctrodos faz uso desta técnica para determinar a impedância do solo e, indirectamente, inferir a quantidade de humidade. O instrumento é composto por uma estrutura estreita e rígida que pode facilmente ser encaixada num pequeno vaso de plantas.

Sendo a presente invenção particularmente apropriada para monitorizar o desempenho de sondas de reentrada na atmosfera terrestre ou entrada em atmosferas de outros planetas, a discussão das patentes que avaliam a recessão em TPS é importante para contextualização da tecnologia. A patente FR2811018 discute um material ablativo usado para revestir ou isolar parte do motor de um foguete. O material é composto por uma matriz de resina, com reforço de carbono e poliamida aromática. A patente US2011036953 descreve um sistema e um método para integração de instrumentação num TPS. O sistema inclui um corpo principal composto pelo material de protecção térmica, com um ou vários sensores embebidos, e um processador. Os sensores podem incluir

sensores de recessão da camada ablativa, transdutores de pressão, termopares e acelerómetros. Ainda que sensores como termopares e acelerómetros sejam amplamente utilizados e o seu comportamento bem conhecido, a utilização de sensores de recessão é escassa e a tecnologia a eles associada não está formalmente descrita.

Duas patentes, US6590403 e US8069001, descrevem instrumentação para a monitorização da taxa de ablação em TPS. A patente US6590403 descreve um sistema e um método para medir a regressão num material, através de um sensor que compreende um substrato com quatro faixas condutoras e um transmissor de sinal. O sensor utiliza princípios de operação eléctrica e térmica, sendo pelo menos dois elementos condutores do sensor constituídos por materiais com um coeficiente de variação térmica de resistência conhecido. O sensor é usado para medir a recessão de um material, e.g., oxidante e combustível sólido, propelente sólido em mísseis, bocais ablativos e materiais de protecção térmica. A patente US8069001 descreve o sensor de ablação e o método usado na sonda Galileo para avaliar o desempenho do TPS durante a entrada na atmosfera de Júpiter. O sensor eléctrico, embebido no escudo térmico, é designado por detector de ablação e resistência analógico (ARAD). Informação complementar sobre o sensor pode ser encontrado em inúmeras publicações (e.g. *F.S. Milos, Galileo Probe Heat Shield Ablation Experiment, Journal of Spacecraft and Rockets, 34, 705-713, 1997; T. Oishi et al., Current Developments in Future Planetary Probe Sensors for TPS: Heatshield Ablation Detector Adaptation to Mid Density Ablators, Proc. 3rd International Workshop Planetary Probe, ESA SP-607, 2006; F.S. Milos et al., Analysis of Galileo Probe Heatshield Ablation and Temperature Data, Journal of Spacecraft and Rockets, 36, 298-306, 1999*). Um sensor isotérmico monitoriza, durante a reentrada, a temperatura

do escudo em função do tempo e estima a recessão na superfície exterior exposta, através de calibração e modelação numérica. O sensor inclui dois condutores resistivos enrolados helicoidalmente, onde duas extremidades, uma de cada condutor, estão ligadas a uma fonte de corrente constante. As outras duas extremidades estão isoladas electricamente entre si até ao ponto em que, a altas temperaturas, o meio se torna condutor, fechando o circuito. Os condutores do sensor tornam-se mais pequenos com o decorrer do processo ablativo e a redução de resistência no circuito é monitorizada continuamente. A resistência dos condutores é proporcional ao seu comprimento e, conseqüentemente, variações no tamanho do condutor originam variações na tensão do circuito. Termopares e dispositivos piezoeléctricos são utilizados para verificar a consistência das medições relativamente à temperatura. De entre as aplicações e métodos discutidos acima, a patente US8069001 apresenta o conceito mais aproximado ao descrito na presente invenção.

As soluções apresentadas na presente invenção para medir a recessão da camada ablativa em TPS durante entrada ou reentrada atmosférica devem observar vários requisitos: (i) monitorização autónoma e em tempo real; (ii) capacidade de operação remota e de aplicação não intrusiva; (iii) conformidade com os requisitos da missão espacial como massa reduzida, baixa potência e alta radiação; (iv) imunidade a elevados gradientes térmicos e a interferência electromagnética; (v) fácil adaptação e instalação em diferentes geometrias de escudo térmico; (vi) capacidade de caracterizar a ablação bem como o plasma envolvente; e (vii) sensibilidade de alguns milímetros para um escudo com espessura de, pelo menos, dez centímetros e resolução temporal melhor que um segundo. A técnica descrita na patente US8069001 (resistências embebidos no material

ablativo) cumpre alguns destes requisitos. No entanto, o sensor é intrusivo e não é facilmente adaptável a diferentes geometrias de escudo térmico. A presente invenção cumpre os requisitos acima descritos e, além disso, a sua precisão pode ser melhorada. Ao contrário da medição de impedância, a técnica MI não é necessariamente intrusiva e varrimentos em frequência garantem informação complementar que pode proporcionar um aumento da exactidão do sistema.

Descrição das Figuras

Os aspectos precedentes e as vantagens esperadas da presente invenção são descritas resumidamente e acompanham a descrição detalhada. De forma a melhorar a legibilidade do método e sistema propostos, explicado na descrição, são incluídas as seguintes figuras:

A Figura 1 ilustra o princípio MI com dois transmissores ($Tx1$ e $Tx2$). Um sinal de frequência (ω), amplitude (A_{Tx}) e fase (ϕ_{Tx}) conhecidas é injectado no meio e a perturbação correspondente (A_{Rx} e ϕ_{Rx}) é medida em dois receptores ($Rx1$ e $Rx2$).

A Figura 2 descreve uma localização dos eléctrodos do sensor no escudo de uma sonda de reentrada.

A Figura 3 esboça os três módulos e os elementos mais importantes do sensor.

A Figura 4 ilustra uma distribuição típica de eléctrodos na superfície do TPS.

A Figura 5 mostra a amplitude e a fase de um sinal medido a 1 kHz em função da espessura de uma pilha de material P50, para duas configurações (em cima - eléctrodos pequenos: $L \times W \times H \times G = 17 \times 3 \times 1 \times 7$ mm; em baixo - eléctrodos grandes: $L \times W \times H \times G = 48 \times 8 \times 1 \times 12$ mm).

A Figura 6 representa a fase e a amplitude medidas durante a pirólise de uma placa de P50 com 10 mm de espessura às frequências de 1, 5 e 10 kHz.

A Figura 7 mostra o sinal MI com 1 kHz em função da espessura de uma pilha de material P50.

A Figura 8 representa valores medidos (esquerda e meio) e calculados (direita) da amplitude e fase do sinal a 1 e 10 kHz, onde as linhas finas e grossas representam resultados numéricos com e sem equipotencial na frente do escudo, respectivamente.

