

# М Р радиоэлектроники

К.А. Баланис  
П.И. Иоанидес

Введение  
в смарт-антенны



ТЕХНОСФЕРА



**МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ**

*Специалисты радиозлектронного комплекса уже успели оценить серию книг «Мир радиозлектроники» за тщательный отбор научной и технической литературы по передовым направлениям развития науки и технологий радиозлектроники. Публикуемые в серии книги позволяют поддерживать современный уровень знаний, способствуя научно-техническому прогрессу в радиозлектронной промышленности, сокращению технологического отставания и подготовке необходимых кадров.*

*Директор Департамента радиозлектронной промышленности  
Минпромторга РФ  
А.С. Якуник*



**ТЕХНОСФЕРА**  
Рекламно - издательский центр

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ «МИР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

**Якунин Александр Сергеевич**, директор Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга РФ – председатель редсовета

### *Члены совета:*

**Авдонин Борис Николаевич**, ген. директор ОАО ЦНИИ «Электроника», д.т.н., профессор, г. Москва

**Акопян Иосиф Григорьевич**, ОАО «МНИИ «Агат», д.т.н., профессор, г. Москва

**Анцев Георгий Владимирович**, ген. директор ОАО «НПП «Радар ММС», г. Санкт-Петербург

**Белый Юрий Иванович**, ген. директор НИИП им. В.В.Тихомирова МО, г. Жуковский

**Боев Сергей Федотович**, ген. директор ОАО «РТИ», д.э.н., профессор, г. Москва

**Борисов Юрий Иванович**, первый заместитель председателя военно-промышленной комиссии при правительстве РФ, д.т.н., профессор, г. Москва

**Букашкин Сергей Анатольевич**, ген. директор РГНПО «Автоматика», д.т.н., профессор, г. Москва

**Бушуев Николай Александрович**, ген. директор ФГУП «НПП «Алмаз», д.э.н., профессор, к.ф.-м.н., г. Саратов

**Васильев Андрей Георгиевич**, д.ф.-м.н., профессор, г. Москва

**Верба Владимир Степанович**, ген. директор ОАО «Концерн радиостроения «Вега», д.т.н., профессор, г. Москва

**Верник Петр Аркадьевич**, ген. директор компании «Золотой Шар», г. Москва

**Вилкова Надежда Николаевна**, ген. директор ЗАО «МНИТИ», к.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва

**Гуляев Юрий Васильевич**, директор института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, академик РАН, г. Москва

**Козлов Геннадий Викторович**, ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей», д.т.н., профессор, г. Москва

**Комяков Алексей Владимирович**, ген. директор ФГУП «НПП «Полеет» г. Нижний Новгород

**Красников Геннадий Яковлевич**, ген. директор ОАО «НИИМЭ», академик РАН, г. Зеленоград

**Мальцев Петр Павлович**, директор Института СВЧ полупроводниковой электроники РАН, д.т.н., профессор, г. Москва

**Меньщиков Владислав Владимирович**, ген. директор ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей» г. Москва

**Минаев Владимир Николаевич**, ген. директор ОАО «Системы управления», д.т.н, профессор, г. Москва

**Муравьев Сергей Алексеевич**, советник директора Департамента Радиоэлектронной промышленности Минпромторга России, к.т.н., с.н.с., г. Москва

**Немудров Владимир Георгиевич**, директор ФГУП «НИИ микроэлектронной аппаратуры «Прогресс», д.т.н., профессор, г. Москва

**Попов Владимир Васильевич**, ген. директор ОАО «Светлана», к.т.н., г. Санкт-Петербург

**Сигов Александр Сергеевич**, ректор Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета), академик РАН, г. Москва

**Турилов Валерий Александрович**, ген. директор ОАО «КНИИТМУ», к.т.н., доцент, г. Калуга

**Федоров Игорь Борисович**, президент Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана, академик РАН, г. Москва

**Чапльгин Юрий Александрович**, ректор Московского государственного института электронной техники (ТУ МИЭТ), член.-корр. РАН, г. Зеленоград

