

Avaliação do desempenho do sistema óptico da Câmera Multiespectral (MUX) dos satélites CBERS 3 e 4

Lucimara Cristina Nakata Scaduto^{1,2}
Rodrigo Gonzalez Modugno¹
Alexandre Lourenço Soares¹
Érica Gabriela Carvalho¹
Fátima Maria Mitsue Yasuoka¹
Mario Antonio Stefani¹
Jarbas Caiado de Castro Neto^{1,2}

¹ Opto Eletrônica S.A.

Rua Joaquim A. R. De Souza, 1071 - 13563-330 – São Carlos - SP, Brasil
{lucimara, modugno, alexandre, erica, fatima, stefani, jarbas}@opto.com.br

² Universidade de São Paulo – USP/IFSC

Caixa Postal 369 - 13560-970 - São Carlos - SP, Brasil
{lucimara, jarbas}@ifsc.usp.br

Abstract. The purpose of this work is to present the optical system developed for the MUX camera (Multispectral Camera), which will integrate the CBERS 3 & 4 satellites. This camera is being completely developed by Opto Eletrônica S.A. and is intended for the earth remote sensing. It will orbit at an altitude of 778 km and has four spectral bands covering the wavelength range from blue to near infra-red, field of view of 8,8° which comprises a 120 km image wide with 20 m of ground resolution. In particular, the Modulation Transfer Function (MTF) optical analysis performed during the preliminary project is presented, including in ground optical tests. The optical system MTF and global MTF, including the CCD sensor and the signal processing electronic, were carried out using a collimator of 3000 mm focal length. The optical system MTF test was also performed using an interferometer with wavelength of 632 nm. The results demonstrate that the optical system performance reaches the requirements of the project.

Palavras-chave: remote sensing, optical performance, Modulation Transfer Function, sensoriamento remoto, desempenho óptico, Função de Transferência de Modulação.

1. Introdução

O programa CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*) teve início a partir de um acordo firmado em 1988 entre Brasil e China (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007). A câmera MUX faz parte do módulo “carga útil” dos satélites CBERS 3 e 4 e está sendo, pela primeira vez, integralmente desenvolvida e fabricada no Brasil pela empresa Opto Eletrônica, fazendo com que o país adquira experiência ímpar em instrumentos ópticos aeroespaciais.

Diversas análises teóricas de desempenho óptico foram realizadas durante a etapa do projeto preliminar com o objetivo de avaliar a qualidade do sistema desenvolvido. Todos os requisitos de projetos foram testados em laboratório.

As curvas da Função de Transferência de Modulação (MTF) são geralmente usadas para a análise do desempenho de sistemas imageadores.

A MTF é de grande importância na especificação e teste de sistemas imageadores por permitir avaliar a transferência de frequências espaciais do objeto à imagem. É uma ferramenta importante na avaliação da imagem formada (Primot et al., 1994).

Sistemas imageadores possuem a habilidade de reproduzir a distribuição de intensidades relativas do objeto na imagem, esta característica é descrita pela Função de Transferência Óptica (OTF) do sistema. Esta função representa uma forma de quantificar o desempenho do sistema, e está relacionada com a qualidade da imagem gerada pelo mesmo. A imagem de um objeto produzida por um sistema óptico é degradada pela redução do contraste e arredondamento das formas que pode ocorrer, por exemplo, por espalhamento de luz de regiões mais intensas (Williams, 1999).

Em sistemas imageadores geralmente está presente algum tipo de detector, eletrônica, processadores de sinal etc. Assim como os componentes ópticos, o detector e o sistema eletrônico são caracterizados por uma MTF. A MTF total do sistema é dada pela multiplicação das MTFs dos subsistemas individuais que o compõem (Boreman, 2001). Maiores informações sobre OTF e MTF podem ser encontradas em Boreman (2001), Primot et al. (1994), Shannon (1997), Williams (1999), Yasuoka (1997) e Scaduto (2008).

Todo o desenvolvimento da câmera MUX foi realizado nos laboratórios e demais instalações da empresa.

