

Министерство образования Республики Беларусь  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.391, 004.382.2-027.21

№ госрегистрации 20113105

Инв №

Проректор по научной работе  
к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Д.О. Глухов

« 17 » \_\_\_\_\_ 12 \_\_\_\_\_ 2013г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработка коммутационной системы микроволновой многолучевой  
распределительной системы для широкополосного доступа по заданию  
«Микроволновые многолучевые распределительные системы для  
широкополосного доступа»  
(заключительный)

ГПНИ «Электроника и фотоника» 1.3.08

Начальник НИС

\_\_\_\_\_ Т.В. Гончарова

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013г.

Научный руководитель  
заведующий кафедрой  
радиоэлектроники  
к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ С.В. Мальцев

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013г.

Новополоцк 2013

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель,  
зав. каф. РЭ, к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ Мальцев С.В.  
(введение, заключение, общая  
редакция всех глав)

Ответственный исполнитель  
Доцент каф. РЭ, к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ Янушкевич В.Ф.  
(гл.3)

зав. каф. ВС и С, к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ Богуш Р.П.  
(гл.1,4)

ассистент каф. РЭ \_\_\_\_\_ Чертков В.М.  
(гл.2,4)

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ Кулеш В.Ф.

## РЕФЕРАТ

Отчет 69 с., 39 рис., 5 табл., 58 источников.

### ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ЦИФРОВОЕ ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЕ, СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК, СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ.

Объект исследования или разработки: Элементы и технология цифрового диаграммообразования сверхширокополосных коммуникационных систем.

Цель работы – разработка эффективных методов и алгоритмов цифровой обработки, направленных на повышение качественных характеристик сверхширокополосных коммуникационных систем на основе цифрового диаграммообразования.

При проведении исследований использовались следующие методы и методологии: цифровой обработки сигналов, векторно-матричных операций, дискретной математики, программирования и компьютерного моделирования.

В результате исследований разработаны элементы технологии цифрового диаграммообразования с использованием факторизации матриц на основе классических методов, допускающих возможность сверхразрешения, синтезирована структура модуля квадратурной обработки и преобразования сигнала поддерживающего концепцию SDR (Software Defined Radio) для работы с высокоскоростной коммуникационной инфраструктурой, синтезирована структура узла параллельной обработки сигнала, который осуществляет цифровую обработку квадратурных компонент, реализуя подход метода максимального правдоподобия (расчет и анализ корреляционной функции прямым методом на основе свертки), разработаны широкополосные элементы для антенных решеток.

Результаты НИР используются на кафедре радиоэлектроники УО «Полоцкий государственный университет»: при чтении лекций и проведении лабораторных работ по дисциплине «Сигнальные процессоры и проектирование программируемых цифровых устройств» (первая ступень высшего образования, специальность 1-39 01 01 «Радиотехника»); при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплине «Цифровая обработка сигналов» (первая ступень высшего образования, специальность 1-36 04 02 «Промышленная электроника»); при выполнении дипломных проектов и магистерских диссертаций; при проведении научно-исследовательской работы студентов и магистрантов.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке перспективных систем радиолокации, систем коммуникаций, навигационных и пеленгационных систем

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
1 Технологии формирования диаграммы направленности цифровыми методами .....	9
1.1 Анализ перспективных технологий и устройств формирования диаграммы направленности цифровыми методами.....	9
1.2 Математическая формализация задачи формирования пространственного сверхразрешения объектов .....	16
1.3 Алгоритмы и модели цифрового формирования диаграммы направленности для многолучевой распределительной системы.....	19
2 Синтез структур для работы с высокоскоростной коммуникационной системой.....	22
2.1 Синтез структуры модуля квадратурной обработки и преобразования сигнала.....	22
2.2 Синтез структуры узла параллельной обработки сигнала.....	24
2.3 Разработка алгоритмов распределения и реконфигурации данных .....	25
3 Разработка элементов антенных решеток для высокоскоростных коммуникационных структур .....	27
3.1 Выбор платформы для моделирования элементов антенных решеток..	27
3.2 Моделирование и разработка сверхширокополосной спиральной антенны.....	29
3.3 Моделирование эллиптической целевой антенны .....	34
3.4 Моделирование и разработка сверхширокополосной антенны Вивальди .....	39
4 Макетирование системы цифрового диаграммообразования.....	44
4.1 Аппаратно-программный комплекс для макетирования системы цифрового диаграммообразования .....	44
4.2 Программная реализация алгоритмов системы цифрового диаграммообразования .....	46
4.3 Результаты макетирования системы цифрового диаграммообразования для различных методов сверхразрешения.....	50
4.3.1 Метод максимального правдоподобия .....	50
4.3.2 Метод «теплового шума» .....	55
4.3.3 Метод Кейпона.....	57
4.3.4 Проекционный метод углового разрешения источников сигналов .	60
4.4 Анализ результатов.....	63
Заключение .....	65
Список использованных источников .....	66

