

## К СОРОКАЛЕТИЮ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ АНТЕНН

В настоящем обзоре в сжатом виде излагаются динамика развития СТА за сорок лет с момента ее зарождения в 1970 г., современное состояние этой теории, области ее применения.

### 1 Сущность и содержание СТА

Статистическая теория антенн (СТА) – это теория антенн со случайными источниками. Случайными могут быть: амплитуда, фаза, поляризация источников, их число и пространственное положение, размеры и форма излучающей апертуры и т.д. Конкретный механизм, порождающий флуктуации (ошибки) источников, может быть различным. В одних случаях они возникают внутри антенны. В других случаях они связаны с внешними факторами, например, с условиями распространения волны, падающей на антенну. Соответственно говорят о «внутренних» и «внешних» механизмах происхождения флуктуаций. Примеры этих механизмов показаны на рис. 1. Несмотря на различие рассмотренных примеров, суть одна и та же – мы имеем антенну, распределение поля в апертуре которой является случайным. Простейшими параметрами случайного поля могут служить дисперсия («амплитуда») флуктуаций (ошибок) случайного поля и их пространственный радиус корреляции  $\rho$  (рис. 1).

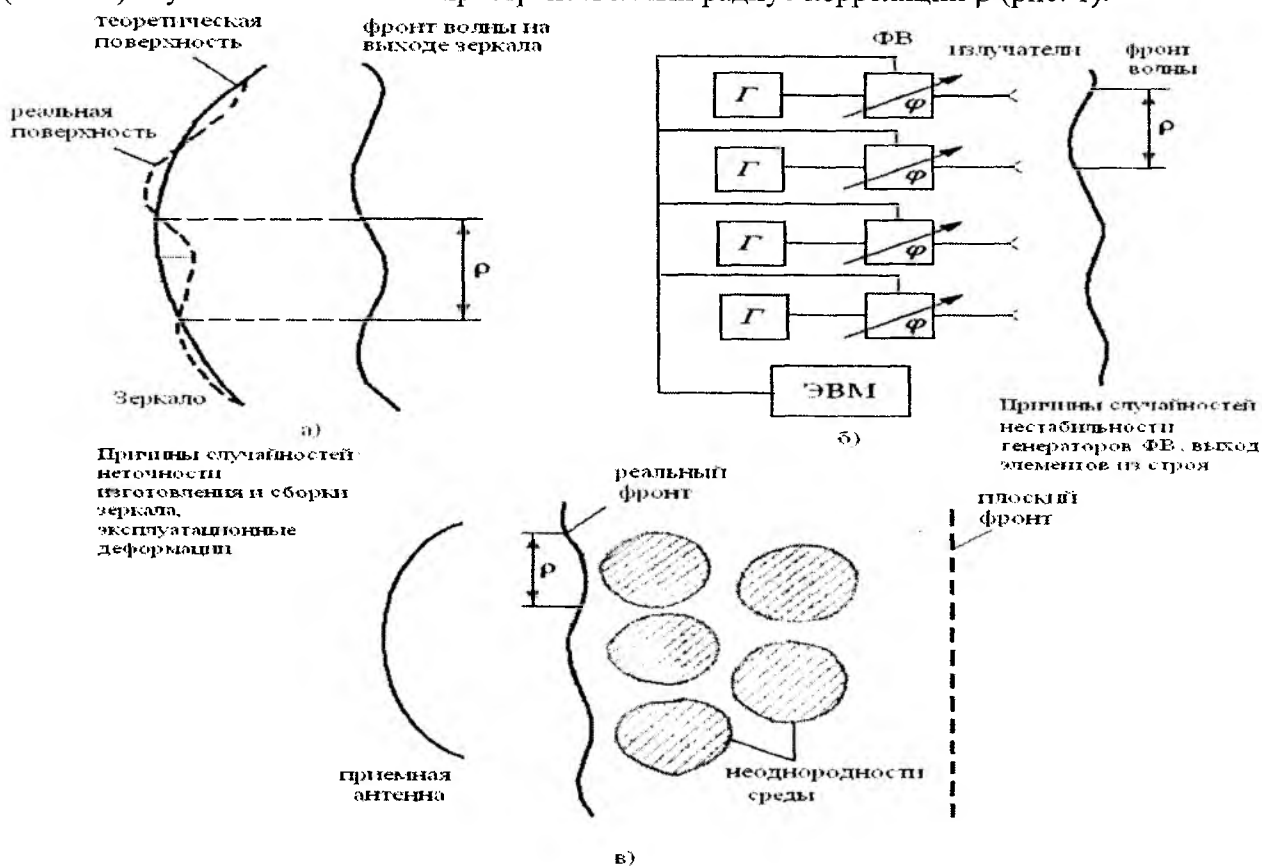


Рис. 1

Приведенные примеры иллюстрируют также и то, что при статистическом подходе к изучению характеристик антенн следует различать статистику по ансамблю (семейству) однотипных антенн и статистику во времени отдельной антенны. В первом случае изучается разброс характеристик однотипных антенн по ансамблю. Причинами такого рода разброса

могут быть неточности изготовления антенн, неоднородности материала, из которого они изготовлены, и т.д.

Во втором случае рассматривается разброс по времени характеристик одной и той же антенны. Причинами подобного разброса могут быть нестабильности параметров элементов антенны, эксплуатационные деформации, изменение параметров среды распространения волны и т.д.

Наличие случайностей в антенне ухудшает ее характеристики, ограничивает их предельно достижимые значения. Это в особой мере проявляется в крупных антеннах. А такие антенны очень дороги (порой стоимость их составляет пятьдесят и более процентов от общей нередко многомиллионной стоимости крупной РТС или радиотелескопов). Поэтому очень важно знать причины и характер случайностей в них, каково их влияние на параметры антенны, уметь синтезировать антенны с учетом присутствующих в них случайностей, знать возможности ослабления их влияния. Решение комплекса этих вопросов и составляет предмет СТА.

Как и в обычной (детерминированной) теории антенн в СТА можно выделить два больших раздела, посвященных соответственно решению прямых и обратных задач (рис. 2).



Рис. 2

Прямая задача состоит в определении статистики поля антенны по заданной ее структуре – конструкции и условиям возбуждения, механизму происхождения флуктуаций тока или поля в антенне. Обычно эта задача разбивается на две решаемые независимо – внутреннюю и внешнюю. Цель решения внутренней задачи – нахождение статистики распределения источников в антенне, в простейшем случае, дисперсии флуктуаций случайного поля  $\alpha$  и их радиуса корреляции  $\rho$ . После их нахождения мы переходим к решению внешней задачи, которая заключается в отыскании статистики поля антенны по найденным или заданным  $\alpha$  и  $\rho$ . Обычно изучают три группы статистических характеристик: средние значения характеристик (параметров) антенны, их флуктуации и корреляционные свойства поля антенны. Последние характеризуют связь поля антенны в смежных точках пространства.

Обратная задача СТА имеет своей целью определение статистической структуры антенны по заданной статистике поля ее излучения. Обратные задачи могут быть сформулированы как задачи синтеза (оптимизации) и как задачи восстановления. Подобно прямым задачам обратные задачи также делятся на внутреннюю и внешнюю, но последовательность их решения, по сравнению с прямыми задачами, обратная. Вначале решается внешняя задача. Цель ее решения в задачах синтеза – найти статистику распределения источников в антенне, обеспечивающую оптимальные, в том или ином смысле заданные статистические характеристики поля излучения антенны. В задачах восстановления требуется по известной (измеренной) статистике поля излучения антенны определить, что ее «породило», то есть какая статистика источников в антенне имеет место. После решения внешней задачи решению подлежит внутренняя задача. В задачах синтеза цель ее решения – определить структуру антенны, которая обеспечит требуемое (найденное в ходе решения внешней задачи) распределение источников в антенне. В задачах восстановления внутренняя задача имеет своей целью установить, какому состоянию антенны (или каким параметрам среды распространения волн) отвечает найденная в ходе решения внешней задачи статистика источников в антенне.