Descrição Sumária da Invenção

A tecnologia referente a TPS é utilizada em veículos espaciais de alta velocidade durante reentrada atmosférica ou em sondas planetárias. A modelação de fenómenos aerotermodinâmicos é essencial para avaliar a ablação no escudo térmico. Reacções químicas envolvendo diferentes variações de entalpia e transição de fase tornam os modelos mais complexos. O carbono, e.g. sob a forma de grafite, é o material mais simples utilizado para investigar processos ablativos. Os materiais de TPS são normalmente compósitos reforçados com resina orgânica. A pirólise da resina produz gases que penetram através da superfície em ablação e são injectados no escoamento exterior. Os modelos prevêem geralmente uma recessão do escudo térmico em cerca de 2,5 mm, mas a camada afectada pode ser consideravelmente maior. Assim sendo, a resolução dos sensores para estimar a espessura da camada recessiva deve ser de, pelo menos, 1 mm.

A permitividade relativa caracteriza a capacidade de um material acumular carga, e a susceptibilidade eléctrica é uma medida da facilidade do meio se polarizar em resposta a

campos eléctricos. Quando um campo eléctrico é aplicado, a energia potencial das orientações alinhadas a favor do campo é reduzida enquanto a energia das orientações alinhadas em oposição ao campo aumenta. Transições de fase conduzem normalmente a descontinuidades da permitividade e da condutividade de materiais refractários; este efeito é particularmente visível a baixas frequências onde a energia livre, a dinâmica molecular e os fenómenos de interface desempenham um papel importante. Por esta razão, são seleccionadas frequências na gama ELF (Extremely Low Frequency) e VLF (Very Low Frequency).

A permitividade relativa é definida como a razão entre a quantidade de energia eléctrica armazenada num material por aplicação de uma tensão e a energia armazenada em vazio; da mesma forma, pode ser vista como a razão entre a capacitância de um condensador utilizando esse material como dieléctrico e a capacitância de um condensador igual utilizando vácuo como dieléctrico. A permitividade pode ser uma função de múltiplos parâmetros, onde os mais importantes são a composição do meio e a frequência do estímulo. Adicionalmente, temperatura e fenómenos associados a transição de fase determinam também as propriedades dieléctricas de vários materiais. Os fenómenos aerotermodinâmicos na superfície do escudo provocam a ablação da camada e induzem correntes no meio. Além disso, efeitos de temperatura afectam também os mecanismos de polarização do material. Esses efeitos modificam consideravelmente as propriedades dieléctricas do TPS.

Em espectroscopia dieléctrica, as contribuições dependentes da frequência para a resposta dieléctrica, principalmente a baixas frequências, podem ser originadas devido a acumulação de carga. Este efeito é conhecido como polarização de Maxwell-Wagner e ocorre tanto na camada dieléctrica da fronteira interior, à escala mesoscópica,

como no exterior da interface eléctrodo-meio, à escala macroscópica. Em meios heterogéneos, podem formar-se camadas eléctricas duplas na superfície. Uma dupla camada resulta da atracção de iões carregados opostamente numa superfície. Os efeitos contra-íão ocorrem também na superfície ou vizinhança de TPS. Estes efeitos são preponderantes a baixas frequências, em meios com perdas elevadas, quando ocorre ablação e o escudo térmico está envolvido em plasma. As propriedades dieléctricas dependem não só do campo eléctrico instantâneo, mas também da evolução deste no passado, devido a histerese. Nos sistemas naturais, histerese está geralmente associada a modificações termodinâmicas irreversíveis. Modelos analíticos e numéricos são úteis para auxiliar a calibração do instrumento. Por outro lado, o problema inverso pode ser resolvido de forma simples, para determinar as propriedades dieléctricas que melhor se adequam à distribuição de potencial medido. Quando a aproximação electrostática é aplicável, e.g. na gama de frequências ELF-VLF, a equação de Poisson pode ser usada para calcular a distribuição de potencial eléctrico.

A arquitectura do sensor compreende módulos analógico, digital e de software. O módulo analógico inclui geração de formas de onda na gama ELF-VLF. A forma de onda e o sinal modificado associado são injectados no meio através de um par de transmissores, formando um dipolo eléctrico. O módulo digital inclui o sistema de aquisição de dados, executando os comandos entre os módulos analógico e de software, sendo utilizado para processamento de sinal bem como análise e transmissão de dados. O processamento de sinal pode ser incluído no sensor ou realizado posteriormente. O algoritmo numérico básico utilizado para auxiliar a análise é a tradicional transformada rápida de Fourier (FFT) combinada com técnicas de filtragem. Técnicas

no domínio temporal, como por exemplo o algoritmo de ajuste de onda sinusoidal (sine-fitting), podem também ser utilizadas. Para a técnica MI, onde ambos os sinais de transmissão e recepção podem ser medidos, pode ser utilizado um algoritmo sine-fitting de sete parâmetros, que calcula a amplitude, fase e componente DC dos dois sinais bem como a frequência comum. A selecção da arquitectura dos eléctrodos deve ter em consideração vários requisitos, por vezes concorrentes. O tamanho dos eléctrodos deve ser definido de acordo com a sensibilidade do sensor; numa primeira abordagem, a sensibilidade com a profundidade é similar à distância de separação entre eléctrodos, por exemplo dos transmissores. Os eléctrodos podem ser fixos à parte traseira do escudo por meio de cola epóxi com boas propriedades dieléctricas. Sem perda de generalidade, a Figura 2 mostra a localização dos eléctrodos de um sensor MI num escudo de uma sonda de reentrada. A cablagem é importante para assegurar a optimização do desempenho dos eléctrodos, nomeadamente minimizando capacitâncias parasita indesejadas e efeito de antena. A avaliação do desempenho e precisão dos instrumentos envolve um procedimento com várias etapas, visando a calibração dos sensores. Depois, é preciso determinar o desempenho do sensor em vácuo e quando o sensor está fixo ao TPS. A selecção dos eléctrodos é importante para não só estimar condições de radiação de dipolo mas também definir sensibilidade do sensor. De forma a oferecer resultados relevantes, a calibração envolve quatro passos: (i) conversão dos parâmetros eléctricos medidos no ar ou em vácuo em parâmetros físicos; (ii) medição das propriedades dieléctricas num meio homogéneo; (iii) avaliação dos efeitos de temperatura e ablativos nas propriedades dieléctricas do TPS; e (iv) quantificação da recessão do escudo.

De acordo com medições realizadas com o presente sistema, campos magnéticos e eléctricos DC externos não influenciam de forma significativo a sensibilidade e precisão do sistema. A sensibilidade do sensor varia em função da espessura do escudo e da distância entre os eléctrodos. A precisão do sensor varia não só com as propriedades do meio mas é também função da distância entre os eléctrodos e da frequência do estímulo. O ambiente exterior, nomeadamente a densidade e temperatura do plasma, podem também afectar o desempenho do sensor.

O sistema divulgado nesta invenção contribui para monitorizar o processo ablativo que ocorre em naves espaciais, nomeadamente em veículos tripulados ou sondas de reentrada. Para além de auxiliar a monitorização das variações de espessura do escudo, este sensor eléctrico pode ser útil para investigar a interacção entre o material ablativo e o ambiente circundante, nomeadamente o escoamento hipersónico.

