

## ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

**ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**  
**-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена**

**DOCTORAL ASSESSMENT REPORT**  
**- mandatory content - each section must be completed**

<b>I</b>	<b>ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ</b>
<b>I</b>	<b>INFORMATION ABOUT THE EXAMINATION COMMITTEE</b>
1.	<p>Датум и орган који је именовео комисију Date and authority appointing the committee</p> <p><b>26.09.2019. Решење Декана Факултета техничких наука у Новом Саду о именовану комисије за оцену и одбрану докторске дисертације број 012-199/30-2018</b>  <b>26.09.2019. Based on the decision of the Dean of the Faculty of Technical Sciences number 012-199/30-2018</b></p>
2.	<p>Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <p>Composition of the committee with the name and surname of each member, title, scientific field for which he/she was elected to the title, date of election to the title, and name of the faculty/institution where the member of the committee is employed:</p>
1.	<p>Др Gert De Cooman, редовни професор,Моделовање несигурности и наука о системима, Универзитет у Генту. prof. dr. ir. Gert De Cooman, Full Professor in Uncertainty Modelling and Systems Science, Ghent University</p>
2.	<p>Др Владимир Црнојевић, редовни професор, Дигитална обрада слике, ПМФ Нови Сад dr.Vladimir Crnojević, Full Professor in Digital image processing at Faculty of Science, University of Novi Sad.</p>
3.	<p>Др Jan Sijbers, редовни професор, Биомедицинска реконструкција слика, Универзитет у Антверпену Prof. dr. ir. Jan Sijbers, Full Professor in Biomedical image reconstruction, University of Antwerp</p>
4.	<p>Др Pim Pullens, научни сарадник, Когнитивне неуронауке, Универзитет у Генту. dr.ir. Pim Pullens, research associate,Cognitive neuroscience,Ghent University Hospital, Ghent University</p>
5.	<p>Др Љиљана Платиша, Статистичка обрада слике, Универзитет у Генту. dr.ir. Ljiljan Platiša, research associate in Statistical image processing, Ghent University</p>
6.	<p>Др Александра Пижурица,ванредни професор, Статистичка обрада слике, Универзитет у Генту. prof. dr. ir. Aleksandra Pižurica, Professor in Statistical Image Modelling, Ghent University</p>
7.	<p>Др Дејан Вукобратовић, редовни професор, Телекомуникације и обрада сигнала, Универзитет у Новом Саду. dr. Dejan Vukobratović, Full Professor in Telecommunications and signal processing, University of Novi Sad.</p>
<b>II</b>	<b>ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ</b>
<b>II</b>	<b>INFORMATION ABOUT THE CANDIDATE</b>

<p>1. Име, име једног родитеља, презиме: Name, name of one parent, surname:</p> <p><b>Марко, Невен, Панић</b> <b>Marko, Neven, Panic</b></p> <p>2. Датум рођења, општина, држава: Date of birth, municipality, state</p> <p><b>24.04.1986., Шабац, Србија</b> <b>24/4/1986, Sabac, Serbia</b></p> <p>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив Name of the faculty, name of the study program of academic studies - master level and acquired professional title</p> <p><b>Факултет техничких наука, Енергетика електроника и телекомуникације, Мастер инжењер електротехнике и рачунарства</b></p> <p><b>Faculty of technical sciences, Power, Electronic and Telecommunication Engineering, Master of Science in Electrical and Computer Engineering</b></p> <p>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија Year of enrollment in doctoral studies and title of the doctoral study program</p> <p><b>2010. Енергетика, електроника и телекомуникације</b> <b>2010 Power, Electronic and Telecommunication Engineering</b></p> <p>5. Назив факултета, назив мастер рада, научна област и датум одбране: Name of the faculty, title of the master's thesis, scientific field and date of defense:</p> <p><b>Факултет техничких наука, Класификација слика заснована на AdaBoost алгоритму и стаблима одлуке са HOG и LBP обележјима, Електротехничко и рачунарско инжењерство, 16.09.2010.</b></p> <p><b>Faculty of technical sciences, Image classification based on AdaBoost algorithm and decision trees with HOG and LBP descriptors, Electrical and Computer Engineering, 16.09.2010.</b></p> <p>6. Научна област из које је стечено академско звање мастер: Scientific area from which the academic title of Master is obtained</p> <p><b>Телекомуникације и обрада сигнала</b> <b>Telecommunications and signal processing</b></p>
<p><b>III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:</b> <b>III DOCTORAL DISSERTATION TITLE</b></p>
<p><b>Реконструкција сигнала из непотпуних мерења са применом у убрзању алгоритама за реконструкцију слике магнетне резонанце</b></p> <p><b>Image Reconstruction from Undersampled Data with Application to Accelerated Magnetic Resonance Imaging</b></p>
<p><b>IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:</b> <b>IV DOCTORAL DISSERTATION REVIEW</b></p>
<p>Докторска дисертација је изложена на 176 стране, обухвата 43 графикана, 2 табеле, 48 слика и 204 референце. Написана је на енглеском језику. На почетку дисертације дата је кључна документација, резиме, садржај.</p>