## **2. Становление СТА и ее состояние к началу 70-х годов XX века**

Статистическая теория антенн берет свое начало от статистической теории допусков 50-х годов. Наиболее известными из этих работ являются работы Рузе [1] и Робье [2]. В этих работах рассматривалось влияние неточностей изготовления поверхности зеркальных антенн (ЗА) на их характеристики. Основное внимание уделялось изучению средних диаграмм направленности (ДН) и среднего коэффициента направленного действия (КНД). Поскольку рассмотрение велось с позиций теории допусков, то случайные ошибки в амплитудно-фазовом распределении (АФР) поля полагались малыми. Радиус корреляции их также полагался малым по сравнению с размерами антенны. Эти допущения существенно ограничивали значимость полученных результатов, область их применимости. Тем не менее, уже на этом начальном этапе было установлено, что случайности в антенне приводят к «размыванию» ДН, снижению ее КНД, повышению уровня бокового излучения (УБИ).

С течением времени актуальность изучения вопросов о влиянии случайностей в антеннах на их характеристики резко усилилось. Это было обусловлено, прежде всего, существенным повышением требований к характеристикам радиотехнических устройств, используемых в радиолокации, космической связи, радиоастрономии т.д. Стремление улучшить характеристики радиотехнических устройств нашло свое отражение в увеличении электрических размеров антенн и внедрении в практику сложных многоэлементных ФАР. С увеличением электрических размеров антенн и усложнением их конструкций усилилась роль различных факторов, порождающих случайности в антенне. Помимо неточностей изготовления ЗА возникла необходимость учитывать неточности сборки этих антенн, выполняемых зачастую из отдельных панелей, деформации структуры, поддерживающей зеркало, случайные эксплуатационные деформации – весовые, ветровые, температурные, радиусы корреляции которых уже нельзя считать малыми.

Для сложных многоэлементных ФАР (особенно активных) характерно наличие многих источников случайных ошибок. В их числе – неточности изготовления, нестабильности параметров элементов решетки, схемы возбуждения и обработки сигналов, выход элементов из строя и т.п. Без учета влияния этих случайностей нельзя правильно спроектировать ФАР. Так как крупные ЗА и ФАР чрезвычайно дороги, то вопросы, связанные с оценкой влияния случайностей на характеристики крупных ЗА и ФАР, возможности ослабления этого влияния при выборе конструкции антенны и в процессе ее эксплуатации приобрели первостепенное значение. Все это побудило нас, начиная с 1959 г., провести серию исследований, направленных на построение достаточно общей статистической теории влияния случайностей на характеристики антенн, пригодной при произвольных значениях дисперсии флуктуаций и их радиусов корреляции. Прямым толчком к этому явилось четкое осознание нами того, что

причиной появления случайностей в апертуре антенны могут быть и «внешние» механизмы. Типичный пример – работа приемной антенны на линиях дальнего тропосферного распространения радиоволн (ДТР), исследованием которого мы активно занимались в 50 - 60 годы. В этом случае (рис. 3) прямой луч передающей антенны в приемную антенну не попадает, и поле в апертуре последней, создаваемое неоднородностями в рассеивающем объеме, зачастую имеет резко флуктуационный характер.

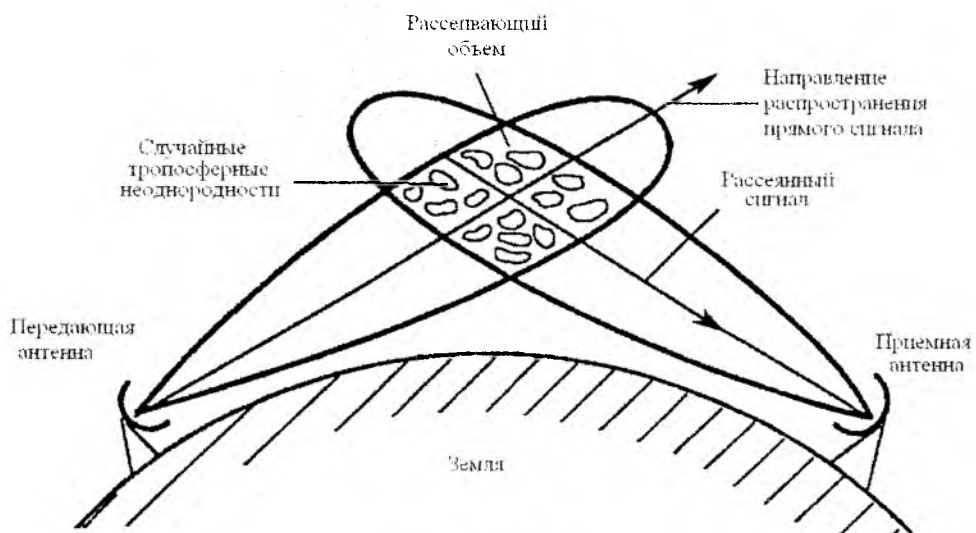


Рис. 3

При этом параметры антенны существенно искажены по сравнению со случаем, когда фронт волны в антенне плоский. Мы экспериментально получали [3] потери КНД приемной антенны в 6 - 8 дБ, расширение ДН в два-три раза, нередко наблюдались даже развалы мгновенных ДН (рис. 4)<sup>1</sup>.

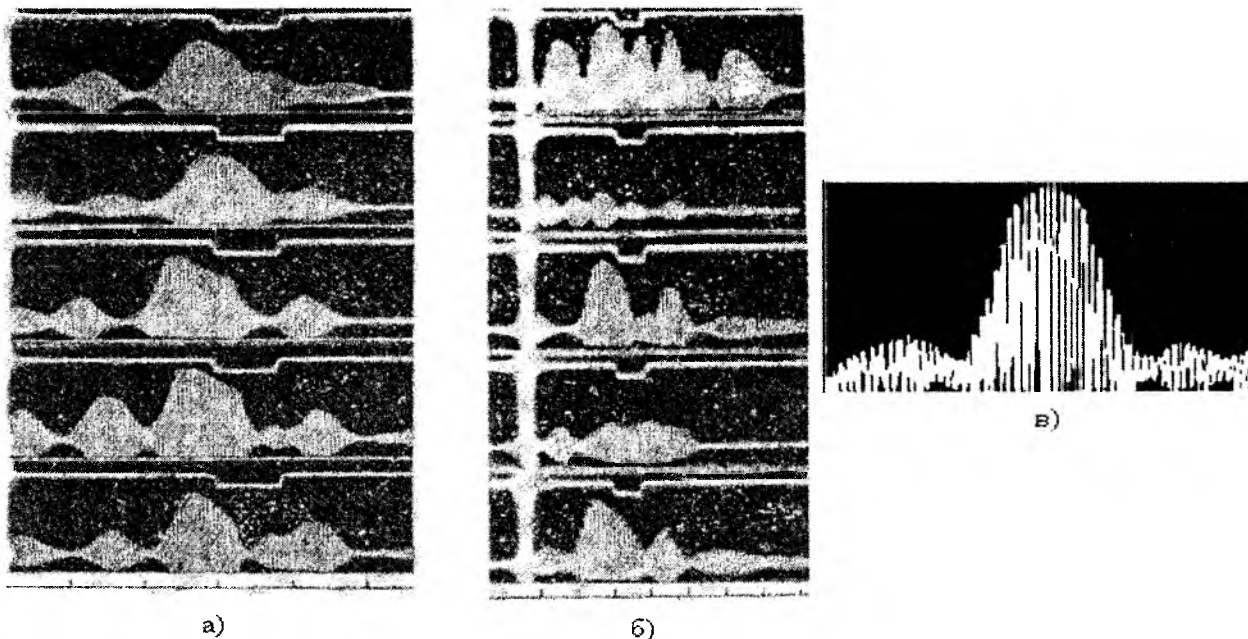


Рис. 4

<sup>1</sup> Под мгновенными ДН (МДН) при ДТР понимаются [3] ДН приемной антенны снятые за время, при котором поле у приемной антенны можно считать «замороженным».

Сходная с ДТР ситуация имеет место и в системах дистанционного зондирования атмосферы (ДЗА), использующих в качестве информационного сигнала поле, отраженное от турбулентной атмосферы. Заметные искажения поля в апертуре приемной антенны имеют место также и на линии загоризонтной радиолокации (ЗГ РЛС). В этом случае, правда, в антенну попадает «прямой» сигнал, но, поскольку он проходит большое расстояние в канале Земля-ионосфера, то поле, падающее на приемную антенну, весьма искажено, что было подтверждено нами экспериментами на одной из ЗГ РЛС. Наконец, следует отметить, что даже на линии прямой видимости распределение поля в апертуре приемной антенны может быть заметно случайным, если размеры антенны соизмеримы с размерами случайных неоднородностей среды, в которой распространяется падающая на антенну волна.

