



Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

-  РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
-  РАДИОКОНСТРУКТОРСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
-  ФАКУЛЬТЕТ
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ
-  ФАКУЛЬТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
-  ФАКУЛЬТЕТ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
-  ГУМАНИТАРНЫЙ
ФАКУЛЬТЕТ
-  ФАКУЛЬТЕТ
БЕЗОПАСНОСТИ
-  ЭКОНОМИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
-  ФАКУЛЬТЕТ
ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
-  ЮРИДИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
-  ЗАОЧНЫЙ И ВЕЧЕРНИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
-  ФАКУЛЬТЕТ
ДИСТАНЦИОННОГО
ОБУЧЕНИЯ



**ВЫБИРАЯ БУДУЩЕЕ,
ВЫБИРАЙ TUSUR!**

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, каб. 129 E-mail: onir@main.tusur.ru
Телефон/Факс: (3822) 900-100 Сайт: <http://tusur.ru/>

Информационный центр абитуриента: magistrant.tusur.ru

Сборник избранных статей научной сессии TUSUR



ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«НАУЧНАЯ СЕССИЯ TUSUR–2020»

г. Томск, 13–30 мая 2020 г.
(в двух частях)

ЧАСТЬ 1

г. Томск

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР

**по материалам
Международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2020»**

13–30 мая 2020 г., г. Томск

В двух частях

Часть 1

В-Спектр
2020

УДК 621.37/.39+681.518 (063)

ББК 32.84я431+32.988я431

С 23

С 23 Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 13–30 мая 2020 г.: в 2 частях. – Томск: В-Спектр, 2020. – Ч. 1. – 332 с.

ISBN 978-5-91191-434-9

ISBN 978-5-91191-435-6 (Ч. 1)

ISBN 978-5-91191-436-3 (Ч. 2)

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР включает избранные доклады по итогам Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Конференция посвящена различным аспектам разработки, исследования и практического применения радиотехнических, телевизионных и телекоммуникационных систем и устройств, сетей электро- и радиосвязи, вопросам проектирования и технологии радиоэлектронных средств, аудиовизуальной техники, бытовой радиоэлектронной аппаратуры, а также автоматизированных систем управления и проектирования. Рассматриваются проблемы электроники СВЧ- и акустооптоэлектроники, нанофотоники, физической, плазменной, квантовой, промышленной электроники, радиотехники, информационно-измерительных приборов и устройств, распределенных информационных технологий, вычислительного интеллекта, автоматизации технологических процессов, в частности, в системах управления и проектирования, информационной безопасности и защиты информации. Представлены статьи по математическому моделированию в технике, экономике и менеджменте, антикризисному управлению, правовым проблемам современной России, автоматизации управления в технике и образовании, а также работы, касающиеся социокультурных проблем современности, экологии, мониторинга окружающей среды и безопасности жизнедеятельности.

УДК 621.37/.39+681.518 (063)

ББК 32.84я431+32.988я431

ISBN 978-5-91191-434-9

ISBN 978-5-91191-435-6 (Ч. 1)

© Том. гос. ун-т систем управления
и радиоэлектроники, 2020

Д.И. Дудник	
ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ПРОПУСКАЮЩИХ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР	208
М.Н. Гаптарова, Д.К. Романенко, А.В. Шукин, А.С. Перин	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИФРАКЦИОННОЙ РАСХОДИМОСТИ СВЕТОВОГО ПУЧКА В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ С УЧЕТОМ ВКЛАДА ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА	211
Т.Л. Григорян	
ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ДАЛЬНОМЕРАМИ	215
К.В. Короткова, К.П. Мельник	
ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В КРИСТАЛЛАХ КТР ..	218
Е.В. Бакаулова, К.Б. Кемелханова, К.М. Мамбетова	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ ГОЛОГРАММ В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ С ПОВЕРХНОСТНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ	220
П.К. Сафронова	
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРАЗМЕРНЫХ ФОТОННЫХ РЕШЕТОК БЕССЕЛЕПОДОБНЫМ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ	224
А.В. Михайленко, К.Г. Аксёнов	
СПЕКТР ОПТИЧЕСКОГО ОТРАЖЕНИЯ СТРУКТУРЫ GaN/Al ₂ O ₃	227
В.А. Горончко, М.М. Михайлов	
ИЗУЧЕНИЕ ИК-СПЕКТРОВ ПОЛИПРОПИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ ZrO ₂	229
М.М. Михайлов, О.А. Алексеева, А.Н. Лапин,	
С.А. Юрьев, В.В. Каранский	
СИНТЕЗ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВ BaTi _(1-x) Zr _x O ₃ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОЧАСТИЦ TiO ₂	232
В.В. Каранский	
ВЛИЯНИЕ КВАНТОВ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКА ZnO, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ SiO ₂	235