2. Metodologia de Trabalho

O desenvolvimento do sistema óptico da câmera MUX, as simulações e as análises de desempenho foram realizados usando os softwares de desenho óptico ZEMAX (ZEMAX Development Corporation) e Code V (Optical Research Associates). O CCD presente na câmera MUX possui quatro linhas fotodetectoras, cada uma contendo 6000 *pixels* de dimensões $13\mu\text{m} \times 13\mu\text{m}$. Cada uma das linhas é coberta por uma janela de vidro contendo um filtro que limita a sua faixa espectral sensível. As faixas espectrais cobertas pela câmera são: B5 (450 – 520 nm), B6 (520 – 590 nm), B7 (630 – 690 nm) e B8 (770 – 890 nm).

Uma série de testes de aceitação, desempenho e calibração são realizados em cada subsistema que compõe o satélite, com o objetivo de verificar se as especificações de projeto estão satisfeitas. O equipamento de suporte terrestre (*Ground Support Equipment - GSE*) é um sistema que disponibiliza as interfaces existentes no momento em que o sistema for integrado ao satélite, permitindo realizar as operações de testes funcionais e de desempenho. O GSE utiliza instrumentação virtual, um banco óptico e outros equipamentos controlados por computador e integrados por uma eletrônica dedicada desenvolvida na própria empresa. Um dos equipamentos que compõem o banco óptico do GSE é um colimador (EFL 3000mm), que emite um feixe de luz totalmente colimado, auxiliando na realização de vários testes ópticos. O colimador é controlado pelo controlador do GSE e as imagens captadas pela câmera podem ser analisadas usando o IDS (*Image Display System*), que faz parte também do GSE. Maiores informações sobre o GSE – MUX podem ser encontradas em Pazelli (2007) e Santos Jr. (2007). A Figura 1 exibe o colimador e os racks do controlador do GSE e IDS do GSE MUX.



Figura 1 - Colimador principal sobre mesa óptica, rack do controlador GSE – MUX e rack do IDS do GSE – MUX, respectivamente. FONTE: Opto Eletrônica S.A.



Figura 2 - Interferômetro Zygo GPI – XP/D e canhão óptico da MUX posicionado para a medida com interferômetro. FONTE: Opto Eletrônica S. A.

A especificação do projeto exige que a MTF do sistema óptico seja superior a 0,65 a 38,5 lp/mm nas quatro bandas espectrais e a MTF global do sistema (incluindo o CCD e a eletrônica) deve ser maior que 0,23 para as bandas B5, B6 e B7 e superior a 0,18 para a banda B8.

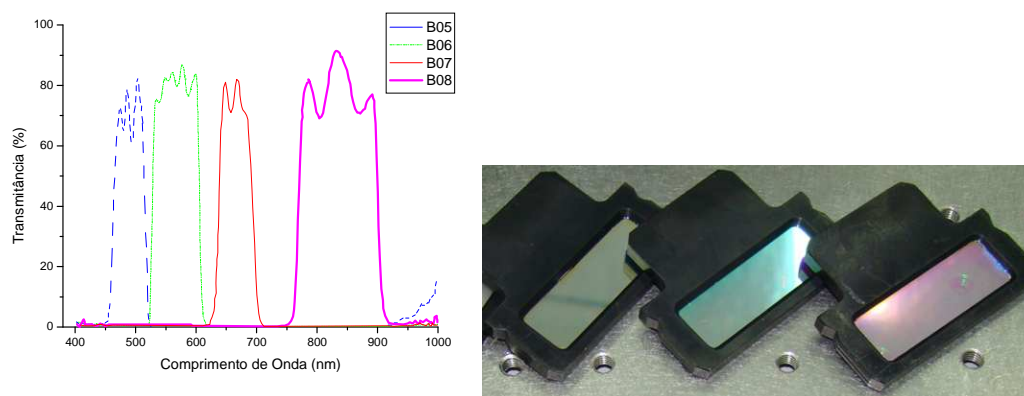


Figura 3 – Curvas de transmitância dos filtros espectrais em função do comprimento de onda e três dos quatro filtros espectrais usados nos testes ópticos.