## Список использованных источников

1. Слюсар В.И. Цифровые антенные решетки – будущее радиолокации.– Дневник Электроника: НТБ, 2001, No 3, с. 42 – 46.
2. Слюсар В.И. Цифровое формирование луча в системах связи: будущее рождается сегодня. Электроника: НТБ, 2001, No 1, с. 6 – 12.
3. A Legacy with a Future. RTC MAGAZINE, Nov. 1998 – [www.arizonadigital.com/Legacy.pdf](http://www.arizonadigital.com/Legacy.pdf).
4. Слюсар В.И., Заблоцкий М.А. Цифровые антенные решетки в зарубежных системах мобильной связи. – Зв'язок, 1999, No 1.
5. Слюсар В.И. Цифровое диаграммообразование – базовая технология перспективных систем связи. – Радиоаматор, 1999, No 8.
6. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках – М.: Радио и связь, 2003. – 200 с.
7. Сычев М.И. Пространственно-временная обработка радиосигналов на основе параметрического спектрального анализа // Антенны. — 2001. — вып. 1(47). — С . 70-77.
8. Добырин В.В. Эффективность применения сверхразрешающих спектральных оценок в бортовых угломерных фазированных антенных решетках /В.В. Добырин, А.В. Немов // Радиотехника. — 1999. — №9. 65-67.
9. Слюсар В. И. Схемотехника цифрового диаграммообразования. Модульные решения. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2002, 1, с.46–52.
10. Модуль цифровой обработки сигналов на ПЛИС серии Virtex II SETLIN K. – ScanEngineering Telecom. – Воронеж – [www.setdsp.ru/products/instrumental/cpci/plisar001/](http://www.setdsp.ru/products/instrumental/cpci/plisar001/).
11. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. М.: Мир, 1990.
12. Дрогалин В.В. и др. Алгоритмы оценивания угловых координат источников излучений, основанные на методах спектрального анализа. Успехи современной радиоэлектроники, 1998, №2
13. Аджемов С.С. и др. Исследование алгоритмов сверхразрешения в адаптивных антенных решетках. // Радиотехника, 2000, №11.
14. Слюсар В. И. Smart антенны пошли в серию. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, 1, с.52 – 55.
15. Армит Дир (перевод Игоря Метелина) WiMax – воплощение идеи беспроводной широкополосной связи, - Современная электроника, 2006, №9, с12-15.
16. Дингес С.И., Дингес Т.С. От мобильного телефона к универсальному устройству (анализ структуры радиочастотных блоков),- Мобильные Системы, август, 2004, с58-66.