**Шахнович Илья Владимирович**, шеф-редактор РИЦ «Техносфера», г. Москва

**Шубарев Валерий Антонович**, ген. директор ОАО «Авангард», д.т.н., профессор, г. Санкт-Петербург



# МИР радиоэлектроники

Константин А. Баланис  
Панайотис И. Иоанидес

Введение в смарт-антенны

Перевод с английского  
К.В. Юдинцева

под редакцией  
В.В. Попова,  
М.Д. Парнеса

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2012

УДК 621.396.67  
ББК 32.84  
Б20

Издание осуществлено при поддержке  
ЗАО «Светлана-Электронприбор»

**Б20 Баланис Константин А., Иоанидес Панайотис И.**

**Введение в смарт-антенны**

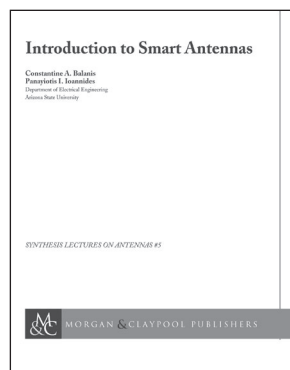
**Москва: Техносфера, 2012. – 200 с., ISBN 978-5-94836-312-7**

По мере увеличения спроса на системы подвижной связи возникает необходимость в увеличении зоны обслуживания, пропускной способности и более высокого качества передачи данных. Интеллектуальные (смарт) антенные системы предлагают эффективное решение проблем, имеющихся у современных систем беспроводной связи.

Цель данной книги — дать читателю максимально развернутое представление по системным аспектам смарт-антенн: приведен обзор принципов смарт-систем с включением ряда областей, имеющих большое влияние на них, исследуется вопрос, как взаимодействие и интеграция последних может влиять на специализированные сети мобильной связи MANET (Mobile Ad-hoc Network), приводятся общие принципы и главные преимущества использования пространственно-временной обработки, особенно систем с несколькими входами и выходами ММО (Multi-Input-Multi-Output).

Издание станет ценным справочником для студентов и аспирантов, инженеров, IT-директоров и руководителей соответствующих подразделений, а также всех специалистов, работающих в области беспроводной связи.

УДК 621.396.67  
ББК 32.84



Original English language edition published by Morgan and Claypool publishers  
Copyright © 2011 Morgan and Claypool Publishers  
All Rights Reserved Morgan and Claypool Publishers

© 2012, ЗАО «РИЦ «Техносфера», перевод на русский язык,  
оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-312-7

ISBN 978-159829176-6(англ.)

# Содержание

<b>Содержание</b> .....	<b>5</b>
<b>Краткое содержание</b> .....	<b>8</b>
<b>Ключевые слова</b> .....	<b>8</b>
<b>Предисловие редакторов перевода</b> .....	<b>9</b>
<b>Глава 1. Вступление</b> .....	<b>11</b>
<b>Глава 2. Обзор мобильной связи</b> .....	<b>14</b>
2.1. Общее описание.....	14
2.2. Обзор сотовой связи.....	15
2.3. Эволюция систем мобильной телефонной связи.....	16
2.4. Структура.....	18
2.5. Радиосистемы сотовой связи: концепции и эволюция.....	20
2.5.1. Всенаправленные системы и многократное использование канала.....	20
2.5.2. Секционирование сот.....	22
2.5.3. Секционированные системы.....	22
2.6. Регулирование мощности.....	24
2.6.1. Эффективность использования выделенного частотного спектра.....	25
2.7. Схемы коллективного доступа.....	27
2.7.1. Множественный доступ с разделением частот FDMA.....	27
2.7.2. Множественный доступ с временным разделением каналов TDMA.....	28
2.7.3. Множественный доступ с кодовым разделением каналов CDMA.....	29
2.7.4. Ортогональное частотное разделение каналов OFDM с мультиплексированием.....	31
<b>Глава 3. Антенные решетки и способы разнесенного приема</b> .....	<b>33</b>
3.1. Антенные решетки.....	33
3.2. Классификация антенн.....	34
3.2.1. Изотропные излучатели.....	34
3.2.2. Всенаправленные антенны.....	34
3.2.3. Направленные антенны.....	35
3.2.4. Фазированные антенные решетки.....	36
3.2.5. Адаптивные антенные решетки AP.....	36
3.3. Методы разнесенного приема.....	38
<b>Глава 4. Смарт-антенны</b> .....	<b>46</b>
4.1. Вступление.....	46
4.2. Необходимость в смарт-антеннах.....	46
4.3. Обзор.....	48
4.4. Конфигурации адаптивных антенн.....	50
4.4.1. Антенны с коммутацией луча.....	53
4.4.2. Адаптивные антенные системы.....	56
4.5. Множественный доступ с пространственным разделением каналов SDMA.....	60
4.6. Архитектура смарт-антенной системы.....	63
4.6.1. Приемная часть.....	63
4.6.2. Передающая часть.....	66