Дисертација садржи седам поглавља:

1. Увод
2. Принципи магнетне резонанце
3. Реконструкција снимака магнетне резонанце из непотпуних података
4. Реконструкција снимака магнетне резонанце са Марковљевим случајним пољем као моделом сигнала
5. Похлепан поступак реконструкције са Марковљевим случајним пољем као моделом сигнала
6. Реконструкције из мерења добијених са више калемова
7. Закључци

Увод даје мотивацију за развој алгоритама за реконструкцију снимака магнетне резонанце и обухвата преглед постојеће литературе на дату тему. У поглављу 2 су дати основни принципи генерисања сигнала магнетне резонанце, модел за аквизицију слике и преглед метода реконструкције из потпуног скупа мерења. Треће поглавље даје увод у теоријске основе ретке репрезентације сигнала и вејвлет трансформација неопходне за развој алгоритама реконструкције из непотпуних мерења. Поглавље обухвата и преглед литературе постојећих алгоритама. У четвртом поглављу предложена су четири алгоритама за реконструкцију снимака магнетне резонанце која користе модел сигнала базиран на статистичком моделу Марковљевог случајног поља. Развијени алгоритми су засновани на два оптимизациона приступа приликом естимације слике, приступ са Лагранжовим мултипликаторима и АДММ методом и приступ са композитном методом раздвајања. Пето поглавље даје предлог похлепног алгорита који користи усвојен модел сигнала базиран на Марковљевом случајном пољу. Шесто поглавље даје проширење методе из четвртог поглавља за проблем реконструкције слике магнетне резонанце из мерења добијених са више калемова. У закључку је дат преглед доприноса дисертације, као и могући правци за даље истраживање.

У оквиру дисертације се још налазе: литература и преглед кључних речи.

The doctoral dissertation is presented on 176 pages, includes 43 charts, 2 tables, 48 figures and 204 references. It is written in English. At the beginning of the dissertation, key documentation, summary, and a table of contents are provided.

The dissertation contains seven chapters:

1. Introduction
2. Principles of MRI (Magnetic Resonance Imaging)
3. MRI recovery from partial data (Reconstruction of magnetic resonance imaging from incomplete data)
4. MRI reconstructions with MRF priors (reconstruction of magnetic resonance imaging with Markov random field as a signal model)
5. Greedy reconstructions with MRF priors (Greedy reconstruction process with Markov random field as a signal model)
6. Multit-coil MRI reconstruction (Reconstruction from multi-coil measurements)
7. Conclusions

The introduction motivates the development of algorithms for the reconstruction of magnetic resonance images and includes an overview of the existing literature on this topic. Chapter 2 gives the basic principles of magnetic resonance signal generation, an image acquisition model, and an overview of reconstruction methods from a complete set of measurements. The third chapter provides an introduction to the theoretical foundations of compressed sensing and wavelet-like transforms, which are necessary for the development of a reconstruction algorithm from incomplete measurements. The chapter also includes a literature overview of existing algorithms. Chapter four proposes four algorithms for reconstructing magnetic resonance images using a signal

model based on a Markov random field model. The developed algorithms are based on two optimization approaches for image estimation, an approach with Lagrangian multipliers implemented as an ADMM-based method and an approach based on composite-splitting. Chapter 5 provides a proposal for a greedy algorithm that uses the adopted signal model based on a Markov random field prior. Chapter six provides an extension of the method from Chapter four to the problem of magnetic resonance image reconstruction from multi-coil measurements. The conclusion provides an overview of the dissertation contributions, as well as possible directions for further research.

**The dissertation also includes: bibliography and a list of symbols and acronyms.**

**V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**  
**V EVALUATION OF PARTICULAR DOCTORAL DISSERTATION PARTS:**

У дисертацији је развијена нова ефикасна метода за реконструкцију МРИ-ја из делимичних Фуријеовихкоэффициената користећи модел Марковљевог случајног поља за конфигурацију потпоре ретких коэффициената. Ово је прва детаљна студија о реконструкцији МРИ из непотпуних мерења са коришћењемМарковљевог случајног поља, мада су потенцијали таквог приступа раније демонстрирани хеуристичком методом ЛаСБ. У поређењу са ЛаСБ-ом, нова метода користи другачију технику оптимизације, општији Марковљев модел и постиже конзистентно боље резултате.