17. Слюсар В. Цифровые антенные решетки: будущее радиолокации. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, No 3, с. 42-46.
18. Alexander Kuchar. Project SFIR: Real Time Smart Antenna Processing for GSM/DCS 1800. <http://www.nt.tuwien.ac.at/mobile/projects/SFIR/welcome/en/>.
19. Субмодуль цифрового приема Admddc2wb. Руководство пользователя. М: АО "Инстр. Системы".–1999.
20. Модуль ЦОС ADP62PCI. Руководство пользователя. М: АО "Инстр. Системы".– 1999.
21. Модуль цифровой обработки сигналов XDSP 3mc. Техническое описание. Scan Engineering Telecom. – [www.setltd.com](http://www.setltd.com).
22. ZT5088e 12U General Purpose Packet Switched Platform. [www.ziatech.com/Manuals/IPnexus\\_ZT\\_5088e\\_Manual.pdf](http://www.ziatech.com/Manuals/IPnexus_ZT_5088e_Manual.pdf).
23. Н. Слепов. RapidIO – коммутационная структура последовательного типа, ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технологии, Бизнес. 5/2006, с.76-89.
24. В. Юдинцев. Технология RapidIO. Перспективное решение связанных систем, ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технологии, Бизнес. 5/2006, с.90-95.
25. Ю.Шейнин, Т.Солохина, Я.Петричкович. Технология SpaceWare для параллельных систем и бортовых распределенных комплексов, ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технологии, Бизнес. 5/2006, с.64-75.
26. Ю.Шейнин, Т.Солохина, Я.Петричкович. Технология SpaceWare для параллельных систем и бортовых распределенных комплексов, ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технологии, Бизнес. 1/2007, с.38-49.
27. Gladkov M.N., Rudanov G.S. “Programmable Radio” Platform on the Basis of National Instruments PXI-System, -2008 18th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2008). 8-12 September, Sevastopol, Crimea, Ukraine.
28. Нечаев Ю.Б. Повышение точности пеленгации при использовании сверхразрешающих алгоритмов обработки / Е.С. Макаров, Ю.Б. Нечаев // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2008. — т.4, No2. — С. 59-62.
29. Слюсар В.И. Идеология построения мультистандартных базовых станций перспективных систем связи. – Радиоэлектроника (Изв. вузов), 2001, No 4, с. 3–12.
30. Сверхбольшие интегральные схемы и современная обработка сигналов: Пер. с англ./ Под ред. С.Гуна, Х.Уайтхауса, Т.Кайлата.- М.: Радио и связь, 1989. -472с.:илл.
31. Джонсон Д.Х. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения.// ТИИЭР, 1982, т.70, №9.
32. Гершман А.Б., Ермолаев А.Т., Флакман А.Г. Анализ

сверхразрешения некоррелированных источников излучения в адаптивных антенных решетках. // Изв. вузов. Радиофизика, 1988, №11.

33. Леховицкий Д.И. и др. Разновидности сверхразрешающих анализаторов пространственно-временного спектра случайных сигналов на основе обеляющих адаптивных решетчатых фильтров. Антенны, 2000, №2

34. Нечаев Ю.Б. Коррекция амплитудно-фазовых ошибок в антенных системах радиопеленгаторов / Е.С. Макаров, Ю.Б. Нечаев // Теория и техника радиосвязи. — 2008. — №3. — С. 44-53.

35. Stoica P., Nehorai Aryl, Performance comparison of subspace rotation and MUSIC methods for direction estimation, IEEE Trans. on Acoust., Speech., Signal Process, 1991, vol.39, no. 2

36. Нечаев Ю.Б. Сверхразрешающие алгоритмы в задаче азимутальной радиопеленгации с использованием кольцевых антенных решеток / С.А. Зотов, Е.С. Макаров, Ю.Б. Нечаев // Антенны. — 2007. — No7. — С.29-34.

37. Peter Keningt on, Philip Brown . SUNBEAM. RF Architectures and Components for Software Radio Adaptive Antenna Base Stations.- WSIL.Doc.AC347/WSI/A62/DS/P/008/b1,14December 1998. —<http://www.project-sunbeam.org>.

38. Интернет-ресурс: [www.nallatech.com](http://www.nallatech.com)

39. Интернет-ресурс: [www.alptech.com](http://www.alptech.com)

40. Nickel U. Angular superresolution with phased array radar: a review of algorithms and operational constraints. "IEEE Proc." Pt.F, 1987, Vol.134, №1, p.53-59.