Descrição Pormenorizada da Invenção

O TPS ablativo é utilizado em naves espaciais de reentrada em regime hipersónico. É necessário modelar os processos aerotermodinâmicos para estimar a taxa de recessão da camada frontal. Os modelos analíticos e numéricos envolvem normalmente dinâmica de fluídos e transferência de calor bem como processos químicos/cinéticos associados à composição tanto do escudo como do ambiente circundante. Ablação termoquímica é o modelo mais geralmente aplicado. Reacções químicas envolvendo diferentes entalpias e mudanças de fase ocorrem na parede do escudo. Carbono e compostos baseados em carbono são os materiais mais simples e frequentemente utilizados para estudar processos ablativos. Na atmosfera terrestre a ablação de materiais

carbonáceos produz principalmente óxidos e nitretos de carbono. Oxidação, nitrificação e sublimação são processos comuns que ocorrem no escudo frontal. Materiais de TPS não carbonizáveis num ambiente de aquecimento hipersónico, nomeadamente carbono-carbono e sílica, perdem massa apenas por ablação e fusão. A avaliação cinética da reacção envolve vários processos, nomeadamente de adsorção e dessorção, e mecanismos de Eley-Rideal e de Langmuir-Hinshelwood. A maioria dos modelos permanece muito rudimentar, pelo que medições como aquelas aqui propostas são uma mais valia para ajudar a refinar modelos aerotermodinâmicos.

Os modelos cinéticos incluem frequentemente ionização, dissociação, relaxação vibracional, acoplamento vibracional-dissociação e reacções de troca. Para avaliação das propriedades de transporte, as equações químicas da cinética de vibração, juntamente com as equações de conservação, devem ser resolvidas segundo a aproximação Navier-Stokes de um gás viscoso termicamente condutor. Materiais TPS ablativos são frequentemente compósitos à base de resina orgânica. Esses materiais podem acomodar altas taxas de aquecimento e cargas de calor através de diferentes mecanismos. Pirólise de resina produz gases que sofrem percolação em direcção à superfície aquecida e são injectados no fluxo externo. Estes dois processos participam na protecção térmica. As reacções de pirólise são geralmente endotérmicas e, assim, absorvem a carga calorífica. Além disso, os gases de pirólise são aquecidos à medida que se infiltram através dos poros do material, transferindo alguma energia do estado sólido para o gasoso e para o fluxo externo. Normalmente é realizado um cálculo que combina convecção, radiação e ablação ao longo de uma variedade de trajectórias de reentrada. Como mencionado acima, a recessão prevista, até uma velocidade de 6 km s^{-1} ,

é cerca de 2,5 mm, mas a profundidade até à qual as propriedades do escudo são afectadas pode ser significativamente maior.

A permitividade caracteriza a capacidade de um material em armazenar carga. Vários mecanismos de polarização podem ocorrer em materiais dieléctricos, nomeadamente electrónicos, de orientação/dipolares, iónicos, e de polarização interfacial. Polarização electrónica e atómica ocorre a nível atómico. Mecanismos de polarização dipolar são gerados por moléculas com momentos dipolares permanentes, e ocorrem na banda de infravermelhos e a frequências mais baixas. Os mecanismos de polarização interfacial são importantes a muito baixas frequências, surgindo quando são envolvidas múltiplas fases ou interfaces. Uma vez que as propriedades dieléctricas dos materiais são geradas por dipolos permanentes ou induzidos, os modos de rotação e vibração desempenham um papel fundamental na polarização do meio. Transições de fase levam normalmente a descontinuidades na permitividade e condutividade dos materiais; água nos estados sólido, líquido e gasoso representa um exemplo claro em que a transição de fase conduz à descontinuidade da permitividade e da condutividade eléctrica. Este efeito é particularmente notório a baixas frequências, onde os fenómenos de interface e dinâmica molecular desempenham um papel importante. A selecção de frequência é fundamentada de acordo com vários efeitos concorrentes: (i) em teoria, a permitividade decresce com o aumento de frequência, logo frequências mais baixas oferecem melhor sensibilidade; (ii) o ruído do sinal diminui com o aumento de frequência, pelo que frequências mais altas são preferíveis; (iii) interferência das linhas de energia eléctrica aumenta na gama ELF, principalmente abaixo de 100 Hz; e (iv) a sequência de operações durante reentrada é uma função do

tempo necessário para cada medição, tornando preferíveis frequências mais altas. A banda apropriada da frequência de operação resulta do compromisso destes factores antagónicos.

As Equações (01) e (02) são válidas quando o meio é homogéneo, mas não estritamente aplicáveis à arquitectura presente porque os eléctrodos são ligados à superfície do escudo e o TPS é heterogéneo. Além disso, os processos ablativos que ocorrem durante a entrada na atmosfera alteram as propriedades dieléctricas do material do escudo frontal. Por um lado, fenómenos aerotermodinâmicos na superfície do escudo ionizam a estrutura e induzem correntes no material. Por outro lado, a temperatura também afecta consideravelmente os mecanismos de polarização. Embora sugerindo uma variabilidade muito mais forte das propriedades dieléctricas, a manifestação de processos termodinâmicos e de plasma melhora a resposta do TPS à variabilidade eléctrica, o que é vantajoso para análise dinâmica de escudos a partir de medidas dos sensores eléctricos.

A nível microscópico, as propriedades eléctricas mais básicas dos materiais são definidas através de dois parâmetros físicos: permitividade e condutividade. A razão entre estes dois parâmetros resulta no tempo de relaxação e indica o tempo de propagação do excesso de portadores de carga livres nos materiais. Em espectroscopia dieléctrica, a acumulação de carga (efeito de Maxwell-Wagner), contribui para a resposta dieléctrica, principalmente a baixas frequências. O efeito de Maxwell-Wagner está relacionado com a carga de interface que ocorre em materiais electricamente heterogéneos, principalmente na gama ELF-VLF, induzindo grande permitividade eléctrica aparente. Para algumas misturas as camadas eléctricas duplas também existem na superfície de um dos componentes. Uma camada

dupla resulta da atracção de iões carregados opostamente por uma superfície carregada. Este mecanismo é totalmente diferente do efeito Maxwell-Wagner; está relacionado com fenómenos de interface em vez de propriedades volumétricas. Em camadas eléctricas duplas o fenómeno de contra-ião também é um mecanismo importante para caracterizar as propriedades dieléctricas a baixas frequências. Uma camada eléctrica dupla é a estrutura que surge na superfície de um objecto exposto a um fluido. As camadas eléctricas duplas são análogas à camada dupla que surge em plasmas, consistindo em duas camadas duplas dispostas paralelamente com cargas eléctricas opostas. Existem diversos mecanismos de formação de camada dupla, entre eles a diferença de potencial, força ponderomotriz, contacto entre plasmas diferentes e expansão de plasma ao longo de linhas de campo magnético. Um contra-ião é um ião que acompanha uma espécie iónica para manter a neutralidade eléctrica, por exemplo um ião com uma carga oposta à de uma substância à qual está associado. Este efeito é preponderante a baixa frequência em meios com grandes perdas, tal como quando ocorre ablação num TPS envolto em plasma. A camada eléctrica dupla é frequentemente modelada a partir de partículas carregadas com uma camada imóvel de contra-íons absorvidos e gradiente de concentração de iões numa camada difusora. Um modelo para calcular o gradiente da potência poderá ser derivado através da lei de Fick. Histerese pode ocorrer tanto em materiais ferromagnéticos como em ferroeléctricos, em função do seu estado actual ou passado. Em alguns casos, a histerese está relacionada com alterações termodinâmicas irreversíveis.