Проширен је алгоритам базиран на Лагранжовим мултипликаторима (Ц-САЛСА) са предложеним Марковљевим моделом сигнала. Конкретно, уведен је нови корак регуларизације који прихвата конфигурације подршке фаворизоване Марковљевим моделом. Резултирајући алгоритамЛаСАЛдоследно надмашује Ц-САЛСА.

Развијена јеваријанта ЛаСАЛ поступка са регулацијом која укључујемодел на бази Марковљевог поља и ТВ норму која додатно побољшава перформансе реконструкције. Темељна процена се врши на МРИ скуповима података стеченим регуларним и нерегуларним мрежама одабирања за које су симулиране различите стратегије одабирања.

За радијално одабирани податке у к-простору на нерегуларној мрежи извршено је одабирање на основу размака профила златног размака како би се смањила неизбежна грешка у кораку интерполације на регуларној мрежи. Развијене методе засноване на моделу Марковљевог поља показују јасно побољшање у поређењу са алтернативним методама.

Проширен је модел сигнала засниваног на Марковљевом случајном пољу на анизотропну верзију и предложена ефикасна процена његових параметара. На основу генералнијег модела на бази Марковљевог поља, предложена је верзијафиног-праговања као функцију регуларизације. Са процењеном подршком сигнала у реткојрепрезентацији који се користи за одвајање коэффициената слике у две класе, значајна и безначајна, за сваку се изводи различита правила финог праговања. Предложена регуларизација заснована на генералнијем моделу Марковљевог случајног поља заједно с ТВ-нормом, интегрисана је и тестирана у оквиру алгоритма ФЦСА који је показао добре перформансе у проблемима реконструкције МРИ слике.

Развијена је метода за реконструкцију МРИ из мерења вишеструких завојница. Уместо реконструкције сваке слике завојнице засебно, а затим комбиновање слика завојнице да би добили коначну МР композитну слику, као што већина најсавременијих алгоритама у паралелном подешавању МРИ и ради, предложен јеитеративни поступак који заједно реконструише све слике завојница. Узимају сенепотпуни узорци мерења из свих завојница заједно као улаз у алгоритам нелинеарне реконструкције. Развијена метода је проширење алгоритма засновоаног на оптимизацији за реконструкцију слике изједне завојнице, који користи сложену регуларизацију базирану на моделу Марковљевог поља и ТВ норме.

An efficient novel method for MRI reconstruction from partial Fourier data making use of a Markov Random Field (MRF) prior for the support configurations of sparse coefficients has

been developed. To our knowledge, this is the first elaborate study on CS-MRI with MRF priors, although the potentials of such an approach were earlier demonstrated with a heuristic method named lattice split-Bregman (LaSB). Compared to LaSB, the new method employs a different optimization technique, a more general MRF prior, and achieves consistently better results.

A constrained split augmented Lagrangian shrinkage algorithm (C-SALSA) is extended with an MRF prior. In particular, a new regularization step is introduced, which admits support configurations favored by the prior model. The resulting algorithm, coined lattice split augmented Lagrangian (LaSAL) outperforms consistently C-SALSA.

A new variant of the proposed method LaSAL has been developed with compound regularization (MRF prior + TV norm), which further improves the reconstruction performance. A thorough evaluation was performed on MRI data sets acquired on Cartesian and non-Cartesian grids for which different undersampling strategies were simulated. For the radially acquired k-space data on a non-Cartesian grid, undersampling was performed based on the golden ratio profile spacing in order to reduce the inevitable errors in the interpolation step on the Cartesian grid. MRF-based CS-MRI methods demonstrate a clear improvement compared to alternative methods.

The MRF signal model is extended to an anisotropic version and an efficient estimation of its parameters has been proposed. Based on the more general MRF prior, a soft-thresholding version of the regularization function is proposed. The estimated signal support in the transform domain separates the image coefficients into two classes: significant and insignificant, and different soft-thresholding rules are derived for each class. The proposed MRF regularization, together with the TV-regularization, is integrated and tested under the fast composite splitting algorithm (FCSA) framework, which earlier showed good performances in MRI image recovery problems.