4.7. Преимущества и недостатки.....	68
4.8. Основные принципы.....	71
4.9. Эффекты взаимной связи.....	80
<b>Глава 5. Определение направления на источник сигнала. Основные положения.....</b>	<b>84</b>
5.1. Введение.....	85
5.2. Вектор отклика антенной решетки.....	86
5.3. Модель принятого сигнала.....	88
5.4. Подпространственная модель данных.....	91
5.5. Автоковариационные матрицы сигнала.....	93
5.6. Традиционные методы определения направления прихода сигнала.....	95
5.6.1. Стандартный метод формирования ДН.....	95
5.6.2. Метод наименьшей вариации Кейпона.....	96
5.7. Подпространственный подход оценки угла прихода сигнала.....	97
5.7.1. Алгоритм MUSIC.....	97
5.7.2. Алгоритм ESPRIT.....	100
5.8. Однозначность оценки углов прихода.....	103
<b>Глава 6. Принципы формирования ДН.....</b>	<b>105</b>
6.1. Классическое формирование ДН.....	107
6.2. Статистически оптимальные весовые вектора формирования ДН.....	108
6.2.1. Формирователь луча с максимальным SNR.....	109
6.2.2. Устройство подавления боковых лепестков и формирователь ДН с максимальным SINR.....	110
6.2.3. Минимальная среднеквадратическая ошибка MMSE.....	111
6.2.4. Прямое обращение матрицы DMI.....	113
6.2.5. Минимальная вариация с линейным ограничением LCMV.....	114
6.3. Адаптивные алгоритмы формирования ДН.....	116
6.3.1. Алгоритм наименьшего среднеквадратичного отклонения LMS.....	117
6.3.2. Рекурсивный алгоритм наименьших квадратов RLS (Recursive Least-Squares).....	119
6.3.3. Алгоритм для сигналов с постоянной амплитудой CM (Constant-Modulus).....	121
6.3.4. Алгоритм аффинной проекции AP (Affine-Projection).....	123
6.3.5. Квазиньютоновский алгоритм QN (Quasi-Newton).....	124
<b>Глава 7. Интеграция и моделирование смарт-антенн.....</b>	<b>126</b>
7.1. Обзор.....	126
7.2. Разработка антенны.....	127
7.3. Взаимная связь.....	129
7.4. Адаптивные алгоритмы обработки сигнала.....	130
7.4.1. Направление прихода.....	130
7.4.2. Адаптивное формирование ДН.....	132
7.4.3. Формирование ДН и сложение разнесенных сигналов в каналах с релейским замиранием.....	133
7.5. Решетчатое кодирование для адаптивных решеток TCM (trellis-coded modulation).....	135
7.6. Смарт-антенные системы для MANET-сетей.....	137
7.6.1. Протокол.....	138
7.6.2. Моделирование.....	139