Modelos analíticos e numéricos são úteis para auxiliar a calibração de instrumentação. Para distribuições simples, pode recorrer-se a soluções analíticas através do método de carga-imagem para estimar geometria simples de eléctrodos.

No entanto, métodos numéricos são necessários para aferir configurações arbitrárias em meios heterogéneos. O problema inverso pode ser resolvido para determinar características dieléctricas que melhor se adequam à distribuição de potencial medida. No caso de a aproximação electroestática ser aplicável, por exemplo quando a frequência dos estímulos é muito baixa e as correntes podem ser negligenciadas, a equação de Poisson pode ser utilizada para simular a distribuição de potencial eléctrico,

$$\nabla \cdot \{\epsilon_r(r) \nabla V(r)\} = -\frac{\rho(r)}{\epsilon_0} \quad (03)$$

em que r é a variável espacial, V é o potencial eléctrico e ρ é a densidade de carga.

Frequentemente, as perdas no meio são tidas em conta e a constante dieléctrica relativa é escrita na forma complexa ($\epsilon_r = \epsilon'_r + i \epsilon''_r$). Condições de fronteira de Dirichlet são impostas nos transmissores. O problema inverso pode ser resolvido para determinar as propriedades dieléctricas que melhor se adequam à distribuição do potencial medido. Algoritmos que podem ser aplicados para resolver a Equação (3) de forma iterativa para determinar as gamas de amplitude e fase que melhor se adequam aos dados a medir pelo sensor. Numa primeira aproximação, o plasma produzido na superfície de protecção tem condutividade infinita e assumem-se propriedades dieléctricas do meio independentes da temperatura. Isto equivale a considerar um potencial flutuante na superfície do TPS. Esta simplificação é muito vantajosa porque assim o processo ablativo pode ser desprezado no modelo, fornecendo soluções práticas. Os efeitos mencionados são importantes, por exemplo, quando os eléctrodos estão agarrados na superfície. Os eléctrodos são presos, por exemplo colados, à superfície interna do TPS. Esta é a melhor forma de ligar o sensor ao TPS dado que é

uma solução não-invasiva. Uma solução não-invasiva é preferível porque não põe em causa a integridade estrutural do TPS e o sensor é mais fácil de aplicar no escudo térmico. Caso necessário, o sensor pode ser envolvido numa película fina para o proteger termicamente. Por exemplo, aerogel de sílica é adequado porque a sua condutividade eléctrica, bem como térmica, é muito baixa.

A arquitectura do sensor é constituída pelo módulo analógico, digital e software (Figura 3). O módulo analógico implementa as seguintes funções fundamentais: (i) conversão de alimentação DC/DC, (ii) gerador de sinal e (iii) condicionamento de sinal necessário para ligar a electrónica aos eléctrodos. O módulo analógico inclui um gerador de ondas ELF-VLF. O passo seguinte é a introdução de um desvio de fase de 180° em relação à forma de onda original (inversor de sinal). Os sinais alterado e original são injectados no meio através de dois transmissores (Tx1 e Tx2), criando um dipolo eléctrico. O sinal diferencial é medido em dois receptores (Rx1 e Rx2), sendo integrado um filtro passa-alto para remover as componentes DC e quase-estática, melhorando o desempenho do sensor. O ruído induzido pela radiação da rede de alimentação eléctrica é atenuado com o auxílio de condensadores colocados perto dos circuitos integrados, para minimizar interferência. O sistema pode ser implementado utilizando cabos coaxiais ou triaxiais. Os cabos coaxiais são utilizados para receber os sinais dos receptores e os triaxiais para enviar os sinais aos transmissores. É recomendado utilizar cabos triaxiais nos casos em que os eléctrodos transmissores sejam constituídos por várias camadas, reduzindo assim capacitâncias parasita induzidas pela blindagem. O módulo digital é composto pela unidade de aquisição de sinal e também pela de análise e transmissão de dados. A interacção entre este módulo e o utilizador é feita através de uma

interface gráfica. A unidade de aquisição de dados converte sinais analógicos em sinais digitais, incluindo funções de controlo, conversores analógico-digital (ADC) e possui também um microprocessador. O processamento de sinal pode ser feito no sensor ou externamente. O módulo responsável pelo software pode ser usado para transmitir dados processados ou por processar.

O algoritmo utilizado para fazer a análise de dados, ou seja, para determinar a amplitude e fase do estímulo, é a tradicional FFT em conjunto com técnicas de cálculo de valores médios. Este algoritmo, baseado em análise do domínio espectral para calcular as amplitudes de corrente e tensão e as fases relativas, emprega a técnica mais utilizada em processamento de sinal. Contudo, existem métodos mais robustos que podem ser utilizados para aumentar a precisão das medições. São métodos que podem ser mais adequados e produzem melhores resultados, mas requerem mais recursos computacionais. Um exemplo disso é o algoritmo de ajuste de onda sinusoidal. Trata-se de um algoritmo que se aplica no domínio temporal e calcula os parâmetros de uma onda sinusoidal (amplitude, fase e frequência). Ao contrário da FFT, os algoritmos de ajuste de onda sinusoidal são imunes ao efeito de spectral leakage e ao ruído, porque funcionam como filtros de banda estreita, ajustando a frequência da onda sinusoidal e ignorando outras perturbações (ruído de harmónicas). Os algoritmos de ajuste de onda sinusoidal podem também ser utilizados em situações em que o ADC está saturado, bastando para tal ignorar a parte saturada. Para medições da impedância, pode recorrer-se ao algoritmo de ajuste de seno com sete parâmetros para calcular a amplitude, fase e frequência da onda sinusoidal e também a componente DC, reduzindo a incerteza dos parâmetros obtidos. Este algoritmo pode ser implementado da seguinte maneira: (i)

determinar a frequência do sinal do canal com maior amplitude através da interpolação do método da transformada discreta de Fourier; (ii) calcular a amplitude e fase dos sinais; (iii) determinar o vector dos sete parâmetros recorrendo ao método dos mínimos quadrados; (iv) obter a variação de frequência para calcular as correcções de frequência; e (v) se a correcção de frequência estiver acima de uma condição limite, repetir o ciclo até o algoritmo convergir.