41. Зотов С.А., Макаров Е.С., Нечаев Ю.Б., Методы сверхразрешения в задачах радиопеленгации. Научный журнал "Инновационные и информационные процессы и технологии в обществе и экономике" №3. / Под ред. профессора Ю.А. Корчагина. - Воронеж: РНЦИЭ, 2006. - 84 с.

42. Bhaskar, D., Rao and K.V.S. Hari, Performance analysis of ROOT – MUSIC, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989, vol. ASSP – 37, Dec, pp. 1939-1949.

43. Обработка сигналов и изображений средствами векторно-матричных вычислений /С.В.Мальцев, С.В.Абламейко, Р.П. Богуш. - Новополюк: ПГУ, 2011.-212 с.

44. Леховицкий Д.И., Атаманский Д.В., Кириллов И.Г. Разновидности «сверхразрешающих» анализаторов пространственно-временного спектра случайных сигналов на основе обеляющих адаптивных решетчатых фильтров // Антенны. — М., 2000. — Вып. 2 (45). — С. 40—54.

45. А. Силин. Технология Software Defined Radio. Теория, принципы и примеры аппаратных платформ, Беспроводные технологии, №2 07с.22-27

46. В. Вычужанин. Приложения для цифровой обработки сигналов в ПЛИС,-Современная электроника, №3,2011, с.66-71.

47. А.В. Захаров, В.М. Хачумов. Алгоритмы CORDIC. Современное состояние и перспективы / Программные системы: теория и приложения, Переславль-залесский, 2004., с 353-372.

48. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет антенн и СВЧ структур с

помощью HFSS Ansoft – М, ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009, 256 с.

49. Компьютерное моделирование. Программный пакет HFSS 12 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sites.google.com/site/komputernoemodelirovanie/home/stati/programmnyj-paket-hfss-12>. - Дата доступа 06.03.2013.

50. Кременя, К.И. Влияние толщины материала лопастей спирали и диэлектрической подложки на характеристики плоской логарифмической спиральной антенны./ Кременя, К.И., Янушкевич В.Ф.// Вестник ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. - Новополоцк, 2012. - №12-С.74-78.

51. Янушкевич В.Ф. Кременя К.И. Влияние формы плоской логарифмической спиральной антенны на ее рабочий диапазон частот Труды молодых специалистов: Выпуск 61. Промышленность, - Новополоцк, ПГУ 2012.-с.60-61.

52. Kremenia K., Yanushkevich V. Planar logarithmic spiral antenna. Материалы конференции молодых ученых, Полоцкий государственный университет, Новополоцк, 24-25 апр., 2013г.: в 3ч. - Новополоцк:ПГУ, 2013. - Ч. 3: Технология- 236с.

53. Разработка сверхширокополосной спиральной антенны Янушкевич В.Ф., Кременя К.И. Сборник статей лауреатов и авторов научных работ, получивших первую категорию, НИРС 2013, Минск, центр БГУ, с 160

54. Пат. на полезную модель 9207 РБ, МПК Н01 Q 11/08 Спиральная антенна / М.Е.Капралов, К.И.Кременя, В.Ф.Янушкевич, - Заявлено 02.11.2012г; Оpubл.; - 30.06.2013г.Оф.бюл.- 2013, №3 - с.229

55. Кременя, К.И. Моделирование эллиптической щелевой антенны в программном пакете HFSS /К.И.Кременя, В.Ф.Янушкевич// Вестник ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. - Новополоцк, 2013. - №4 с.46-49

56. Бездель А.О. Сверхразрешение источников излучения на основе метода «Теплового шума»/ Бездель А.О., Янушкевич В.Ф.// Вестник ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. - Новополоцк, 2012. - №12 с.64-68

57. Бездель, А.О. Сверхразрешение источников излучения на основе метода Кейпона /А.О.Бездель, В.Ф.Янушкевич // Вестник ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. Информатика. - Новополоцк, 2013. - №12 с.34-38

58. Бездель, А.О. Компьютерное моделирование сверхразрешения источников излучения на основе проекционного метода /А.О.Бездель, В.Ф. Янушкевич, В.М.Чертков // Вестник ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. Информатика. - Новополоцк, 2013. - №12 с.7-13