O teste da MTF do sistema óptico (apenas lentes, sem janela plana) foi realizado de duas maneiras: uma utilizando o colimador e outra usando um interferômetro modelo ZYGO GPI – XP/D no comprimento de onda em 632 nm (Figura 2). O colimador foi usado também para a realização do teste de MTF global do sistema. Entretanto, até o momento da realização dos testes apresentados neste trabalho, apenas o modelo elétrico do CCD da câmera estava disponível. Este modelo de CCD não possui os filtros espectrais nas janelas de cada uma das quatro linhas que o compõem e são responsáveis pela separação das quatro bandas espectrais cobertas pela câmera. Sendo assim, para a realização destes testes, foi necessária a utilização de filtros espectrais similares aos filtros que estarão presentes no CCD, fabricados no setor de filmes finos da Opto Eletrônica. A Figura 3 exibe as curvas de transmitância espectral e três dos quatro filtros espectrais usados nos testes da câmera com colimador.

Medida da MTF com interferômetro

A montagem experimental usada no teste da MTF do sistema óptico usando o interferômetro foi realizada na configuração conhecida como *double-pass* (Figura 4). Nesta configuração o feixe emitido pelo interferômetro atravessa o sistema óptico, reflete no plano, passa pelo sistema novamente e retorna para o interferômetro. Assim, a frente de onda atravessa duas vezes o sistema óptico antes de retornar ao instrumento e interferir com o feixe de referência para a obtenção do padrão interferométrico. O software calcula a MTF do

sistema para o comprimento de onda usado por meio deste padrão. Os erros de frente de onda P-V e rms também podem ser analisados para avaliação do desempenho do sistema óptico. Para a realização deste teste o canhão óptico da câmera contendo as lentes foi devidamente posicionado entre o interferômetro e o plano refletor (Figura 2).

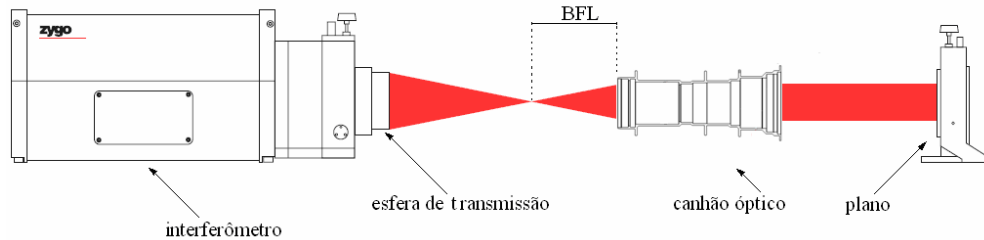


Figura 4 – Posicionamento do canhão óptico da câmera MUX para medida de MTF usando interferômetro ZYGO.

Medida da MTF com colimador

O teste da MTF do sistema óptico com o colimador foi realizado usando uma câmera CCD de alta resolução Sony, família HDA com 1.5 *Mpixels*, monocromático, com *pixel* quadrado de 4,65 μm , fabricada pela Lumenera Corp. O teste foi realizado com o canhão óptico (sem janela plana) e lente móvel. A MTF obtida neste caso é dada por:

$$MTF_{Total} = MTF_{alvo} \times MTF_{lentes} \times MTF_{colimador} \times MTF_{CCD} \times MTF_{eletrônica} \quad (1)$$

Para a obtenção da MTF do sistema óptico foram descontadas a MTF do colimador (0,95 para a frequência espacial de 38,5 lp/mm), a MTF do alvo e da eletrônica (aproximadamente 1) e a MTF devido à geometria do CCD usado. Desta forma o resultado é ligeiramente “pessimista”, pois considera como sendo da óptica eventuais desvios da eletrônica.

No caso da medida da MTF global, a câmera é posicionada em frente ao espelho móvel de saída do colimador, que projeta um feixe de luz colimada na entrada da câmera. A câmera forma a imagem do alvo tipo borda (*knife-edge*) sobre o seu plano focal, onde está localizado o sensor CCD que capta a imagem formada. O filtro espectral posicionado antes do alvo, no plano focal do colimador, pode ser substituído permitindo a medida de MTF nas quatro bandas especificadas. Dependendo do posicionamento do espelho móvel na saída do colimador, o feixe pode incidir na câmera com diferentes ângulos, permitindo a obtenção da MTF em função do *field*.