A method for MRI reconstruction from undersampled multi-coil measurements has been developed, in the so-called CS-pMRI setting. Instead of reconstructing each coil image separately and then combining them to get the final MR composite image like most of the state-of-the-art algorithms in parallel MRI (pMRI) setting did, a joint reconstruction framework is proposed.

Undersampled measurements from all coils are taken together as an input to a nonlinear reconstruction algorithm. The proposed method is an extension of one of the single-coil reconstruction algorithms developed in this PhD thesis - the LaSAL optimization-based algorithm with a compound regularization (MRF prior + TV norm).

**VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ**

**VI LIST OF SCIENTIFIC AND PROFESSIONAL PUBLICATIONS PUBLISHED OR ACCEPTED FOR PUBLISHING ON THE RESULTS OF RESEARCH IN THE DOCTORAL DISSERTATION**

**Panić M.**, Aelterman J., Crnojević V., Pižurica A. ‘Sparse recovery in magnetic resonance imaging with a Markov random field prior,’ IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. 36, No. 10, pp. 2104-2115, Oct. 2017. **M21a**

**Panić M.**, Aelterman J., Crnojević V., Pižurica A. ‘Compressed sensing in MRI with a Markov random field prior for spatial clustering of subband coefficients,’ 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Budapest, Hungary, Aug. 29 - Sep. 02., pp. 562-566, IEEE, 2016. **M33**

**Panić M.**, Vukobratović D., Crnojević V., Pižurica A. ‘Greedy MRI reconstruction using Markov Random Field prior,’ Proceedings of the IEICE Information and Communication Technology Forum (ICTF 2017), Poznan, Poland, Jul 4-6, Polish Association of Telecommunication Engineer, 2017. **M33**

**Panić M.,** Jakovetić, D., Crnojević, V. and Pižurica, A., 'Image Inpainting and Demosaicing via Total Variation and Markov Random Field-Based Modeling,' 26th Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, Nov. 26-27, pp. 1-4, IEEE, 2018. **M33**

**Panić M.,** Aelterman J., Crnojević V., Pižurica A. 'Multi-coil magnetic resonance imaging reconstruction with a Markov Random Field prior,' SPIE Medical Imaging, San Diego, USA, Feb. 19-21, Vol 10949, 2019. **M33**

**Panić M.,** Vukobratović D., Crnojević V., Pižurica A. 'Sparse MRI with a Markov Random Field Prior for the Subband Coefficients,' Third International Traveling Workshop on Interactions between Sparse models and Technology (iTWIST'16), Aalborg, Denmark, Aug. 24-26, pp. 56-58, 2016. **M33**

**VII ZAKLJUČCI ODNOSNO REZULTATI ISTRAŽIVAŃA**  
**VII CONCLUSIONS OR RESULTS OF RESEARCH**

Са методолошког становишта, у тези је представљен низ нових доприноса, углавном око коришћења напредног Марковљевог поља у процесу реконструкције слике магнетне резонанце (МРИ). Ослањајући се на претходни рад, кандидат предлаже побољшања тако што би се генерализирао претходни модел Марковљевог поља у ЛаСБ методи и користила другачија стратегија оптимизације. Други занимљив допринос односи се на развој заједничке методе обнове паралелних МРИ с претходним информацијама о сигналу на основу модела на бази Марковљевог случајног поља. Све предложене методе изгледају математички исправно, темељно су тестиране и симулацијом и на реалним подацима. Радови кандидата објављени су делом у ИЕЕЕ ТМИ (врхунски часопис у тој области), а делом у зборницима интернационалних конференција.

From a methodological point of view, there are a number of novel contributions presented in the thesis, mainly around the use of a Markov Random Field prior in the reconstruction process. Building on previous work, the candidate proposes improvements by generalizing the MRF prior that was earlier employed in LaSB and exploiting a different optimization strategy. Another interesting contribution relates to the development of a joint reconstruction method for parallel MRI with MRF priors. All proposed methods seem mathematically sound and have been thoroughly tested both with simulation and real data. The work has been published partly in IEEE TMI (top journal in the field) and partly in conference proceedings.

**VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ISTRAŽIVAŃA**  
**VIII. ASSESSMENT OF THE METHODS OF DISCLOSURE AND INTERPRETATION OF RESEARCH RESULTS**

Кандидат Марко Панић у потпуности је извео истраживања која су била предвиђена планом датим у пријави докторске дисертације. Целокупан приказ дисертације је добро и јасно структуриран. Резултати су детаљно и систематично интерпретирани и упоређени са релевантним методама из области. Велики број графичких приказа омогућава лакше разумевање резултата представљених у дисертацији. Изведени су закључци утемељени на великом броју експеримената и разноврсним подацима што показује да кандидат влада материјом и поседује висок ниво знања. У складу са наведеним, Комисија позитивно оцењује начин приказа и тумачења резултата истраживања.