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Председатель – Заболоцкий А.М., проф. каф. ТУ, д.т.н.;
зам. председателя – Куксенко С.П., доцент каф. ТУ, к.т.н.

А.А. Дроздова	
СОЗДАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТА СЕТИ ПО MIL-STD-461 G ДЛЯ СИЛОВОЙ ШИНЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	239

А.А. Дроздова	
АНАЛИЗ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СИЛОВОЙ ШИНЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА	243
С.Х. Карри, Р.С. Суровцев	
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЯЧЕЕК ДИСКРЕТИЗАЦИИ МОДЕЛИ МЕАНДРОВОЙ ЛИНИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛНОВОЛНОВОГО АНАЛИЗА	247
Д.В. Клюкин, А.А. Квасников	
РАСЧЕТ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	251
А.М. Лакоза, В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ДРОССЕЛЕМ	254
И.И. Николаев	
СИЛОВАЯ ШИНА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С КООКСИАЛЬНЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ	257
Р.С. Суровцев, А.В. Носов, Е.А. Сердюк	
ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ДЛЯ МАГИСТРАНТОВ ПО АНАЛИТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ	260
А.Е. Максимов, И.А. Онищенко	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ПЕРЕКРЕСТНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ	263
А.А. Синельников, А.В. Чуб, Е.С. Жечев	
КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОГО ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА КОНЦАХ ПАССИВНЫХ ПРОВОДНИКОВ	266
И.А. Скорняков	
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЛАГОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА АМПЛИТУДУ ПЕРЕКРЕСТНЫХ НАВОДОК В ПАРЕ СВЯЗАННЫХ ЛИНИЙ	269
Е.С. Варзин, А.В. Носов	
ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАЩИТНОЙ МЕАНДРОВОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ	273

ПОДСЕКЦИЯ 2.7

СВЕТОДИОДЫ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Председатель – Туев В.И., зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.;

зам. председателя – Солдаткин В.С., доцент. каф. РЭТЭМ, к.т.н.

К.Н. Афонин

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРЯМОГО НАПРЯЖЕНИЯ СВЕТОДИОДНОЙ НИТИ	277
--------------------------------------------------------------------	-----

Научное издание

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР

**По материалам
Международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2020»**

13–30 мая 2020 г., г. Томск

В двух частях

Часть 1

Корректор – **В.Г. Лихачева**
Верстка **В.М. Бочкаревой**

Издательство «В-Спектр».
Сдано на верстку 15.04.2020. Подписано к печати 15.05.2020.
Формат 60×84¹/₁₆. Печать трафаретная. Печ. л. 20,75
Тираж 100 экз. Заказ 7.

Издано ТУСУР, г. Томск, пр. Ленина, 40, к. 205, т. 70-15-24
(для нужд всех структурных подразделений университета и авторов)

Издательство «В-Спектр».
634055, г. Томск, пр. Академический, 13-24, т. 8 905 089 92 40
E-mail: bvm@sibmail.com

Т.Р. Газизов // Матер. докладов XV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск, 20–22 ноября 2019 г. – Томск: В-Спектр. – 2019. – Ч. 2. – С. 49–52.

2. Леонтьев Н.А. Анализ временного отклика в межсоединениях быстродействующих радиоэлектронных схем: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2000.

3. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.

УДК 519.612.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ПЕРЕКРЕСТНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

А.Е. Максимов, аспирант каф. ТУ;

И.А. Онищенко, студент каф. КСУП

Научный руководитель С.П. Куксенко, доцент каф. ТУ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, mae@tusur.ru

Приведены результаты использования адаптивной перекрестной аппроксимации при анализе линий передачи методом моментов для уменьшения вычислительных затрат.