O alvo do colimador foi deslocado em passos de 6 μm , permitindo realizar o levantamento da função de distribuição de borda (ESF) da imagem do alvo ao redor de um determinado *pixel*, em passos discretos de 1 μm . De posse destes dados, a MTF é calculada através da derivada da ESF, que resulta na função de distribuição linear (LSF), seguida pela obtenção do módulo da transformada de Fourier (TF) da LSF obtida (Williams, 1999; Boreman, 2001). A montagem experimental com a câmera totalmente integrada é mostrada na Figura 5.



Figura 5 – Montagem experimental usada no teste de função de transferência de modulação global da câmera MUX (câmera completamente integrada). FONTE: Opto Eletrônica S.A.

A MTF resultante deste procedimento, assim como no caso da MTF do sistema óptico, é equivalente à composição da MTF do alvo, do sistema óptico, do colimador, do CCD e da eletrônica de amplificação e processamento de sinal.

A MTF do alvo pode ser desprezada neste caso por ser seu valor muito próximo de 1. A MTF da eletrônica também foi considerada como sendo igual a 1 (abordagem pessimista em relação à real situação). A MTF do colimador foi obtida previamente e o valor encontrado a 38,5 lp/mm foi de 0,95 para a MUX.

Os testes de MTF do sistema óptico usando o colimador foram realizados com a câmera mantida em temperatura controlada de 17,5°C, em sala limpa (classe ISO 6). Os valores de MTF do sistema óptico e MTF global foram obtidos para todas as bandas em três *fields* diferentes correspondentes à -4,4° (*pixel* de número 75), 0,0° (*pixel* central de número 3000), e 4,4° (*pixel* de número 5925).

3. Resultados e Discussões

O sistema óptico desenvolvido para a câmera MUX consiste em um sistema refrativo composto por onze elementos. O sistema desenvolvido é apresentado na Figura 6 nas condições de vácuo e ar. Conforme previsto no projeto, as duas configurações focam na mesma posição, diferindo somente na posição da última lente, que atua como um corretor focal, permitindo que o sistema seja ajustado e testado em terra e que o foco possa ser ajustado remotamente, caso haja necessidade. Nesta figura também estão presentes duas janelas de sílica (SUPRASIL®), que têm a função de proteger o sistema da radiação espacial, além de receberem filmes especiais que auxiliam no controle térmico da câmera e evita a saturação do sinal no CCD. A Figura 7 exhibe o gráfico da MTF do sistema óptico para a banda B6 obtido nas análises teóricas.

As MTFs obtidas pelo Zygo para o canhão óptico modelo de engenharia (EM) são apresentadas na Figura 8 para o *field* central e na Figura 9 para as bordas. Em todas as condições os valores de MTF encontrados satisfazem o requisito de MTF do sistema óptico. A Tabela 1 exhibe o resultado obtido para a MTF do sistema óptico (desconsiderando a MTF do colimador (0,95) e a MTF devido a geometria do CCD usado) e MTF global (sem janela plana e espelho de entrada, descontada a MTF do colimador), na frequência espacial de 38,5 lp/mm e 17,5°C.

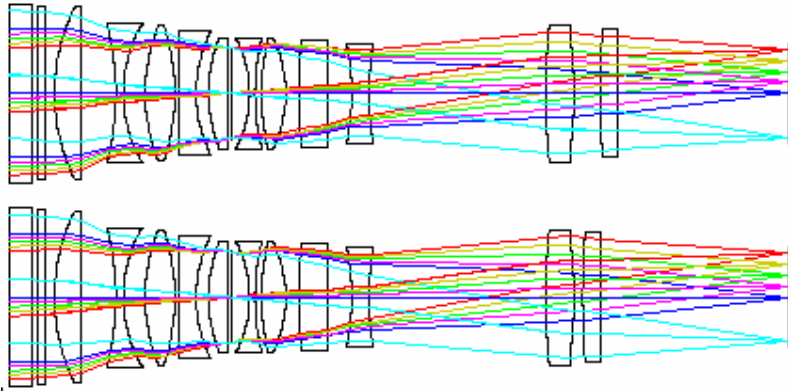


Figura 6 – Sistema óptico da câmera MUX. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