A selecção da arquitectura dos eléctrodos deve ter em conta diversos requisitos, por vezes concorrentes. Em primeiro lugar, os eléctrodos devem ser simples, leves e robustos. Segundo, o tamanho dos eléctrodos deve ser ajustado de acordo com a sensibilidade do sensor; numa primeira aproximação, o alcance de espessura do sensor é proporcional à distância entre os eléctrodos. Terceiro, uma configuração linear apresenta a distribuição mais indicada para os eléctrodos, mas com simetria axial torna-se mais fácil de modelar. Quarto, os eléctrodos com capacitâncias maiores estão mais imunes a interferência de cablagem, mas despendem mais energia. Por fim, os eléctrodos podem ser constituídos por uma ou mais camadas de materiais com elevada condutividade. Os eléctrodos devem permitir uma fixação efectiva à superfície interior do TPS, podendo ser fixados ao escudo térmico utilizando cola epóxi com boas propriedades dieléctricas (por exemplo, Araldite® 2004 qualificada para aplicações espaciais: resina AV138M e endurecedor HV998). A Figura 4 apresenta a configuração de eléctrodos mais recomendável. Cada eléctrodo é composto por uma ou mais camadas e um material condutivo pouco espesso. No caso de ter apenas uma camada, o eléctrodo pode ser fixado ou depositado na superfície do escudo térmico. Os eléctrodos podem ser pintados directamente na superfície do escudo com uma tinta líquida condutiva (por exemplo,

solução aquosa de prata coloidal da Pelco®, com 60% de prata). O processo de fabrico consiste em sobrepor uma máscara com a forma dos eléctrodos sobre a superfície e depois pintar com spray ou um pincel. A aplicação da tinta é muito simples e algumas soluções secam à temperatura ambiente. Outra opção é produzir os eléctrodos recorrendo a tecnologia de filmes finos, e.g. deposição física ou química de vapor. As configurações multicamada também podem ser fabricadas através destas técnicas: uma sanduíche de duas camadas condutoras com um material dieléctrico no meio. Esta solução assegura uma redução do ruído, principalmente no lado dos transmissores, porque ambas as camadas estão polarizadas ao mesmo potencial, reduzindo dessa forma o acoplamento com os cabos.

A cablagem é importante para assegurar a optimização do desempenho dos eléctrodos, nomeadamente na minimização de capacitâncias parasitas indesejáveis e efeitos de antena. As soluções mais comuns para transporte de sinais electromagnéticos de baixa frequência envolvem a utilização de cabos coaxiais ou triaxiais. Ao contrário dos coaxiais, os cabos triaxiais possuem uma camada adicional de isolamento e uma segunda bainha condutora de blindagem para fornecer maior largura de banda e rejeição de interferência externa. Cabos triaxiais podem ser usados em inúmeras aplicações coaxiais, oferecendo melhor blindagem para cabos longos. A bainha condutora exterior envolve o cabo coaxial interior e acrescenta protecção electromagnética adicional. O núcleo condutor e a blindagem interior são mantidos ao mesmo potencial, pelo que, para efeitos práticos, a corrente de fuga entre os mesmos é nula. Em vez disso, as correntes de fuga ocorrem entre as blindagens interior e exterior. Uma vez que o núcleo condutor é ligado ao eléctrodo relevante (aquele a ser medido), soluções triaxiais são adequadas à invenção apresentada; a blindagem

interior assegura que a radiação do cabo e capacitâncias espúrias não afectam as medições.

A avaliação de desempenho e precisão do instrumento envolve um procedimento com múltiplas fases de calibração. Em primeiro lugar, é necessário avaliar as características eléctricas, nomeadamente do módulo analógico. Resistências e condensadores de referência são usados em substituição dos eléctrodos e cablagem, para caracterizar o desempenho dos circuitos analógicos. Seguidamente, é necessário determinar o desempenho do sensor em vácuo e quando fisicamente ligado ao TPS. Finalmente, o sensor tem de ser calibrado em condições representativas de ablação. A caracterização do módulo analógico requer a medição da amplitude e fase entre os sinais transmitidos e recebidos, validação das funções de transferência para estabelecimento de variações com a frequência, e avaliação de capacitâncias parasita introduzidas pelos fios de ligação. A última fase é pertinente quando se usam cabos longos na ligação entre a electrónica analógica e os eléctrodos; cablagem triaxial é recomendada nestas situações. A selecção dos eléctrodos é importante não só na definição da sensibilidade do sensor mas também na estimação das condições de radiação dipolar. Idealmente, a unidade digital não modifica a amplitude e fase do sinal. Após a caracterização de desempenho da electrónica é importante adquirir medições em meios bem conhecidos. Inicialmente, os eléctrodos são fixados a uma pilha de diversas camadas de cortiça, cada uma com espessura de ~1 mm (e.g. compósito baseado em cortiça frequentemente usado na investigação de processos ablativos e protecção de veículos de reentrada). O número de camadas é variável de forma a determinar a sensibilidade do sensor em função da espessura total da pilha de cortiça (Figura 5). Num passo subsequente, a pilha de cortiça é queimada de forma a avaliar os processos ablativos e o efeito da

temperatura nas propriedades eléctricas do meio (Figura 6). Finalmente, um meio mais representativo (e.g. ablador fenólico de carbono impregnado usado pela NASA ou um equivalente usado pela ESA, conhecido por ASTERM STD) deve ser usado para fornecer medições mais fiáveis em condições representativas, preferencialmente considerando processos ablativos conhecidos.

A análise de dados requer uma correcta calibração do instrumento. A exploração de dados científicos depende de uma precisa calibração dos sinais eléctricos, nomeadamente o relacionamento entre variação de amplitude e fase com os parâmetros físicos, tais como espessura do meio e temperatura. A calibração dos dados também necessita da conversão dos sinais eléctricos em parâmetros físicos, i.e., permitividade e condutividade. Para extrair resultados representativos, a calibração assenta em quatro passos chave: (i) conversão dos parâmetros eléctricos em parâmetros físicos em vácuo que será usada como referência; (ii) medição das propriedades dieléctricas em meios homogéneos para comparar com as condições de vácuo; (iii) avaliação da temperatura, pirólise e efeitos de percolação nas propriedades dieléctricas do TPS; e (iv) estimação da espessura da camada recessiva. A Figura 7 demonstra a precisão do sensor para P50 com profundidade até 50 mm. A barra de erro não excede a diferença entre medições consecutivas, i.e., não existe sobreposição entre barras de erro consecutivas, calculadas para espessuras com passo de 1 mm. De facto, para este material e espessura, a sensibilidade do instrumento pode ser melhor do que 0,5 mm. De acordo com medições realizadas com o sensor, campos eléctricos e magnéticos DC têm um impacto marginal na sensibilidade e precisão do sensor; em condições extremas ($E \sim 500 \text{ V m}^{-1}$ ou $B \sim 10 \text{ mT}$), pequenas variações (E : 0,017 dB e 0,02°; B : 0,015 dB e 0,1°) foram observadas na fase e,

principalmente, na amplitude do sinal do sensor, mas não se espera que estas condições sejam encontradas em aplicações reais na ionosfera e magnetosfera de planetas e no espaço interplanetário. Por exemplo, os campos eléctrico e magnético DC à superfície da Terra são $\sim 100 \text{ V m}^{-1}$ e $\sim 50 \text{ } \mu\text{T}$; na ionosfera e magnetosfera esses valores são muito inferiores. Assim, a influência de campos eléctricos e magnéticos DC podem ser negligenciados para a maioria das aplicações.