Дисертација је проверена у софтверу за детекцију плагијаризма iThenticate. Извештај о подударности је показао да је дисертација оригинално ауторско дело кандидата.

Candidate Marko Panić completed the research that was foreseen by the plan given in his PhD application. The overall presentation of the dissertation is well-structured and clear. The results have been thoroughly and systematically evaluated and interpreted in comparison with the relevant methods in the field. A large number of graphical representations makes it easier to understand the results presented in the dissertation. Conclusions were drawn based on a large number of experiments and diverse data, which shows that the candidate masters the field and has gained profound knowledge in

this area. In view of the above, the Committee evaluates positively the way the results of the research are presented and interpreted.

The dissertation was verified in the iThenticate plagiarism detection software. The coincidence report showed that the dissertation is the original copyright work of the candidate.

**IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**  
**IX FINAL ASSESSMENT OF THE DOCTORAL DISSERTATION:**

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме

**Докторска дисертација у потпуности је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.**

Is the dissertation written in accordance with the reasoning given in the application form?

**The doctoral dissertation is completely written in accordance with the explanation given in the application form of the thesis.**

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе

**Дисертација садржи све битне елементе научно-истраживачког рада. Тема, садржај, преглед литературе, методологија, приказ и тумачење резултата задовољавају захтеве нивоа докторске дисертације.**

Does the dissertation contain all the essentials elements of scientific work

**The dissertation contains all the essential elements of scientific research. Topic, content, literature review, methodology, presentation and interpretation of the results meet the requirements of the doctoral dissertation level.**

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

**Докторска дисертација садржи оригиналне научне доприносе у домену моделовања сигнала ретке репрезентације коришћењем статистичког модела Марковљевог случајног поља, дефиницији новог типа регуларизатора и извођењу алгоритама реконструкције заснованим на оптимизационом и похлепном приступу који користе предложен вид регуларизације. Изведени алгоритми су тестирани детаљно на различитим скуповима слика и њихове перформансе су поређене са перформансама тренутно релевантних алогоритама у области.**

What makes a dissertation an original contribution to science?

**The PhD dissertation contains original contributions to sparse image reconstruction using Markov random field priors, development of new types of structured-sparsity regularization, and derivation of optimization and greedy based reconstruction algorithms with the proposed regularization approach. The derived algorithms have been thoroughly evaluated with different datasets and their performances showed improvements compared to the current state-of-the-art algorithms in the field.**

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања  
**Дисертација нема недостатке који утичу на резултате истраживања.**

Disadvantages of the dissertation and their impact on the research result

**The dissertation has no flaws that affect the research results.**

**X ПРЕДЛОГ:**  
**X PROPOSAL:**

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:

- да се докторска дисертација под називом Реконструкција сигнала из непотпуних мерења са применом у убрзању алгоритама за реконструкцију слике магнетне резонанце (назив на енглеском: “*Image Reconstruction from Undersampled Data with Application to Accelerated Magnetic Resonance Imaging*“) прихвати, а кандидату Марку Панићу одобри одбрана.

Based on the overall assessment of the thesis, the committee proposes:

- **to accept the doctoral dissertation entitled “*Image Reconstruction from Undersampled Data with Application to Accelerated Magnetic Resonance Imaging*” and to admit the candidate Marko Panić to the public defence of his PhD.**

ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ  
(SIGNATURES OF EXAMINATION COMMITTEE MEMBERS)

---

Др Gert De Cooman, редовни професор,  
Универзитет у Генту

---

Др Владимир Црнојевић, редовни професор,  
Универзитет у Новом Саду

---

Др Jan Sijbers, редовни професор, Универзитет  
у Антверпену

---

Др Pim Pullens, научни сарадник, Универзитет  
у Генту

---

Др Љиљана Платиша, научни сарадник,  
Универзитет у Генту

---

**Ментор:** Др Александра Пижурица, ванредни  
професор, Универзитет у Генту

---

**Ментор:** Др Дејан Вукобратовић, редовни  
професор, Универзитет у Новом Саду

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај.

NOTE: A member of the committee who does not wish to sign the report because he or she does not agree with the opinion of the majority of committee members is obliged to include in the report a justification or reasons for not wanting to sign the report.