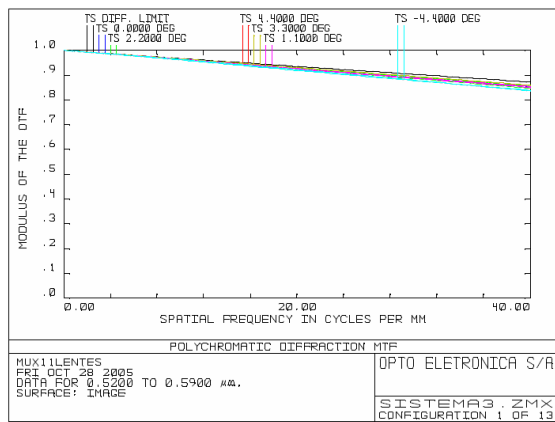


Figura 7 – Gráfico de MTF em função da frequência espacial, banda B6, a 17,5°C.

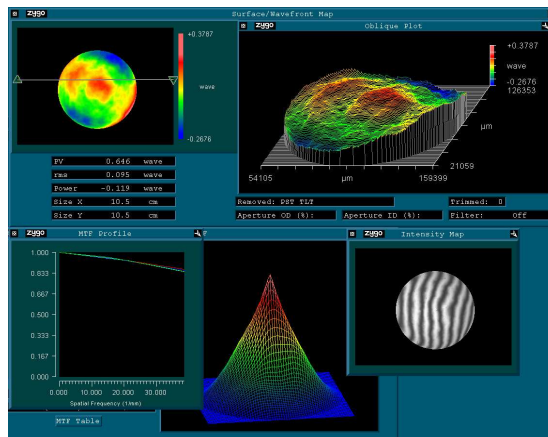


Figura 8 – Interferograma e curvas de MTF do sistema óptico MUX, no *field* central, capturada com o interferômetro Zygo. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

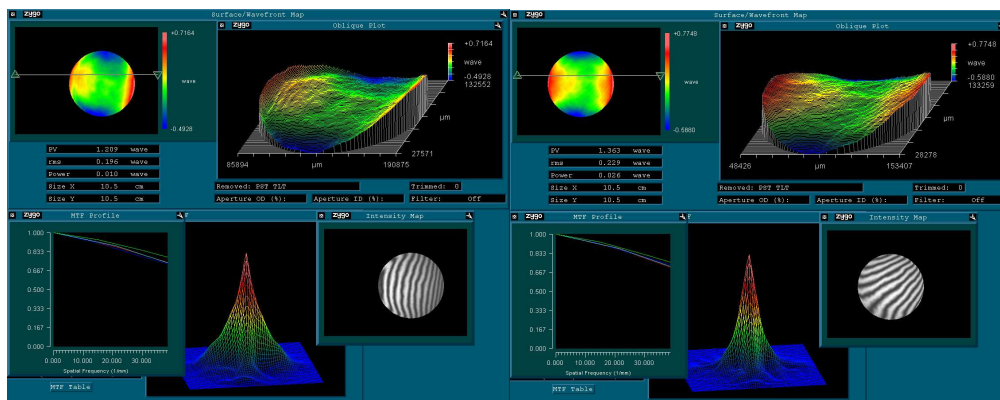


Figura 9 - Interferograma e curvas de MTF do sistema óptico MUX, na borda direita e na borda esquerda respectivamente, capturada com o interferômetro Zygo. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

O valor especificado para a MTF do sistema óptico da câmera MUX é de 0,65 a 38,5 lp/mm. Os resultados obtidos para as medidas realizadas usando o colimador, na maioria dos casos, foram superiores ao especificado. Para a borda esquerda o valor obtido eventualmente ficou ligeiramente abaixo do especificado indicando possível desalinhamento do sistema óptico em relação ao sensor.