A sensibilidade do sensor é uma função da distância entre eléctrodos e a superfície em ablação. A precisão do sensor varia com as propriedades do meio, mas é também uma função da frequência e espessura. O ambiente exterior também pode afectar o desempenho do sensor. Por exemplo, a formação de uma camada de plasma na superfície do meio ablativo afecta as medições do sensor. A Figura 8 mostra a variação do sinal medido pelo sensor, em função da espessura, quando uma superfície equipotencial é aplicada na superfície frontal do TPS. Os gráficos apresentam a amplitude e fase em função da espessura de uma simples camada de P50, comparativamente com uma camada de P50 e uma superfície equipotencial no topo. O modelo numérico e os resultados experimentais mostram que a presença de uma camada condutora na superfície do escudo térmico modifica a resposta do sensor. Este resultado é particularmente importante, dado que o plasma pode ter um efeito semelhante na superfície do escudo térmico. O problema é substancialmente mais complexo quando, além da camada equipotencial, ocorre também a recessão da superfície. Na Figura 8 confirma-se que a variação da amplitude e fase não é negligenciável quando o escudo térmico é sujeito a uma superfície equipotencial. Como esperado, a diferença reduz-se com o aumento da espessura, e a superfície equipotencial atenua a amplitude do sinal na gama ELF-VLF. As

descontinuidades observadas nas medições devem-se à substituição de diversas camadas finas de P50 por uma simples camada de espessura idêntica, confirmando a influência da estratificação do meio e interfaces em medições de MI.

Esta invenção é particularmente adequada à monitorização de processos ablativos que ocorrem no TPS de naves espaciais, nomeadamente veículos tripulados durante a entrada na atmosfera terrestre ou outros ambientes planetários. Adicionalmente, além de auxiliar na monitorização da variação de espessura do escudo térmico, o sensor eléctrico pode usar-se na investigação da interacção entre o material ablativo e o plasma envolvente.

9 de Setembro de 2013

Reivindicações

1ª. Um método baseado na técnica de impedância mútua para medição de propriedades dieléctricas, avaliação de interacção radiação-matéria, monitorização de processos de ablação e estimação de variação de espessura do escudo de sistemas de protecção térmica de veículos espaciais, sendo o método caracterizado por: selecção de um conjunto de eléctrodos - designado matriz de eléctrodos - para definir padrões de radiação de dipolo eléctrico oscilante; escolha de características de um sinal eléctrico - designado estímulo - o qual é injectado no escudo do sistema de protecção térmica; selecção de módulos analógico e digital para aquisição, acondicionamento e processamento do sinal injectado; definição de módulo de software para controlar os módulos analógico e digital, para adquirir e processar o estímulo eléctrico, bem como para analisar e transferir dados.

2ª. Método de acordo com a reivindicação nº 1, caracterizado por: selecção de amplitude e banda de frequência apropriadas para otimizar a resposta das propriedades dieléctricas do escudo do sistema de protecção térmica e do ambiente circundante, e.g. plasma ionosférico; escolha de configuração de matriz de eléctrodos que inclua dipolos emissores e receptores para monitorização rigorosa da variação de espessura do sistema de protecção térmica; selecção de cabos coaxiais e triaxiais que ligam o módulo analógico aos receptores (Rx) e emissores (Tx), respectivamente, os quais possuem comprimento, capacitância, largura de banda e rejeição de interferência apropriados; escolha de algoritmos de processamento de sinal adequados ao cálculo de características da forma de onda medida nos receptores.

3ª. Um sistema baseado na técnica de impedância mútua para medição de propriedades dieléctricas e estimação de variações de espessura do escudo de sistemas de protecção térmica de veículos espaciais, bem como avaliação da interacção entre matéria e radiação no ambiente envolvente, caracterizado por: um módulo analógico; um módulo digital; um módulo de software com interface gráfica.

4ª. Sistema de acordo com a reivindicação nº 3, caracterizado por o módulo analógico incluir uma fonte de alimentação, um gerador de onda, um elemento de acondicionamento de sinal e eléctrodos.

5ª. Sistema de acordo com a reivindicação nº 3, caracterizado por o módulo digital incluir elementos de controlo, aquisição de sinal e conversão analógico-digital.

6ª. Sistema de acordo com a reivindicação nº 3, caracterizado por o módulo de software com interface gráfica incluir elementos de processamento de sinal, interface gráfica do utilizador e telemetria.

7ª. Sistema de acordo com as reivindicações nº 3 e 4, caracterizado por a forma de onda ser sinusoidal, quadrada, ou de outra forma apropriada, e a amplitude e intervalo de frequência serem seleccionados de acordo com as condutividades térmica e eléctrica do material do sistema de protecção térmica, assegurando uma razão sinal-ruído adequada nos receptores.

8ª. Sistema de acordo com as reivindicações nº 3 e 4, caracterizado por a matriz de eléctrodos incluir pelo menos um par de emissores e um par de receptores, ligados no módulo analógico através de cabos triaxiais e coaxiais,

respectivamente, ordenados segundo configuração linear, com simetria axial ou outra que garanta máxima sensibilidade a uma profundidade designada.

9ª. Sistema de acordo com as reivindicações nº 3, 4 e 8, caracterizado por os eléctrodos receptores serem feitos de uma camada condutora fina, e os emissores incluírem duas camadas condutoras ligadas ao mesmo potencial, com um dieléctrico fino no meio, onde fino significa que a espessura do eléctrodo é muito inferior ao seu comprimento e largura.

10ª. Sistema de acordo com as reivindicações nº 3, 4, 8 e 9, caracterizado por os eléctrodos estarem presos à face traseira do sistema de protecção térmica através de uma cola dieléctrica resistente ao calor, ou agarrados na superfície através de tecnologia de deposição catódica usada para produzir filmes finos multicamada.

11ª. Sistema de acordo com as reivindicações nº 3, 4, e 10, caracterizado por os eléctrodos estarem termicamente desacoplados do escudo térmico através de uma camada isolante de aerogel de sílica, ou outro material com propriedades similares, incluindo baixa condutividade térmica, baixa condutividade eléctrica e baixa permitividade.

12ª. Sistema de acordo com as reivindicações nº 3, 4, 6 e 7, caracterizado por os cálculos efectuados no módulo de software, relacionados com variação de amplitude e fase do estímulo medido nos receptores, envolverem análise no domínio temporal e de frequência, utilizando transformada rápida de Fourier e algoritmos de ajuste de forma de onda sinusoidal.