Предположение о произвольных значениях дисперсии и радиуса корреляции флуктуаций существенно вывело разрабатываемую теорию за рамки теории допусков. Стало ясно и то, что при включении в рассмотрение «внешних» механизмов флуктуаций рассматриваемая проблема связана с проблемой дифракционного изображения фокусирующих систем [4], давно интересовавшей специалистов по астрономии, оптике, гидроакустике, радиофизике (например, при изучении «мерцания» и «дрожания» изображения звезд в телескопах). В основе такой связи лежит отмеченное в [5] положение о том, что при заданной статистике поля в апертуре формулы, описывающие поле в дальней зоне антенны и формулы, описывающие поле в фокальной плоскости параксиальной фокусирующей системы, одинаковы. Это обстоятельство позволило объединить ряд ранее разрозненных направлений исследований в одно общее направление, названное нами **статистической теорией антенн**. Такое объединение оказалось плодотворным в методическом и расчетном планах. В частности, оно позволило обобщить ряд результатов, полученных ранее Л.А Черновым при изучении им статистики дифракционного изображения фокусирующих систем [4]

Выполненные нами в 60-е годы исследования по построению основ СТА были суммированы в монографии «Вопросы статистической теории антенн», вышедшей в свет в 1970 г. [5]. Этот год и можно считать годом «рождения» СТА. Заметим, что сразу же после опубликования книга была переведена на английский язык («Statistical Antenna Theory», Golem Press, 1971). Вкратце о содержании указанной книги. Основное внимание в ней уделено прямым внешним задачам. Для простоты анализа изложение основ СТА проведено на примере простейшей антенны – линейной непрерывной синфазной системы с равномерным амплитудным распределением (АР) и случайными фазовыми ошибками (рис.5).

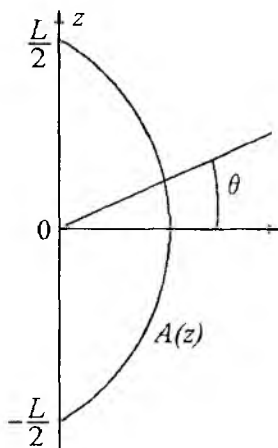


Рис. 5

Комплексный множитель такой системы имеет следующий вид:

$$f(\psi) = A_0 \int_{-1}^{+1} e^{j[\varphi(x) + \psi x]} dx, \quad (1)$$

где  $\psi = \frac{\pi L}{\lambda} \sin \theta$ ;  $L$  – длина антенны;  $\lambda$  – длина волны;  $\theta$  – угол, отсчитываемый от нормали к оси системы;  $x = 2z/L$  – относительная координата;  $z$  – координата вдоль антенны. Функция  $\varphi(x)$ , описывающая ошибки, считается нормальной, однородной, случайной функцией со средним значением  $\overline{\varphi(x)} = 0$ , дисперсией  $\overline{\varphi^2(x)} = \sigma^2(x) = \alpha$  и коэффициентом корреляции

$$r = \frac{\overline{\varphi(x)\varphi(x_1)}}{\sigma(x)\sigma(x_1)} = \frac{\overline{\varphi(x)\varphi(x_1)}}{\alpha} = r(x-x_1).$$

Конкретные расчеты выполнены в книге [5] для гауссовой и экспоненциальной форм коэффициентов корреляции

$$r = e^{-\frac{(x-x_1)^2}{c^2}} \quad \text{или} \quad r = e^{-\frac{|x-x_1|}{c}},$$

где  $c$  – радиус корреляции в относительных единицах, связанный с радиусом корреляции фазовых ошибок вдоль антенны  $\rho$  соотношением  $c = 2\rho/L$ . Удобно далее принять  $A_0 = 1/2$ . При этом множитель системы в отсутствие ошибок  $f_0(\psi) = \sin \psi / \psi$ . Поле в направлении главного максимума (НГМ) будет равно единице. Так как  $\varphi(x)$  случайно, то  $f(\psi)$  – случайная функция обобщенного угла  $\psi$  и представляет собой одну из реализаций множителя системы. Для данной реализации находится та или иная характеристика антенны, например, ДН по мощности

$$|f(\psi)|^2 = f(\psi) f^*(\psi) = \frac{1}{4} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} e^{j[\varphi(x)-\varphi(x_1)]} e^{j\psi(x-x_1)} dx dx_1,$$

или КНД, или направление положения главного максимума и т.п., и затем, путем усреднения по большому числу реализаций (по ансамблю или по времени), находится среднее значение соответствующей антенной характеристики. Используя далее известные подходы и аппарат теории случайных функций, можно также рассчитать флуктуации антенных параметров и корреляционные свойства поля антенны.

Следуя этой схеме, в первой части книги [5] последовательно изучены: средние характеристики антенны, флуктуации ее основных параметров, корреляционные характеристики поля излучения антенны. В ходе анализа основной интерес представляет, естественно, не вычислительная сторона дела, а выявление основных эффектов, характеризующих изменение параметров антенны при наличии случайностей в распределении источников. Приведем лишь один пример, иллюстрирующий, как влияют случайности на ДН антенны (рис.6, а, б). Как видно из рис.6, на котором показаны средние ДН линейной антенны (рис. 6, а - при разных  $\alpha$ ;  $c=0,5$ ; рис. 6, б - при разных  $c$ ;  $\alpha = 1$ ) ошибки в антенне приводят к сглаживанию ДН, изменению ее формы – заполнению нулей, уменьшению поля в главном направлении, росту УБИ, расширению ДН. Видно также, что с увеличением дисперсии ошибок характер средней ДН меняется – осциллирующая кривая трансформируется в монотонно спадающую. К числу других статистических эффектов можно отнести: снижение КНД, уход направления главного максимума, флуктуации всех антенных параметров и т.д.

Важным для практики является выяснение ограничений, налагаемых случайностями на характеристики антенн. С этими ограничениями связано появление в СТА таких новых эффектов, как предельный КНД, насыщение КНД, статистический и предельно достижимый УБИ, минимально допустимая рабочая волна в зеркальных антеннах и т.д. Случайные ошибки ограничивают (причем весьма существенно) проявление эффектов сверхнаправленности антенн при их синтезе