Tabela 1 - Resultados do teste de MTF do sistema óptico (canhão com as onze lentes, sem janela plana) e MTF global (CCD e canhão com as onze lentes, sem janela) da MUX a 17,5° C.

	MTF Sistema Óptico (sem janela plana)					MTF Global (sem janela plana)			
	B5	B6	B7	B8		B5	B6	B7	B8
Borda Direita	0,677	0,644	0,711	0,644	75 (-4.4°)	0,27	0,28	0,33	0,23
Centro	0,644	0,644	0,711	0,611	3000 (0,0°)	0,28	0,27	0,31	0,20
Borda Esquerda	0,622	0,622	0,666	0,622	5925 (+4.4°)	0,37	0,34	0,34	0,23

Os resultados obtidos usando o interferômetro Zygo, indicam que o sistema óptico, em todos os *fields* apresentou MTF superior a 0,65 a 38,5lp/mm. Isso indica que o resultado obtido usando o colimador, que foi derivado de dados que incluem MTF da eletrônica e do colimador principal, representa uma estimativa pessimista de MTF do sistema óptico. Ou seja, a MTF da eletrônica foi considerada unitária. Entretanto, observa-se, pelo comportamento do sistema, que é necessário um melhor ajuste da posição focal.

Os resultados obtidos mostram que o desempenho da câmera, no que diz respeito ao MTF global, incluindo canhão (sem janela plana), transição, CCD e eletrônica, satisfaz o requisito de MTF.

Foram realizados também testes de MTF global após a integração completa do subsistema câmera MUX, incluindo o espelho de entrada e a janela plana. Entretanto, estes dados não serão apresentados, pois o espelho usado no teste corresponde ao modelo estrutural e térmico (STM), que apresenta deformações na superfície óptica, e não ao EM. Tal espelho não atende aos requisitos de qualidade exigidos pelo sistema. O espelho modelo EM, apresenta qualidade óptica compatível com os requisitos do sistema e ainda não estava disponível no período de realização destes testes.

O resultado acima pode ser considerado muito conservador e pessimista. O CCD usado nos testes corresponde ao modelo elétrico, e não de engenharia, e não são disponíveis dados validados de MTF para o modelo usado. Os valores usados nos cálculos são valores médios

(obtidos de dois CCDs, modelos de engenharia) fornecidos pelo fabricante, que não correspondem as unidades empregadas, que são modelos elétricos.

4. Conclusões

Os resultados dos testes da MTF do sistema óptico e MTF global obtidos para o modelo EM da câmera MUX indicam que o sistema óptico da câmera praticamente atende aos requisitos de projeto e confirmam os resultados teóricos obtidos para o mesmo. Além destes, diversos outros testes foram realizados visando avaliar se os requisitos de projeto foram satisfeitos. De modo geral a câmera atende às especificações e possui um bom desempenho óptico.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo suporte e assistência no desenvolvimento deste projeto.

Referências Bibliográficas

Boreman, G. D.. **Modulation Transfer Function in optical and electro-optical systems**. Bellingham: SPIE PRESS, 2001. 110 p..

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O satélite CBERS. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br>>. Acesso em: 31 out. 2007.

Pazelli, H. C. **Desenvolvimento de equipamento de testes eletrônicos para a câmera multiespectral do satélite CBERS**. 2007. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Primot, J.; Girard, M.; Chambon, M. Modulation transfer function assessment for sampled imaging systems: a generalization of the line spread function. **Journal of Modern Optics**, v. 41, n. 7, p. 1301-1306, 1994.

Santos Jr., D. **Implementação de processo de software para teste de equipamentos aeroespaciais**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Scaduto, L. C. N., **Desenvolvimento e avaliação do desempenho de sistema óptico aplicado a sensoriamento remoto orbital**. 2008. 243 f. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

Shannon, R. R. **The art and science of optical design**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 614 p..

Yasuoka, F. M. M. **Técnicas de desenho óptico e avaliação da qualidade de sistemas ópticos por medição de Função de Transferência Óptica**. 1997. 239 f. Tese (Doutorado em Física Aplicada) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

Williams, T. L. **The Optical Transfer Function of imaging systems**. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1999. 504 p..