13ª. Sistema de acordo com as reivindicações nº 3 até 12, caracterizado por a matriz de eléctrodos e electrónica

operarem na banda de baixa frequência, assegurando uma resolução melhor do que 0,5 mm num escudo com espessura de pelo menos 50 mm, a partir de medições não intrusivas.

9 de Setembro de 2013

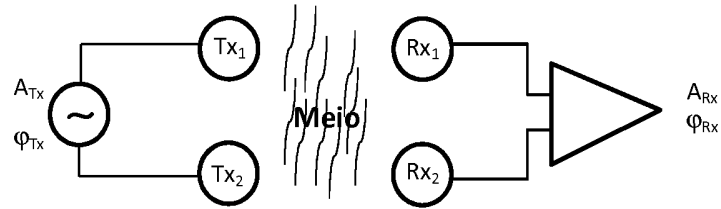


Fig. 1

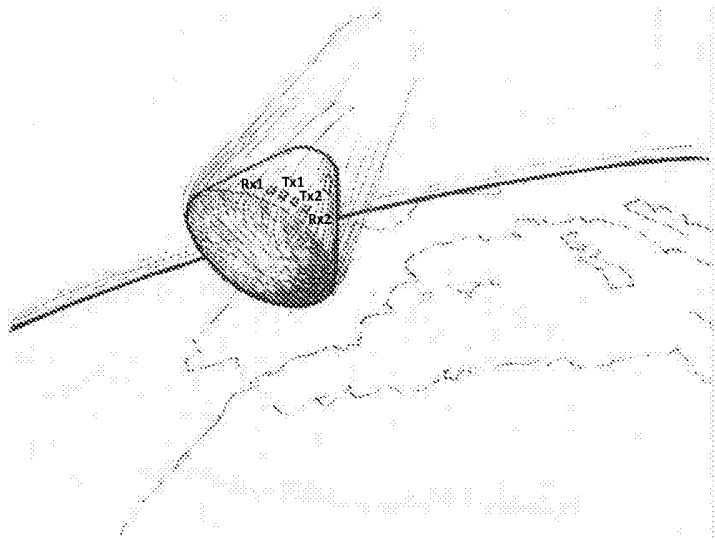


Fig. 2

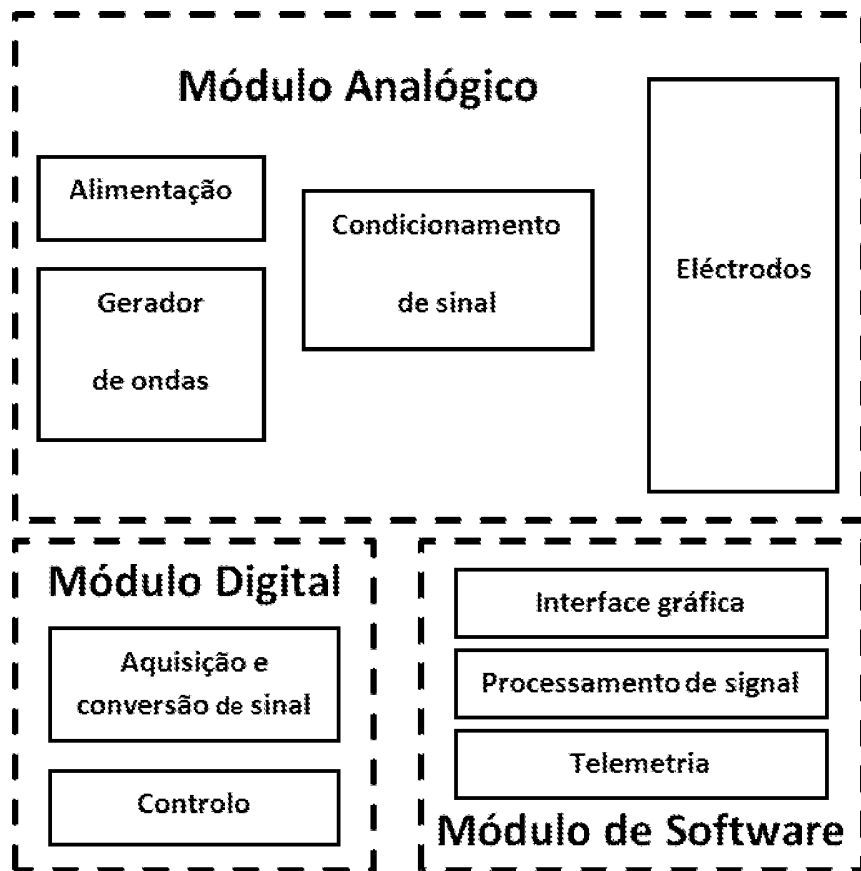


Fig. 3

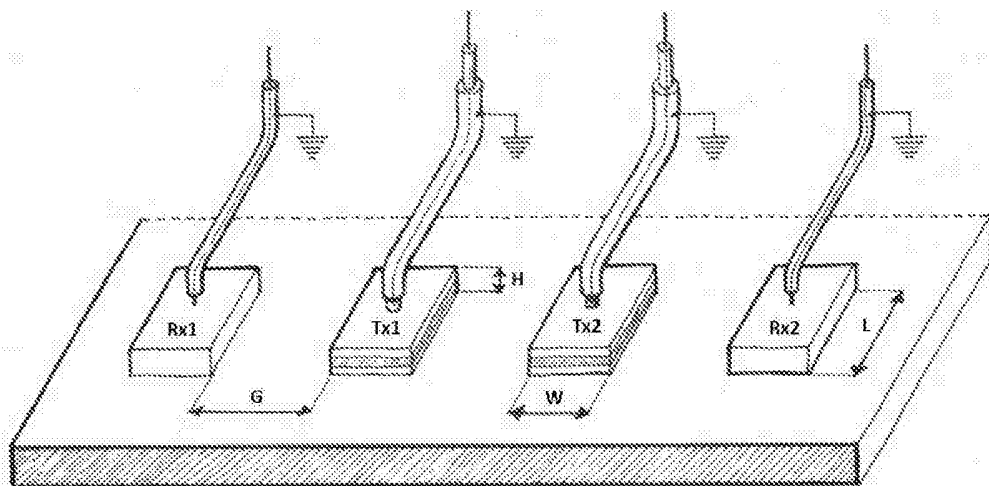


Fig. 4

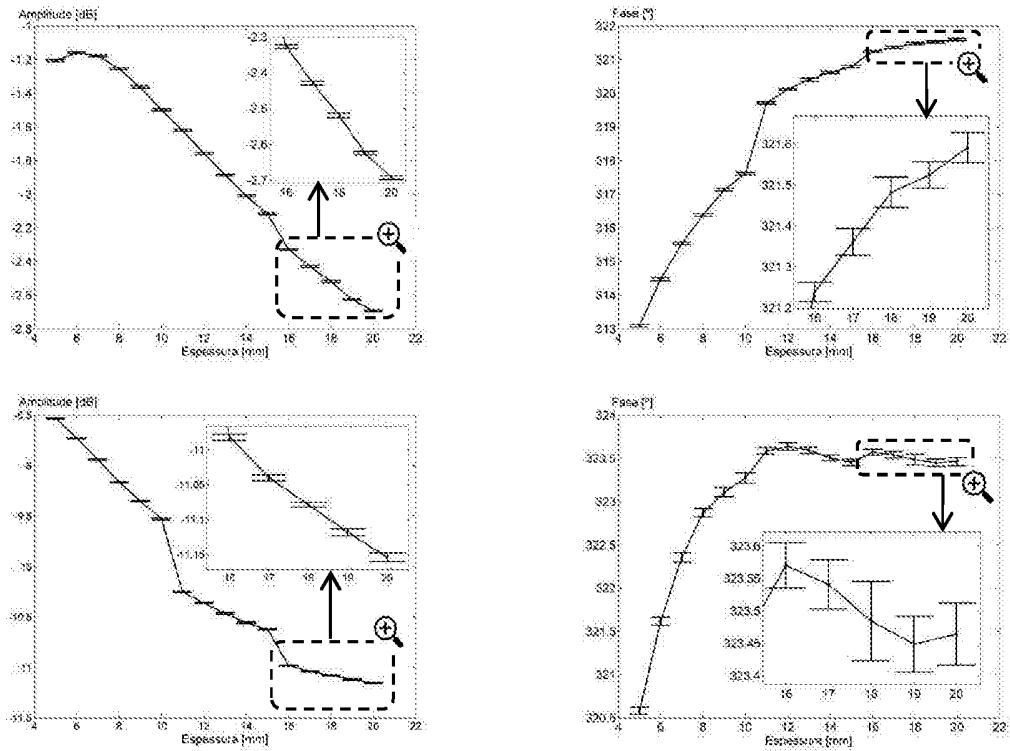


Fig. 5

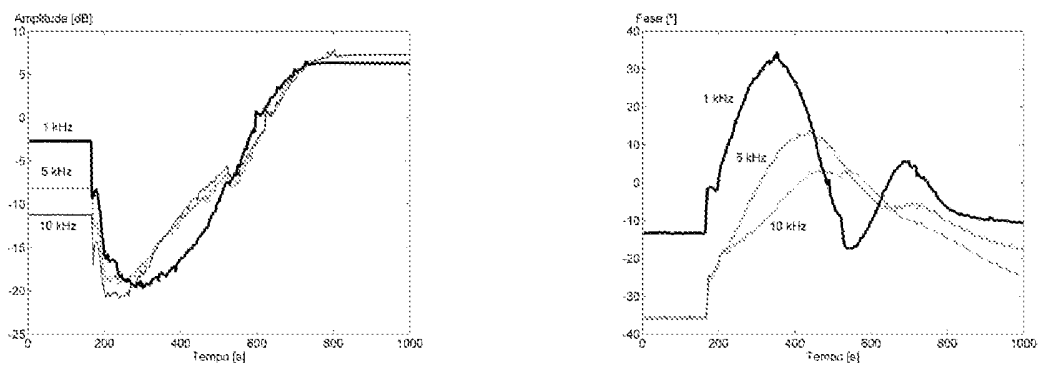


Fig. 6

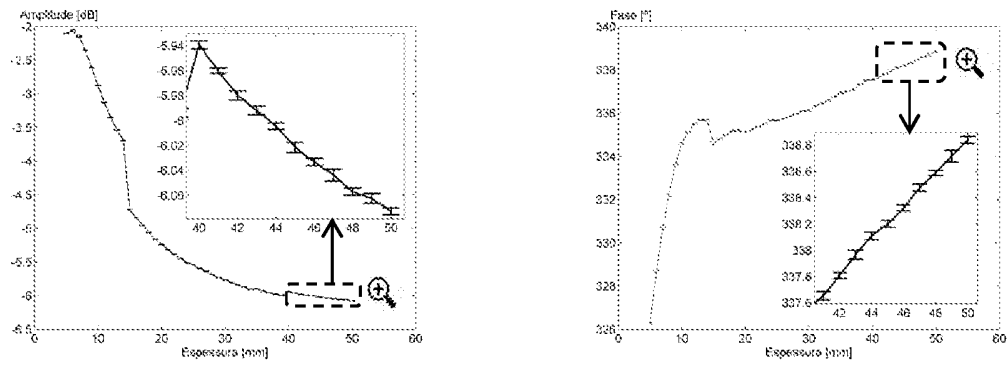


Fig. 7

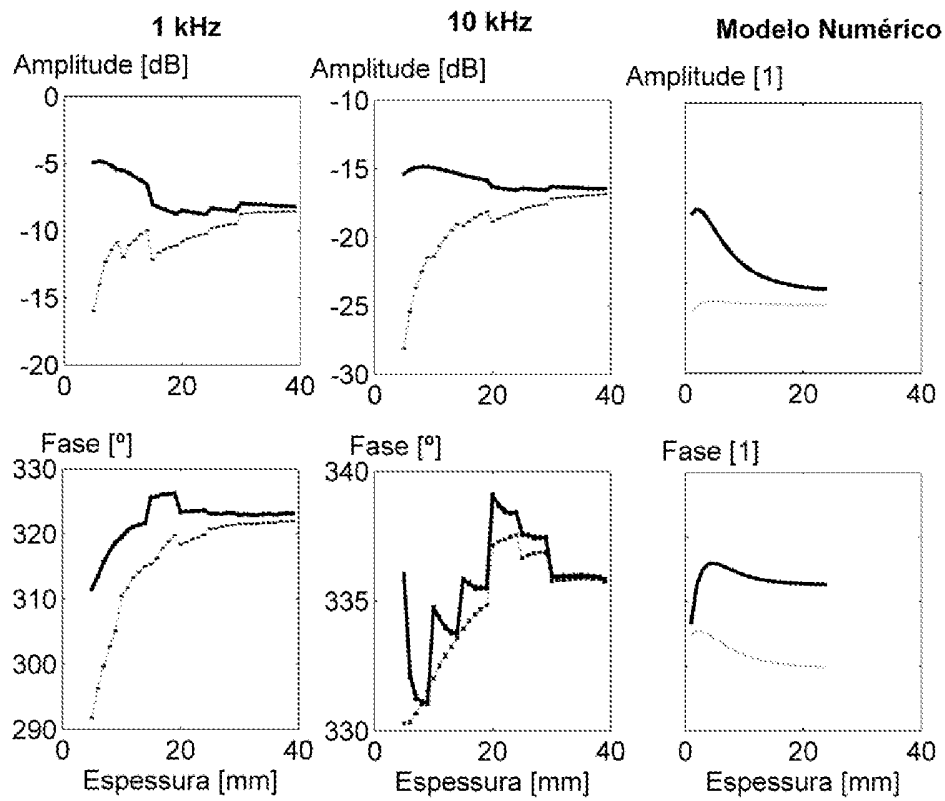


Fig. 8