Ключевые слова: линия передачи, метод моментов, система линейных алгебраических уравнений, адаптивная перекрестная аппроксимация.

Линии передачи (ЛП) широко используются в СВЧ-технике и в межсоединениях цифровых устройств [1]. При анализе ЛП широко применяются квазистатический подход и различные численные методы. Их использование, как правило, сводит задачу к необходимости решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [2]. Из полученного решения вычисляются погонные параметры ЛП. При использовании метода моментов итоговая СЛАУ является плотной, и объем памяти, которым обладают современные персональные компьютеры (ПК), часто оказывается недостаточен для хранения таких матриц, поэтому существует необходимость в их сжатии [3], например, с использованием адаптивной перекрестной аппроксимации (adaptive cross approximation, ACA) [4]. Однако авторам неизвестны работы, в которых исследовано использование ACA при анализе ЛП.

Цель работы – исследование работы ACA при анализе ЛП методом моментов.

Исследование работы ACA выполнено на примере двухпроводной микрополосковой ЛП при трех порядках матрицы СЛАУ ($N = 2079, 6227$ и 10374), полученных последовательным учащением

сетки. При вычислениях исследовалось влияние точности аппроксимации (tol) и итерационного решения СЛАУ методом GMRES [5] (относительной нормы невязки, TOL) на конечный результат (емкостная матрица ЛП). Вычисление производилось на ПК со следующими характеристиками: процессор – Intel Core i5-8265U, тактовая частота – 1,60 ГГц; объем ОЗУ – 8 Гбайт; количество ядер – 4; количество виртуальных процессоров – 8.

На рис. 1, *a* приведена емкостная матрица (C), полученная при решении СЛАУ методом Гаусса. В таблице для случая $N = 6227$ приведены требуемые для вычисления емкостной матрицы C' затраты времени (T') и машинной памяти (V') при использовании АСА и GMRES при разных значениях TOL и tol относительно аналогичных затрат при использовании метода Гаусса ($T = 3,15$ с и $V = 296$ Мб), а также относительная погрешность решения $\Delta = \|C' - C\| / \|C\|$.

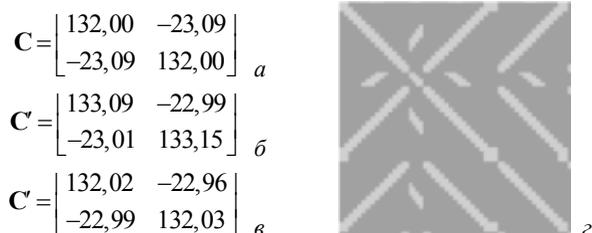


Рис. 1. Емкостные матрицы, полученные при решении СЛАУ с $N = 6227$ методом Гаусса (*a*), АСА и GMRES при $tol = 10^{-3}$, $TOL = 10^{-3}$ (*б*) и $tol = 10^{-3}$, $TOL = 10^{-4}$ (*в*), и портрет матрицы при $tol = 10^{-3}$, $TOL = 10^{-4}$ (*г*)

Из таблицы видно, что на экономию времени вычисления в большей степени влияет значение параметра TOL . Так, при $TOL = 10^{-3}$ (для всех tol ниже 10^{-1}) экономия составляет около 1,6 раза. При этом точность емкостной матрицы высока (см. рис. 1, б). Большая точность достигается при $TOL = 10^{-4}$ (см. рис. 1, в), но экономия времени в этом случае отсутствует. Однако увеличение N до 10374 при этом значении TOL также приводит к экономии времени около 1,6 раза.

Затраты машинной памяти при использовании АСА практически не зависят от значения tol (см. таблицу). При этом увеличение N ведет к увеличению экономии машинной памяти. Так, при $N = 2079$ она составляет до 4,8 раза, при $N = 6227$ – до 5,3 раза, а при $N = 10374$ – до 5,5 раза. Также из таблицы видно, что погрешность решения $\Delta \approx 10^{-3}$ достигается при $TOL = 10^{-4}$ и $tol = 10^{-3}$. Поэтому дальнейшее уменьшение этих параметров нецелесообразно.

Для наглядности итоговый портрет матрицы СЛАУ при использовании АСА для $N = 6227$ приведен на рис. 1, ε (серым отмечены блоки, хранящиеся в несжатом виде, черным – в сжатом виде). При других N различия в портретах минимальны.