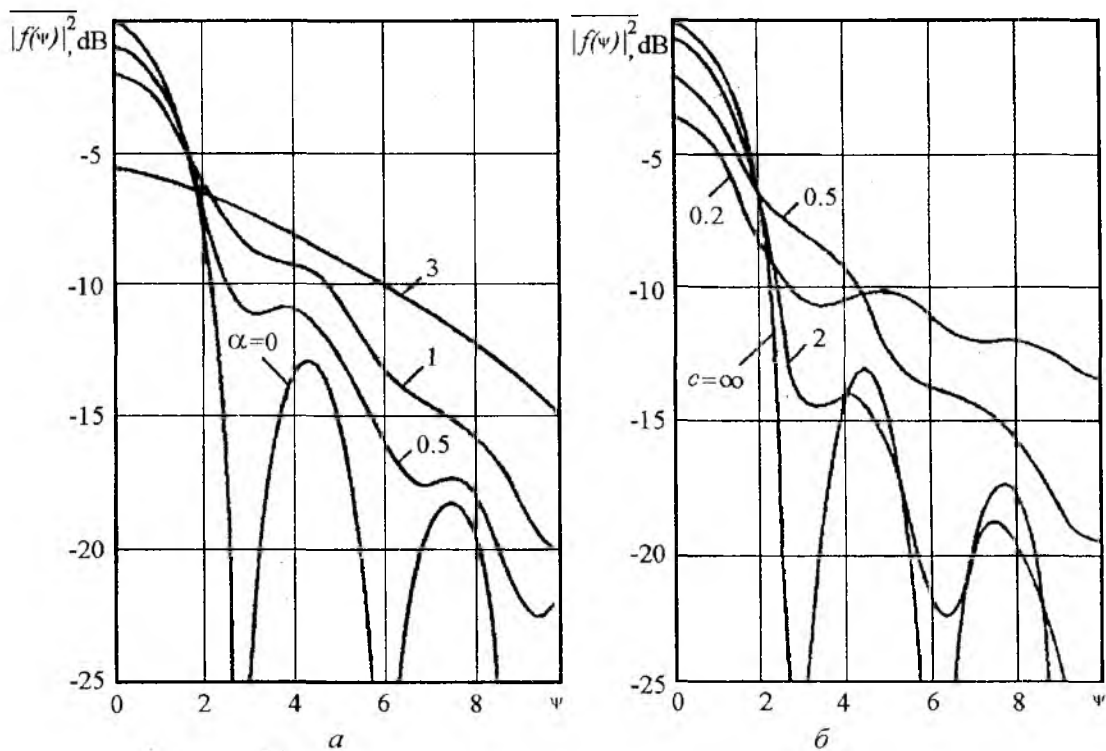


Рис. 6

Важно и то, что при статистическом подходе к исследованию антенн целый ряд привычных понятий обычной теории антенн нуждается в корректировке или переопределении. Так, например, в теории антенн существуют понятия нормированной ДН, КНД, ширины ДН и т.д. При статистическом подходе следует, оказывается, различать среднюю нормированную ДН и нормированную среднюю ДН, средний КНД можно определить различными способами (и результат будет различным); среднее значение максимального КНД и максимальное значение среднего КНД – величины разные; различаются также ширина средней ДН и средняя ширина ДН и т.д. В зависимости от конкретной ситуации, целесообразно использовать либо одно, либо другое определение КНД, ширины ДН и т.д.

Теперь кратко о содержании второй и третьей частей книги [5].

Во второй части книги показано, что постановка и методика решения внешних прямых задач СТА, развитые в первой части книги применительно к простейшей антенне, остаются неизменными и для более сложных антенн, и в этом плане результаты первой части являются достаточно общими. Вместе с тем, для каждого класса антенн имеются свои особенности как в вычислительном плане, так и по полученным результатам, а иногда и по характеру статистических эффектов. Здесь особенно следует отметить антенны бегущей волны (АБВ), у которых наряду с ошибками локального характера, типичными для антенн поперечного излучения, имеются и нелокальные ошибки, – возникающие в каком-то месте случайные возмущения параметров системы оказывают свое влияние на амплитуды и фазы всех последующих источников. Нелокальные ошибки сказываются на статистике поля антенны качественно иначе, чем локальные.

Третья часть книги посвящена исследованию статистики поля в фокальной плоскости антенны при падении на нее волны с флуктуациями амплитуды и фазы, вызванными неоднородностями среды распространения. Знание статистики поля в фокальной плоскости необходимо при решении ряда актуальных задач, например определении точности моноимпульсных систем, исследовании эффективности систем углового разнесенного приема при ДТР, потерь усиления при ДТР и т.д. В этой же части книги приводятся и результаты наших экспериментальных исследований по ДТР. Отмечено, что линия ДТР представляет собою удобную, созданную самой природой, установку для наблюдения эффектов временной антенной

статистики. Показано, что экспериментальные результаты подтверждают (по крайней мере, качественно) теоретические выводы СТА.

Приведенный выше краткий обзор содержания книги [5] и приведенная в этой книге библиография характеризуют в общих чертах состояние СТА к началу 70-х годов прошлого столетия.

За прошедшие после 1970 г. сорок лет было опубликовано множество работ по разным аспектам общей СТА. Динамика развития СТА уже рассматривалась в опубликованных ранее работах [6 - 9]. В этих обстоятельных работах охвачен период вплоть до 2000 г. Поэтому, анализируя далее современное состояние СТА, мы будем часто ссылаться на эти работы, дополняя их новыми результатами, полученными за последний десяток лет.

### 3. Основные направления развития СТА, ее современное состояние

#### 3.1. Прямые внешние задачи

Этим задачам, в различной их постановке, посвящена большая часть опубликованных работ. Условно классифицировать их можно следующим образом.

Первая группа.

1) *Распространение теории*: на разные классы непрерывных и дискретных антенн для различных диапазонов волн (включая антенны развертываемые в космосе) при разных внутренних и внешних механизмах происхождения ошибок (флуктуаций) [6, 7]<sup>2</sup>. Основное внимание уделяется изучению «традиционных» характеристик – средней ДН, среднего КНД, УБИ. Методика исследования сходна с используемой в книге [5]. Качественно аналогичными оказываются и результаты исследований.

К числу наиболее интересных работ этой группы, выполненных в последнее время, можно отнести работы [10 - 14]. Первая из этих работ содержит наиболее полное, по сравнению с ранее опубликованными работами, изложение основ статистической теории антенных решеток. Вторая работа посвящена статистике кольцевых антенных решеток, широко используемых ныне в разных радиотехнических приложениях. Указаны типичные механизмы случайностей в таких антеннах и выяснено влияние каждого из них на среднюю ДН. В третьей и четвертой работах рассматривается статистика поля акустических решеток, используемых зачастую в аппаратуре ДЗА, – содарах и системах радиоакустического зондирования (РАЗ). Характерным для этих решеток является небольшое число излучателей в них (до нескольких десятков) и присущие излучателям этих решеток (громкоговорителям) большие ошибки (до десятков градусов по фазе). Оба этих фактора усиливают значимость статистических эффектов, в частности приводят к недопустимому росту УБИ. Приводятся оценки статистических эффектов для двух конкретных образцов акустических решеток систем ДЗА, подтверждающие весомость статистических эффектов в подобных решетках и, соответственно, необходимость учета их при проектировании таких решеток.

Особо стоит отметить книгу [14], в которой впервые детально рассмотрен вопрос о влиянии случайных ошибок на характеристики многоканальных **активных** ФАР. В активных решетках появляется много дополнительных источников фазовых и амплитудных ошибок. Описана процедура пересчета ошибок, возникающих в отдельных звеньях каждого канала решетки в ошибки на апертуре. Отмечено, что в «многоэтажных» активных решетках, как и в АБВ, имеют место нелокальные ошибки, и поэтому результирующие ошибки в апертуре могут быть достаточно большими, что приведет к значительному снижению энергетике АФАР и существенному ухудшению других ее параметров, в частности ее УБИ. Обсуждаются пути ослабления влияния случайных ошибок на характеристики АФАР.

Рассмотрим теперь другие группы работ по внешним прямым задачам.

2) *Исследование влияния случайных ошибок в антенне на структуру ее бокового излучения*. Рост УБИ антенн является одним из наиболее неприятных следствий наличия слу-

<sup>2</sup> Приводимые ниже ссылки на работы [6,7] означают, что в этих работах можно найти литературу по соответствующему вопросу

чайностей в антеннах. Как известно, УБИ РЭС определяет вклад этой РЭС в электромагнитную обстановку, помехоустойчивость, скрытность РЭС, влияние, оказываемое ею на безопасность разных биологических объектов по электромагнитному излучению. Неслучайно вопросам влияния случайностей на УБИ посвящено множество публикаций (см., например, работы по этим вопросам в обзорах [6, 7] и библиографию к ним). Не останавливаясь на этом подробно, отметим два важных положения.

Прежде всего, это то, что при оценке УБИ нельзя ориентироваться на его уровень в средней ДН. Корректное рассмотрение требует изучения вероятности того, что вся ДН (амплитуда поля  $R(\psi)$ ) в интересующем нас секторе углов  $\psi_1, \dots, \psi_2$  не выйдет за приемлемый уровень. Задав высокую вероятность этого, можно быть уверенным в том, что каждая конкретная антенна из однотипного семейства их (а ведь именно с ней мы на практике имеем дело) устроит нас по УБИ. Методика такого корректного расчета УБИ изложена в книге [5].