7.7. Пояснения.....	143
<b>Глава 8. Пространственно-временная обработка.....</b>	<b>145</b>
8.1. Вступление.....	145
8.2. Модели сигнала и дискретного пространственно-временного канала.....	151
8.3. Пространственно-временное формирование луча.....	155
8.4. Подавление межсимвольных и внутриканальных помех.....	157
8.4.1. Подавление межсимвольных помех ISI.....	158
8.4.2. Подавление внутриканальных помех CCI.....	159
8.4.3. Одновременное подавление межсимвольной и внутриканальной помехи.....	159
8.5. Пространственно-временная обработка для DS-CDMA.....	160
8.6. Пропускная способность и скорость передачи данных в MIMO-системах.....	161
8.6.1. Ограничения скорости передачи для одного пользователя.....	163
8.6.2. Предел скорости передачи при коллективном использовании канала.....	163
8.6.3. Ограничения скорости передачи данных в сотовой системе.....	166
8.6.4. MIMO-система в сетях WLAN.....	168
8.7. Заключение.....	172
<b>Глава 9. Коммерческая доступность смарт-антенн.....</b>	<b>173</b>
<b>Глава 10. Заключение.....</b>	<b>180</b>
<b>Благодарности.....</b>	<b>181</b>
<b>Литература.....</b>	<b>182</b>
<b>Предметный указатель.....</b>	<b>196</b>



## Краткое содержание

По мере увеличения спроса на системы подвижной связи, возникает необходимость в увеличении зоны обслуживания, пропускной способности и более высоком качестве передачи данных. Таким образом, необходимо более эффективное использование выделенного частотного спектра. Интеллектуальные (смарт) антенные системы предлагают эффективное решение проблем, имеющихся у сегодняшних систем беспроводной связи, и способны обеспечить более эффективное использование радиоспектра и каналы надежной высокоскоростной передачи данных. Цель данной книги состоит в том, чтобы дать читателю максимально развернутое представление по системным аспектам смарт-антенн. Фактически техника смарт-антенных систем включает ряд важных областей, таких как индивидуальное проектирование антенных решеток, алгоритмов обработки сигналов, пространственно-временная обработка, моделирование беспроводного канала и кодирование и быстродействие радиосетей. В данной книге дается обзор принципов смарт-систем с включением ряда областей, имеющих на них большое влияние, а также исследуется вопрос, как взаимодействие и интеграция последних могут влиять на специализированные сети мобильной связи MANET (Mobile Ad-Hoc Network). Кроме того, приводятся общие принципы и главные преимущества использования пространственно-временной обработки особенно систем с несколькими входами и выходами MIMO (Multi-Input-Multi-Output).

### Ключевые слова

Адаптивные решетки, антенны с коммутируемым лучом, фазированная решетка, SDMA, взаимная связь, направление прихода сигнала, адаптивное формирование луча, канальное кодирование, MANET, пропускная способность сети, пространственно-временная обработка.

## Предисловие редакторов перевода

Константин Баланис, профессор Аризонского университета, известен как автор одной из самых удачных книг по теории антенн, рекомендованных в качестве учебного пособия в университетах США и Европы<sup>1</sup>. Предлагаемая новая книга представляет собой введение в технику и теорию нового поколения современных антенных решеток, оснащенных процессорной обработкой сигнала.

Начало таких работ было сделано в военной технике, но достижения военной электроники и технологии находят свое применение и в гражданских приложениях. Можно назвать и обратную ситуацию, когда новые схемы из гражданской промышленности активно развились и воплотились в целое направление военной электроники. Так, например, было с первой фазированной антенной решеткой, созданной в США русским ученым С.А. Шелкуновым, с помощью которой была решена проблема замирания радиосигналов (фединг). Антенна содержала решетку излучателей, управляемые фазовращатели и сумматор радиосигнала. В последующие десятилетия это направление — фазированные антенные решетки — активнейшим образом стало использоваться в военных радарх и системах связи. Сейчас эти идеи возвращаются в аппаратуру широкого применения: мобильные телефоны, системы беспроводного доступа в интернет и так далее. Первая монография, посвященная адаптивным антенным решеткам<sup>2</sup>, вышла на русском языке в 1991 г. Ее автором был ведущий специалист по антенной технике в СССР — А.А. Пистолькорс. Предлагаемый читателю перевод книги К. Баланиса посвящен современным разделам антенной техники — адаптивными антенным решеткам, или смарт-антеннам.