**Погрешность вычисления емкостной матрицы и затраты времени
и машинной памяти при использовании АСА и GMRES
относительно метода Гаусса для $N = 6227$**

<i>tol</i>	<i>TOL</i>	<i>V/V'</i>	<i>T/T'</i>	Δ
10 ⁻¹	10 ⁻¹	5,34	3,74	0,26524
	10 ⁻²	5,34	2,58	0,11528
	10 ⁻³	5,34	1,16	0,05121
	10 ⁻⁴	5,34	0,85	0,05042
	10 ⁻⁵	5,34	0,59	0,05019
10 ⁻²	10 ⁻¹	5,26	3,48	0,28322
	10 ⁻²	5,26	2,65	0,12668
	10 ⁻³	5,26	1,65	0,01168
	10 ⁻⁴	5,26	1,01	0,00146
	10 ⁻⁵	5,26	0,71	0,00099
10 ⁻³	10 ⁻¹	5,20	3,53	0,28386
	10 ⁻²	5,20	2,58	0,12703
	10 ⁻³	5,20	1,69	0,01129
	10 ⁻⁴	5,20	1,00	0,00129
	10 ⁻⁵	5,20	0,65	0,00078
10 ⁻⁴	10 ⁻¹	5,13	3,30	0,28389
	10 ⁻²	5,13	2,46	0,12716
	10 ⁻³	5,13	1,62	0,01061
	10 ⁻⁴	5,13	0,96	0,00057
	10 ⁻⁵	5,13	0,71	0,00007

Таким образом, при анализе ЛП использование АСА является эффективным средством экономии машинной памяти, а также часто и затрат времени.

Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2020-0039 Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев А.Н. Системы параметров одинаковых связанных линий с неравновешенной электромагнитной связью / А.Н Сычев, С.М. Стручков // Доклады ТУСУР. – 2014. – Т. 1. – С. 39–50.
2. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. – М.: Физматлит, 2013. – 430 с.

3. Shaeffer J. Million plus unknown MOM LU factorization on a PC // IEEE International conference on electromagnetics in advanced applications (ICEAA). – 2015. – P. 62–65.

4. Bebendorf M. Approximation of boundary element matrices // Numerische Mathematik. – 2000. – Vol. 86. – P. 565–589.

5. Saad Y. GMRES: A generalized minimal residual algorithm for solving non-symmetric linear systems / Y. Saad, M.H. Schultz // SIAM Journal on scientific and statistical computing. – 1986. – Vol. 7. – P. 856–869.

УДК 621.372.21

**КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОГО ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО
МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГРАНИЧНЫХ
УСЛОВИЙ НА КОНЦАХ ПАССИВНЫХ ПРОВОДНИКОВ**

А.А. Синельников, студент каф. ТУ; А.В. Чуб, студент каф. РСС;

Е.С. Жечев, аспирант каф. ТУ, м.н.с. НИЛ «ФИЭМС»

Научный руководитель А.М. Заболоцкий, проф. каф. ТУ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, geopath@mail.ru

Анализируется конфигурация четырехслойного зеркально-симметричного модального фильтра (МФ) с различными граничными условиями на ближнем и дальнем концах пассивных проводников. Представлены результаты квазистатического моделирования во временной и частотной областях. Моделирование выполнено с учетом потерь.

Ключевые слова: зеркально-симметричный модальный фильтр, помехозащитные устройства, электромагнитная совместимость, сверхкороткий импульс

В настоящее время при проектировании сложных радиоэлектронных устройств и систем большое внимание уделяется обеспечению электромагнитной совместимости. В процессе работы высокочастотная передающая и высоковольтная коммутационная аппаратуры способны генерировать излучаемые и кондуктивные помехи. Особо опасным видом помех является сверхкороткий импульс (СКИ) [1], который обладает большой мощностью и широким спектром. Традиционные помехоподавляющие устройства оказываются малоэффективными в борьбе с СКИ из-за ограниченного частотного диапазона, низкого быстродействия и малой рассеиваемой мощности. Перспективными устройствами защиты от импульсов малой длительности являются модальные фильтры (МФ) [2]. В основу работы таких устройств положен принцип модального разложения. Принципиаль-