Второе положение, существенное при анализе УБИ антенны при наличии в ней ошибок, – это наличие минимально достижимого (предельного) УБИ. Как известно, для снижения УБИ антенны зачастую используется спадающее к краям амплитудное распределение (АР). Однако реально возможности снижения УБИ этим путем ограничиваются влиянием всегда имеющихся в антенне случайных ошибок. Эти ошибки создают "фон" бокового излучения. По мере отклонения АР от равномерного, номинальный УБИ (в отсутствие ошибок) уменьшается и становится соизмеримым с фоном, порождаемым случайными ошибками. Дальнейшие попытки уменьшить боковое излучение путем изменения АР не приводят к желаемым результатам. Рассмотрение этого вопроса показало, что корректно найденный минимальный уровень УБИ обычно на 7 - 10 дБ хуже того уровня, который соответствует средней ДН [8]. Как показали расчеты, если, например, мы хотим, чтобы вся ДН дольф-чебышевской антенной решетки в секторе видимости не выходила за уровень в -30 дБ, то фазовые ошибки в элементах решетки не должны превышать нескольких градусов (!). Такие, трудно реализуемые, жесткие требования к уровню ошибок в антенне заметно осложняют решение задач помехозащитности и скрытности РЭС.

**3) Исследование новых, ранее неизученных (или слабо изученных) статистических характеристик антенн.** Таких работ появилось за прошедшие сорок лет очень много. Укажем, например, следующие вопросы [6, 7]: исследование корреляционных функций ДН по мощности, исследование статистики поляризационных характеристик поля антенн, исследование статистики разностных ДН, исследование характеристик антенн со случайными размерами или апертурой случайной формы, развитие статистической теории антенных укрытий (обтекателей) с учетом внутренних и внешних механизмов образования случайностей в них, развитие теории случайных решеток, анализ влияния выхода из строя элементов антенной решетки на поле излучения антенны [15], трансформация эффекта сверхнаправленности при наличии в антенне случайных ошибок [16, 17], влияние фазовых ошибок в передающей антенне и флуктуаций, обусловленных средой распространения на эффективность системы беспроводной передачи энергии [18], статистика поля антенных решеток при дискретных законах распределения ошибок [19], обобщение СТА на зону Френеля и т. д. Последний из упомянутых вопросов представляется особо значимым. Поэтому на нем надо остановиться подробнее.

**4) Исследование статистики поля в зоне Френеля, развитие статистической теории сфокусированных систем.** Помимо теоретического интереса исследования в этом направлении стимулируются и рядом практически важных обстоятельств. Во-первых, увеличение размеров ряда типов антенн и интенсивное освоение миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн приводит к существенному удалению границы дальней зоны, увеличению протяженности зоны Френеля. При этом нередко цели, представляющие интерес, оказываются во френелевой зоне антенны. В качестве примеров можно указать антенны с синтезированной апертурой и антенны в системах беспроводной передачи энергии. Во-вторых,

заметно увеличилось число ситуаций, когда антенны разных РЭС находятся друг относительно друга в зоне Френеля. Примерами таких ситуаций являются, например, РЭС корабельных и аэродинамических объектов. Проблема ЭМС таких РЭС существенно обострилась из-за увеличения мощности их передающих устройств и повышение чувствительности приемных устройств. В-третьих, повышение мощности современных РЭС и увеличение их числа породили проблему безопасности обслуживающего персонала и других биологических объектов. И, наконец, следует отметить существенно возросший в последнее время интерес к сфокусированным системам, используемым в ближней радиосвязи и радиолокации, установкам для измерения параметров антенн, в ряде медицинских устройств и т.д. и т.п.

Надо отметить, что исследование статистики в зоне Френеля существенно сложнее, чем для дальней зоны. В зоне Френеля интерференционная картина поля антенны зависит как от пространственных углов, так и от расстояния – удаления точки наблюдения от антенны  $R$ . Кроме того, в зоне Френеля возникают новые задачи, не имеющие аналога в дальней зоне. К таковым относятся все задачи, связанные с эволюцией характеристик поля в продольном направлении. Добавим к сказанному и то, что антенны, работающие в зоне Френеля, могут быть несфокусированными и сфокусированными. Структура поля излучения этих двух типов антенн совершенно различна. Все это резко осложняет и увеличивает объем и сложность необходимых исследований. Тем не менее, за последние два десятилетия статистическая теория антенн для зоны Френеля развита в ХНУРЭ достаточно обстоятельно. Вначале, в 90-х годах, была развита теория для обычной и, несколько позднее, для сфокусированной линейной непрерывной антенны. Типичные картины распределения средней интенсивности поля в поперечных плоскостях для несфокусированной системы в ее зоне Френеля показаны на рис. 7 (рис. 7, а - при разных  $\alpha$ ;  $c=0,5$ ;  $R_n=0,25$ ; рис. 7, б - при разных  $\alpha$ ;  $c=0,5$ ;  $R_n=0,125$ ). На этих рисунках  $R_n=R/R_{дз}$  ( $R_{дз}$  – расстояние до дальней зоны). Характерной особенностью здесь является то, что даже в отсутствие ошибок (т.е. при  $\alpha=0$ ) картины распределения средней интенсивности уже сглажены вследствие влияния регулярных квадратических фазовых ошибок.

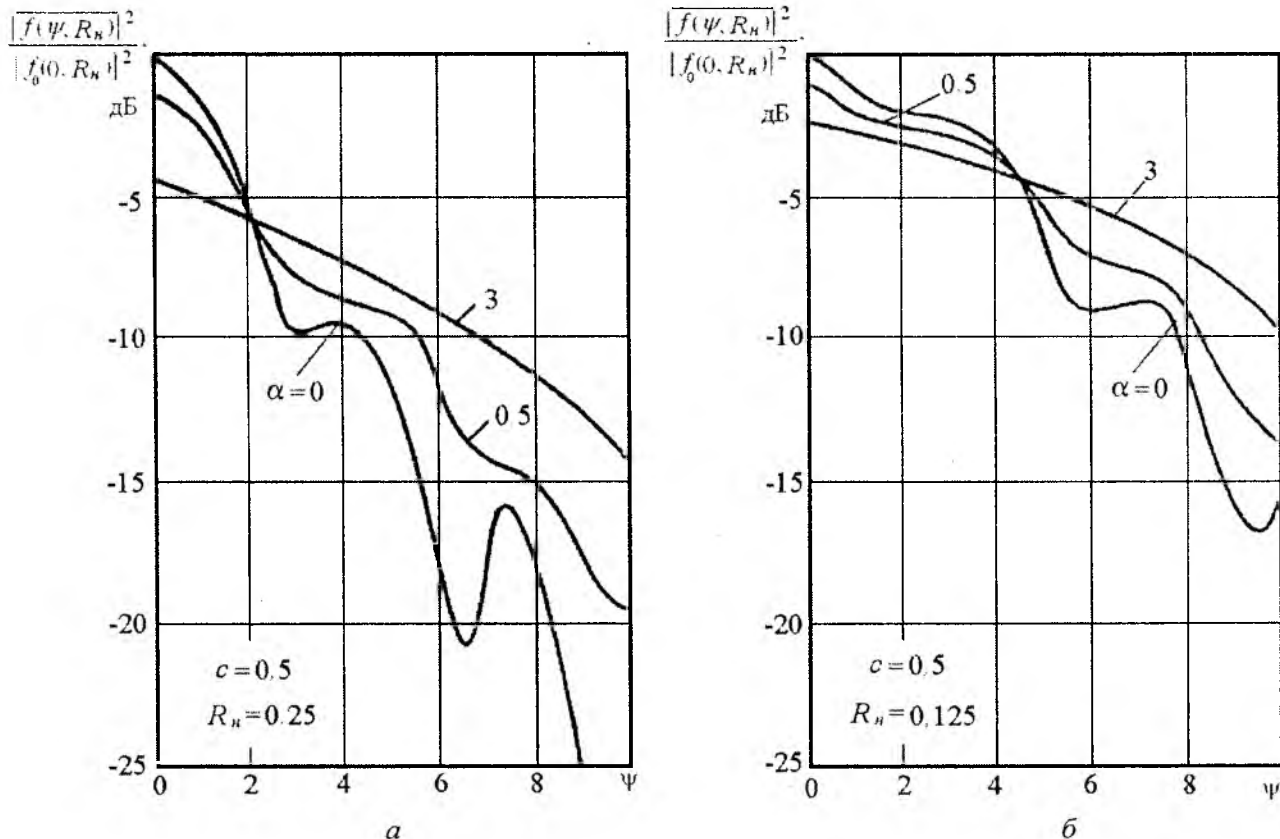


Рис. 7

Кроме локальных статистических характеристик, изучались также и интегральные характеристики, которые показывают, как по мере удаления от антенны перераспределяется излучаемая антенной средняя мощность между различными угловыми секторами. Это важно знать при решении проблем ЭМС. Основные результаты этих исследований приведены в работах [8, 9]. Помимо линейной непрерывной системы, в эти же годы нами анализировалась и статистика поля в зоне Френеля «случайных» антенных решеток при наличии фазовых ошибок в возбуждении излучателей [20]. В последние годы была также развита френелева статистика и для антенны с круглой апертурой [21], что потребовало преодоления серьезных математических трудностей. Надо отметить, что построенная в [21] теория имеет широкую область применимости. Она пригодна для сфокусированных антенн и для обычных (несфокусированных) антенн в их френелевой и дальней зоне. Она годится также и при анализе статистики поля в фокальной плоскости антенны, на которую падает волна с флуктуациями поля.