«Смарт-антенна» — это американский технический жаргон. К сожалению, мы не нашли подходящего русского эквивалента этому термину и, таким образом, вводим этот технический термин и в русскую техническую литературу. В монографии К. Баланиса излагаются основы построения смарт-антенн. В ней дан обзор практически всех работ, опубликованных за рубежом. Прекрасная библиография из 232 источников поможет заинтересованным инженерным и научным работникам быстро освоить достижения в этой области антенной техники, используемые алгоритмы управления сигнальными процессорами в антенных системах и их математическое обеспечение.

Создание ФАР в середине прошлого века дало огромный толчок к развитию высокочастотной элементной базы: фазовращателей, аттенюаторов, мало-

---

<sup>1</sup> Constantine A. Balanis, «Advanced Engineering Electromagnetics», John Wiley & Sons, Inc., 1, 1989.

<sup>2</sup> А.А. Пистолькорс, О.С. Литвинов, «Введение в теорию адаптивных антенн» М.: Наука, стр. 200, 1991

габаритных усилителей, ферритовых устройств и т. д. Для широкого внедрения смарт-антенн потребуются эти же устройства, но уже в интегральном исполнении, а также сигнальные процессоры, которые являются, пожалуй, основной частью адаптивных антенных решеток. Внедрение таких антенн в различные системы связи, как наземные, так и спутниковые, позволит достичь нового качественного и количественного уровня в скорости передачи цифровых данных, борьбы с пассивными и активными помехами, что в условиях все более сложной эфирной обстановки становится очень актуальным.

В России пока немного компаний занимается проектированием базовых станций, интернет-терминалов и мобильных телефонов и, видимо, у этой книги не будет массового читателя. Но, как это уже неоднократно было в технике, достижения из гражданских систем могут внедряться и в военные станции, оборудование для полиции, для систем глобального позиционирования, везде, где используются антенные решетки. Активность российских инженеров, поддержка государством наукоемких областей позволяют надеяться на то, что отечественная гражданская электроника выйдет в скором времени на международный рынок. В различных исследовательских центрах России ведутся разработки базовых станций WiMaX, навигационной системы ГЛОНАСС, систем беспроводного доступа в интернет. Эта книга станет подспорьем в проектировании современных антенн для этих радиосистем.

*Парнес Михаил Давидович, Попов Владимир Васильевич*

# ГЛАВА I

## ВСТУПЛЕНИЕ

В последние годы наблюдается существенное развитие беспроводных технологий широкополосного доступа, направленных на улучшение качества услуг беспроводного интернета и систем сотовой связи [1]. Из-за этого в будущем предвидится огромный рост нагрузки на линии мобильной и персональной связи [2]. Он обусловлен как ростом количества пользователей, так и появлением услуг высокоскоростной передачи данных. Такая тенденция наблюдается для систем второго поколения и наверняка перейдет на системы третьего поколения. Рост объема передаваемой информации потребует как от производителей оборудования, так и поставщиков услуг обеспечения достаточно высокой пропускной способности сетей [3]. Так как предел пропускной способности обусловлен рядом ограничивающих факторов излучающей среды, решение данной задачи становится критически важным для поставщиков услуг [4].

Главной причиной уменьшения пропускной способности являются межканальные помехи, обусловленные ростом количества пользователей. К другим факторам снижения производительности системы и ее пропускной способности относятся интерференционное замирание и задержки в распространении, обусловленные отражением сигнала от зданий и рельефом местности, а также мобильностью пользователей. Вопрос пропускной способности обострился в 90-х годах, когда Интернет дал возможность получать данные по запросу (котировки акций, новости, метеосводки, электронная почта и т. д.) и обмениваться информацией в реальном времени. Это привело к увеличению использования эфирного времени и количества абонентов и, таким образом, к насыщению пропускной способности системы.