**5) Использование различных методов анализа статистических характеристик поля антенны.** В книге [5] для нахождения статистических характеристик поля антенны использован метод характеристических функций. В ряде случаев более удобными могут оказаться другие методы анализа статистики поля антенны (см. [6]): метод Монте - Карло; хорошо развитый в теории узкополосных случайных процессов метод огибающей; метод канонических разложений случайных процессов; метод оптического моделирования и т.д. Выбор метода анализа статистики поля антенны определяется рядом факторов: формой записи случайного поля в ее апертуре, величиной ошибок, источником информации о статистике ошибок (т.е. тем, получены ли эти данные теоретически или экспериментально) и т.д.

### 3.2. Прямые внутренние задачи

Цель решения прямой внутренней задачи, как мы уже отмечали раньше, – нахождение статистики распределения источников в антенне. Если флуктуации поля в апертуре антенны обусловлены внешними механизмами, то внутренняя задача представляет собой, как правило, задачу распространения волн в той или иной постановке ее. К настоящему времени теория распространения волн в случайно-неоднородных средах с учетом влияния шероховатых границ раздела значительно продвинута вперед. Опубликовано также много экспериментальных работ по распространению волн разных диапазонов на различных трассах. Имеющиеся теоретические и экспериментальные результаты можно эффективно использовать при оценке характеристик антенн, работающих на тех или иных случайно-неоднородных трассах распространения волн. Из работ последнего времени отметим интересные работы В.А.Петрова и его учеников [22, 23], направленные на выяснение механизма обратного рассеяния волн в тропосфере и рассеяния поля при ДТР. Характерной особенностью этих работ является то, что после выяснения механизма происхождения флуктуаций и определения присущих этим механизмам параметров флуктуаций авторы, используя формулы книги [5], решают в той или иной мере и внешние задачи, в частности определяют потери усиления в антеннах систем ДЗА и угловую зависимость множителя ослабления при ДТР. Своеобразный путь решения внутренней задачи применительно к характеристикам антенны на линии ДТР принят в книге [5]. Используя экспериментальные данные о потерях КНД и о радиусе корреляции поля  $c$  в апертуре антенны, определяется возможное значение дисперсии ошибок  $a$ . Знание  $a$  и  $c$  позволяет найти другие статистические характеристики антенны – расширение средней ДН, дисперсию ухода НГМ и т.п. Полученные таким образом данные удовлетворительно совпали с экспериментальными результатами. Интересные результаты были получены нами при исследовании структуры поля коротких волн (длина волны около 10 м) в канале Земля - ионосфера протяженностью порядка десятка тысяч километров. Измерения напряжения на выходах вибраторов полотна приемной решетки ЗГ РЛС показали, что дисперсия фазы на вибраторах (значение  $a$ ) составляет величину порядка 0,25, а радиусы корреляции фазовых флуктуаций  $\rho \approx \frac{1}{4} L$  ( $c=0.5$ ) При таких значениях  $a$  и  $c$  снижение КНД, согласно работе [5], равно примерно 30%. Вряд ли это можно считать допустимым для гигантской

антенны ЗГ РЛС огромной стоимости. Ясно, что эту антенну следовало строить как самофокусирующую решетку (СФАР) с размерами отдельных секций порядка  $\rho$ . Переход к подобной СФАР, как отмечено в [5], эквивалентен как бы увеличению радиуса корреляции флуктуаций (и величины  $c$ ) в  $L / \rho$  раз (в нашем случае, в четыре раза). При этом снижение КНД в СФАР было бы, согласно [5], порядка 10 %. Выигрыш в КНД порядка 20 % вполне оправдывает небольшое усложнение схемы обработки сигналов, принятых отдельными элементами СФАР.

Остановимся теперь на работах, посвященных решению внутренней задачи для случаев, когда ошибки тока или поля в апертуре порождаются в самой антенне (ошибки внутреннего происхождения). Решение подобных задач должно быть тесно привязано к конструкции и технологии изготовления конкретной антенны. Для зеркальных антенн решение внутренней задачи означает определение реальной поверхности зеркала с последующим пересчетом отклонений поверхности зеркала в фазовые ошибки поля в их апертуре. Требования к точности контроля поверхности зеркала за последнее время существенно повысились, что связано, в частности, с освоением миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. Поэтому к настоящему времени разработаны весьма прецизионные методы контроля поверхности зеркал: радиолокационные, оптические, лазерные, фазовые дальнометры и интерферометры, радиолографические (получившие особое распространение) и т. д. Эти методы позволяют обеспечить точности измерения поверхности зеркал в единицы микрон. Для изучения эксплуатационных деформаций поверхности зеркал в СССР был даже создан специальный измерительный комплекс с 64 ЗА [24]. Характерным является повышенный интерес к температурным деформациям ЗА связных ИСЗ. Обусловлено это тем, что в космических антеннах весовые и ветровые деформации отсутствуют. Наряду с экспериментальными работами в 70 - 80 годы был опубликован и ряд теоретических работ, посвященных вопросам оценки и расчета деформаций ЗА (см. [6]). Эти работы касались расчета температурных деформаций и жесткости конструкций антенн. Однако число таких работ и круг рассматриваемых в них теоретических вопросов был ограничен. Положение заметно улучшилось с появлением в 1996 г. книги Р. Леви [25]. В этой книге аккуратный расчет деформаций зеркала связывается далее с их влиянием на электромагнитные характеристики зеркала. При анализе деформаций ЗА автор основное внимание уделяет расчету деформаций структуры, поддерживающей зеркало, справедливо отмечая, что именно они оказывают наибольшее влияние на результирующую точность поверхности зеркала. Наряду с расчетом деформаций поддерживающей структуры, автор дает также и оценку точностям изготовления отдельных панелей зеркала, их возможным деформациям и точности их установки. Подробно рассматриваются тепловые деформации, являющиеся основным препятствием в осуществлении работоспособных крупных антенн в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн. Тепловые деформации, особенно связанные с неравномерностью солнечной радиации, вызывают заметные локальные случайные деформации, причем проявляется это как в ходе эксплуатации, так и на всех предыдущих этапах – изготовления, монтажа и юстировки антенны. Показано, как можно с помощью метода конечных разностей определить температурные деформации, зная распределение температуры по элементам структуры. Значительное внимание уделено и анализу ветровых деформаций – их связи с плотностью воздуха, профилем скорости ветра по высоте и т.д.

При решении второй части внутренней задачи – пересчете деформаций зеркала в фазовые ошибки – в апертуре антенны используются соображения геометрической оптики. Как утверждает автор, для практики этого достаточно, ибо ошибка в определении фазовых ошибок методами геометрической оптики по сравнению с более точными методами составляет менее 10 %. Далее для оценки влияния случайных фазовых ошибок на характеристики антенны используются известные соотношения из теории допусков, хотя, на наш взгляд, при оценке влияния деформаций ЗА с немалыми радиусами корреляции было бы разумнее использовать соответствующие формулы работы [5].

Наряду с работами, направленными на совершенствование методов определения реальной поверхности зеркал, значительное внимание уделялось и изучению путей уменьшения

самих деформаций или ослабления их влияния. Желание решить эту проблему стимулировало появление ряда работ по улучшению технологии изготовления зеркал, применению новых материалов с малыми коэффициентами температурного расширения, разработке более жестких конструкций ЗА, а также переход к новым принципам построения крупных зеркальных антенн – панельной конструкции их, гомологической структуре их построения [26], внедрению адаптивных (самонастраивающихся) систем, реагирующих на деформации зеркал.