Операторы мобильной связи стали искать новые способы максимального увеличения эффективности использования выделенных частотных спектров своих сетей и увеличения рентабельности [5]. В настоящее время во всем мире ведутся исследования, направленные на улучшение производительности беспроводных систем. Внедрение современной технологии смарт-антенн (SA) беспроводной связи обещает реализацию высокоэффективных сетей с максимальной пропускной способностью, улучшение качества услуги и расширение зоны покрытия [6]. Смарт-антенны в последние годы пользуются заслуженным вниманием [6—11] в связи с тем, что они могут повысить пропускную способность (очень важный фактор в городских условиях и плотно заселенных районах) за счет динамической отстройки от помехи с одновременной фокусиров-

кой на необходимом абоненте [12, 13], вкуче с впечатляющими улучшениями в области цифровой обработки сигнала.

Избирательные управляющие алгоритмы с predetermined критериями обеспечивают адаптивные решетки уникальной способностью к изменению характеристик диаграммы направленности (нулей, уровней боковых лепестков, направленности основного лепестка и его ширины). Эти управляющие алгоритмы обязаны своим появлением сразу нескольким дисциплинам и предназначены для использования в конкретных областях применения (например в сейсмологии, подводных работах, воздушно-космическом пространстве и в последнее время — в сотовой связи) [14]. Коммерческое внедрение SA обещает большой прирост системной производительности с точки зрения пропускной способности, зоны покрытия и качества сигнала, что в целом, в конечном итоге, приведет к повышению эффективности использования выделенного частотного спектра [14].

По мере роста необходимости в обмене и коллективном использовании данных, пользователи, где бы они ни находились — на работе, дома или в движении, требуют обеспечить им возможность подключения к быстрым сетям с большой зоной обслуживания. Более того, пользователи также заинтересованы в возможности по желанию устанавливать соединения между всеми их персональными электронными устройствами PED (personal electronic devices) в режиме *ad hoc* (для данного случая — в пер. с латыни). Сеть такого типа получила название самоконфигурируемой мобильной специальной сети (MANET) и начинает появляться на основе технологии беспроводной связи Bluetooth.

Bluetooth™ представляет собой радиосвязь малого радиуса действия (10—100 м), обеспечивающую возможность создания канала связи и обмена данными между двумя или более устройствами [15, 16]. Так как в Bluetooth™ используется всенаправленная антенна для работы в промышленном, научном и медицинском диапазоне ISM (industrial, scientific, and medical — нелицензируемая полоса 2,4 ГГц), то она не способна обеспечить наведение на абонентов и регулировать степень чистоты сигнала для снижения помех. Все это ограничивает общую производительность системы, то есть пропускную способность MANET-сетей. Кроме того, так как всенаправленная антенна излучает энергию во всех направлениях, снижается время автономной работы персональных электронных устройств. Следовательно, преимущества, предлагаемые адаптивными антеннами, должны обеспечить улучшение общей производительности MANET-сетей [17].

Существующие тенденции сосредоточены на пространственно-временной обработке и кодировании цифрового сигнала, то есть перспективной технологии, обещающей значительное увеличение производительности беспроводных сетей за счет использования многоэлементных антенн для передачи и приема [18]. Пространственно-временная обработка может рассматриваться

Производство книг на заказ  
Издательство «Техносфера»  
тел. (495) 234-01-10  
e-mail: [knigi@technosfera.ru](mailto:knigi@technosfera.ru)

Реклама в книгах:

- модульная
- статьи

Подробная информация о книгах на сайте  
[www.technosfera.ru](http://www.technosfera.ru)

**Константин А. Баланис,  
Панайотис И. Иоанидес**

## **Введение в смарт-антенны**

Компьютерная верстка – С.С. Бегунов  
Корректор – Н.А. Шипиль  
Дизайн книжных серий – С.Ю. Биричев  
Дизайн – А.А. Давыдова  
Выпускающий редактор – О.Н. Кулешова  
Ответственный за выпуск – С.А. Орлов

---

Формат 70x100/16. Печать офсетная.  
Гарнитура Ньютон  
Печ.л. 12,5. Тираж 1500 экз. Зак. №  
Бумага офсет. №1, плотность 65 г/м<sup>2</sup>.

---

Издательство «Техносфера»  
Москва, ул. Краснопролетарская, д.16, стр.2

---

Отпечатано в ОАО «Чебоксарская типография №1»  
г.Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15