Перейдем теперь к антенным решеткам.

Решение внутренней задачи для ФАР состоит в определении статистики ошибок токов возбуждения излучателей решетки. Источниками ошибок могут быть неточности изготовления решетки, нестабильности используемых в решетке генераторов, усилителей, фазовращателей и т.д., которые определяются обычно экспериментально. В литературе опубликовано немало количество подобных работ. Наряду с работами экспериментального плана, имеется также и ряд работ, посвященных теоретическому исследованию внутренней задачи для ФАР. Пожалуй, наиболее интересной из них является работа [27], в которой для каждой реализации вектора-столбца входных напряжений вибраторной решетки находится строгое решение краевой задачи, а затем для нахождения статистических характеристик поля решетки используется метод статистических испытаний (метод Монте - Карло). Фактически в этой работе нет традиционного деления прямой задачи на внутреннюю и внешнюю.

### **3.3. Метод статистического имитационного моделирования**

Одним из новых интересных направлений СТА является развитый в последние два десятилетия О.Н. Масловым и его учениками метод изучения случайных антенн с применением компьютерного метода статистического имитационного моделирования (СИМ), основанного на применении принципа Монте - Карло [28]. Термин «случайные антенны» (СА) здесь понимается несколько шире, чем это принято в традиционной СТА. Помимо антенн рассматриваемых СТА, случайные антенны включают также и излучатели, функционально вообще не являющиеся антеннами: провода, блоки ЭВМ, трещины в той или иной камере, окружающей радиоаппаратуру и т.п., т.е. действительно случайные излучатели. Важно это потому, что проводимые авторами исследования направлены на аккуратный анализ электромагнитной обстановки, выяснение степени безопасности биологических объектов по электромагнитному излучению и предотвращение утечки конфиденциальной информации, содержащейся в электромагнитном поле. При этом совершенно безразлично, кто породил это поле – антенны или паразитные излучатели.

По существу, метод СИМ сочетает в себе решение внутренней и внешней задач СТА. На первом этапе (соответствующем как бы решению внутренней задачи) проводится тщательное изучение объекта, подлежащего СИМ, в частности изучается статистика исходных данных, описание ее с помощью так называемых законов устойчивых распределений [29]. Определяются параметры этих законов. Далее, на втором этапе (соответствующем как бы решению внешней задачи СТА) разрабатывается математическая модель объекта и реализуется имитация самого процесса его функционирования, в ходе которого находят выходные данные. При этом используется метод Монте - Карло. Выходные данные получают обычно в виде массива отдельных реализаций, подлежащих статистической обработке для последующей интерпретации их.

Предлагаемая процедура исследования СА предусматривает реализацию ее в разных режимах работы РЭС. Авторами рассматриваются четыре возможных режима – режим гармонического (узкополосного) сигнала, шумового сигнала, режим видеосигнала и режим импульсных сигналов с высокочастотным заполнением. Для каждого из этих режимов выбирается соответствующий тестовый сигнал и определяются возможные источники случайностей (ошибок) в этом сигнале. Интуитивно задается практически возможный диапазон изменения каждой из ошибок – амплитудной, фазовой, временной, геометрической, числа исправных элементов и соответствующее множество реализаций каждого из тестовых сигналов обрабатывается методом Монте - Карло применительно к эквидистантной линейной активной

решетке. Это позволило выявить весомость каждого из видов ошибок и их совместного действия на ДН решетки. Эти результаты представляются интересными и для общей СТА.

Перейдем теперь к рассмотрению современного состояния теории обратных задач СТА. Как и в обычной теории антенн, обратные задачи существенно сложнее, чем задачи прямые, задачи анализа. Сложности связаны с тем, что обратные задачи, как правило, относятся к некорректным, и при их решении приходится решать вопросы устойчивости решений. Поэтому достигнутые в этой области успехи являются одним из наиболее важных шагов на пути развития общей СТА. Начнем с задач статистического синтеза.

### 3.4. Задачи статистического синтеза

Наиболее важной работой по статистическому синтезу является работа [30]. Основное внимание в этой работе уделено задачам нахождения регулярного распределения источников, которое, при учете присутствующих в антенне случайных ошибок с заданной статистикой обеспечит оптимальность характеристик антенны по тем или иным критериям. Рассматриваются два типа критериев – интегральный и критерий, связанный с ДН.

В первом случае используется энергетический функционал

$$k = \frac{\int_{4\pi} |f(\vec{u}_0)|^2 g_1(\vec{u}_0) d\Omega}{\int_{4\pi} |f(\vec{u}_0)|^2 g_2(\vec{u}_0) d\Omega}. \quad (2)$$

В соотношении (2)  $\overline{|f(\vec{u}_0)|^2}$  – средняя ДН по мощности;  $\vec{u}_0$  – единичный орт на точку наблюдения;  $g_{1,2}(\vec{u}_0)$  – весовые функции. В зависимости от вида весовых функций, функционал  $k$  представляет собой тот или иной, подлежащий оптимизации, энергетический показатель качества антенны – средний КНД, коэффициент рассеяния средней мощности, среднюю шумовую температуру и т.п. Приводится методика решения задач по нахождению оптимального АФР или только амплитудного или фазового распределения. Показано, что в ряде случаев удается получить решение в явном виде. В общем случае необходимо использовать численные методы. Последнее типично для задач фазового синтеза и задач нахождения оптимального размещения источников в решетке.

Использование среднего КНД или среднего коэффициента усиления в качестве подлежащего оптимизации функционала типично для обычных ДН. При рассмотрении разностных ДН используется критерий типа [31].

$$k = \frac{\int_{4\pi} |f'(\vec{u}_0)|^2}{\int_{4\pi} |f(\vec{u}_0)|^2} g(\vec{u}_0) d\Omega, \quad (3)$$

где  $f'(\vec{u}_0)$  – производная ДН решетки по одной из угловых координат;  $g(\vec{u}_0)$  – функция веса. Числитель в соотношении (3) определяет средний квадрат крутизны ДН в направлении орта  $\vec{u}_0$ , знаменатель – "взвешенную" среднюю мощность излучения (приема) сигнала.

Задача синтеза состоит в нахождении такого АФР, которое обеспечивает максимум крутизны ДН в направлении орта  $\vec{u}_0$  при заданной величине средней мощности излучения. При малых ошибках удается получить аналитическое решение. При немалых ошибках для решения задачи оптимизации приходится использовать численные методы.

Помимо интегрального критерия, в качестве оптимизируемого функционала часто выбирают математическое ожидание среднеквадратичного отклонения реализуемой ДН  $f(\vec{u}_0)$  от заданной  $f_s(\vec{u}_0)$

$$\overline{\sigma^2} = \int_{4\pi} |f(\vec{u}_0) - f_s(\vec{u}_0)|^2 g(\vec{u}_0) d\Omega \quad (4)$$

Задача оптимизации состоит в нахождении регулярного АФР, обеспечивающего минимум разброса синтезированной ДН относительно заданной при известной статистике ошибок поля в антенне. Входящая в (4) весовая функция  $g(\vec{u}_0)$  позволяет регулировать точность аппроксимации заданной ДН в определенных угловых секторах. Методика решения таких задач изложена в [30, 17].

Статистический подход к задачам синтеза, т.е. учет уже при постановке задачи синтеза наличия в антенне случайностей позволяет получить выигрыш (порой весьма значительный) в значениях оптимизируемых параметров антенн, чем, если бы мы решали вначале задачу синтеза в детерминистской постановке, а потом исследовали бы, как повлияют случайные ошибки на полученный при синтезе результат. Статистический подход к задаче синтеза позволяет также оценить практически достижимые значения показателей качества антенны.

Принципиальной, весьма ценной чертой статистического синтеза является и то, что учет флуктуаций источников на этапе постановки задачи синтеза приводит к естественной регуляризации этой задачи, существенно подавляет эффекты сверхнаправленности.

### 3.5. Задачи восстановления

Типичная задача восстановления в статистической постановке состоит в нахождении пространственной автокорреляционной функции (функции когерентности) случайного поля в апертуре антенны по измеренной средней ДН. Подобные задачи решались как для линейных, так и для апертурных антенн [32, 33]. Решение задачи приводит к необходимости решения интегральных уравнений Вольтера или Фредгольма 1-го рода. Поскольку, получаемая в эксперименте средняя ДН неизбежно "искажена" ошибками измерений, задача оказывается некорректной. Поэтому при определении автокорреляционной функции по результатам измерения средней ДН необходимо использовать те или иные методы решения некорректных задач, например метод  $\alpha$ -регуляризации Тихонова.

Помимо средних характеристик (средней ДН) для восстановления статистики поля в апертуре можно использовать и другие статистические характеристики поля антенны, например, данные о флуктуациях интенсивности поля в фокусе антенны [34].

Иногда задача о нахождении статистики поля в апертуре формулируется как задача о нахождении моментов распределения случайного АФР в антенне по известным моментам распределения случайного поля. Последние находятся путем обработки серии экспериментально снятых реализаций ДН [35]. Значительный интерес представляют задача о восстановлении статистики источников в рассеивающем объеме при ДТР по характеристикам рассеянного поля, в частности работа [36].

Отметим также работы, в которых задачи восстановления решаются в упрощенной постановке. Характерным для таких работ является допущение об известном законе распределения и корреляционной (или структурной) функции флуктуаций поля (амплитуды и фазы его) в апертуре антенны. При такой богатой "априорной" информации искомыми являются числовые параметры флуктуаций поля: дисперсия и радиус корреляции их или масштабный коэффициент  $C_n^2$ , входящий в структурную функцию флуктуаций поля. В этих случаях решение, как правило, находится на основе сопоставления экспериментально измеренных эффектов с результатами решения прямых задач. Пример решения задач восстановления в такой постановке можно найти в книге [5], где экспериментальные данные о потерях усиления антенны и радиусе корреляции  $\rho$  использованы для определения дисперсии  $\sigma^2$  флуктуаций поля в падающей на антенну волне. При этом использованы теоретические графики этой же работы, построенные в предположении нормального закона распределения флуктуаций поля в апертуре и гауссовой формы их коэффициента корреляции.

Ограничимся этим, весьма сжатым, изложением состояния вопроса о задачах статистического восстановления. Некоторую дополнительную информацию по ряду затронутых выше вопросов (и соответствующую этой информации литературу) можно найти в обзорах [6, 7]. Надо, однако, сказать, что в этой области остается еще много разных нерешенных задач. В их числе задача дистанционной дефектоскопии удаленных антенных систем – определение их работоспособности по создаваемому ими полю с последующей корректировкой (в случае необходимости) алгоритма работы этих антенн. Несомненный интерес представляет также продолжение исследований, направленных на восстановление по рассеянному полю, в частности по МДН статистики рассеивающего объема или параметров среды распространения пришедшей волны.

### **3.6. Статистическая теория антенных измерений (СТАИ)**

Разрабатываемые в настоящее время крупные антенны сложны и дороги, а требования к характеристикам антенн и их стабильности очень высоки. Поэтому важно как при разработке подобных антенн, так и в ходе их эксплуатации уметь измерять (контролировать) их характеристики с высокой точностью. Традиционный метод измерения параметров антенн в дальней зоне зачастую оказывается непригодным из-за сложностей с реализацией условия дальней зоны и влияния земли и местных предметов. Это обстоятельство привело к разработке и широкому внедрению в антенную практику методов определения характеристик антенн по измерениям в ближней зоне – голографического, коллиматорного, метода перефокусировки. Наиболее перспективный из них – голографический метод (ГМ), при котором параметры антенны в дальней зоне находятся путем измерения АФР в апертуре антенны (или вблизи ее) с последующей обработкой результатов измерений – пересчетом их с помощью ЭВМ в дальнюю зону. Появление новых методов антенных измерений потребовало, естественно, и разработки их теоретических основ. Важное место в этой теории занимают статистические аспекты ее – вопросы влияния случайных ошибок измерений на точность восстановления характеристик антенны. В основе решения подобных вопросов лежит СТА. Пользуясь аппаратом этой теории, можно оценить потенциальные возможности новых методов антенных измерений и обосновать требования к разрабатываемой аппаратуре при различных вариантах реализации новых методов. Комплекс этих вопросов составляет содержание статистической теории антенных измерений (СТАИ). Основы СТАИ изложены в пятой главе монографии [37] и несколько дополнены в работе [38]. Надо заметить, что основы теории изложены применительно к ГМ, хотя основные результаты справедливы и применительно к другим методам. Кратко о содержании СТАИ. Как и в общей статистической теории антенн, в СТАИ можно выделить прямые и обратные задачи. Цель прямой задачи – определить возможности (область применимости) аппаратуры, используемой в ГМ при заданной точности восстановления ДН. Обратная задача имеет своей целью определить, как следует строить измерительную аппаратуру, чтобы обеспечить измерение ДН с желаемой точностью. Весьма важным при решении прямой и обратной задачи СТАИ является вопрос о «критериях близости» восстановленной и истинной ДН. В зависимости от выбранного критерия близости оценка возможностей используемой в ГМ аппаратуры или требований к ней будет различной. Предлагаются три критерия близости. Первый из них – сравнение восстановленной средней и истинной ДН. Вторым критерий («локальный») основан на изучении разброса восстановленной ДН относительно истинной в отдельных угловых направлениях. При третьем, наиболее корректном, «интегральном» критерии изучается разброс восстановленной ДН в целом в заданном угловом секторе в пределах определенной доверительной полосы. Анализируется методика решения прямых и обратных задач при разных критериях близости. Приводятся формулы и графики, отражающие результаты решения этих задач для линейной и двумерной апертуры при измерениях на плоской или цилиндрической поверхности в апертуре антенны или в зоне Френеля ее. Показано, в частности, что требования к измерительной аппаратуре зависят от удаления области измерений от апертуры. Подробно отмеченные выше и многие другие интересные результаты СТАИ можно найти в работах [37, 38].

#### 4. Основные области применения СТА

Все, что изложено выше о содержании СТА, основных направлениях ее развития за прошедшие сорок лет, о современном состоянии СТА, позволяет указать основные области ее применения.

К числу таковых можно отнести следующие.

1. Расчет реальных характеристик крупных, сложных дорогостоящих антенн в дальней зоне и зоне Френеля с учетом влияния антенных укрытий.
  2. Оценка потенциальных возможностей и предельно достижимых характеристик крупных антенн. Выбор технологии их производства, целесообразной схемы построения.
  3. Расчет характеристик антенн с учетом условий распространения падающей на антенну волны.
  4. Обоснование разумных требований к производству антенн, допускам, стабильности параметров элементов антенны, их надежности.
  5. Анализ пространственного, частотного и поляризованного фона излучения антенн разных типов в дальней зоне и зоне Френеля в интересах решения задач ЭМС, помехозащитности и скрытности РТС, безопасности людей и других биологических объектов.
  6. Задачи статистического синтеза различных антенн по тем или иным критериям: интегральным, энергетическим, по заданной ДН (суммарной или разностной).
  7. Задачи статистического восстановления в самых разных их постановках.
  8. Статистические аспекты измерения и контроля параметров антенн. Метрологическое обеспечение этих измерений. Оценка предельных возможностей измерительной аппаратуры или требований к ней. Обоснование требований к антенным эталонам.
  9. Анализ эксплуатационных характеристик антенн – расчет влияния деформаций и повреждений ЗА, выхода из строя отдельных каналов на характеристики ФАР, оценка влияния случайных гидрометеорообразований (снег, дождь, лед), оседающих на поверхности антенного укрытия, построение теории надежности сложных антенных систем.
  10. Использование аппарата СТА для предварительного расчета сложных детерминированных антенных систем.
  11. Использование аппарата СТА при решении ряда вопросов радиолокации, оптики, акустики и т. д., для которых существенно оценить влияние тех или иных случайных факторов на выходные характеристики системы
  12. Использование аппарата СТА при решении задач дифракции на шероховатых телах, случайных экранах, а также при решении разных задач, связанных с дифракцией и интерференцией частично когерентных волн различной физической природы.
- Все сказанное выше не исчерпывает круга задач, решаемых СТА, возможностей использования ее результатов, о чем свидетельствует обзор большого количества опубликованных работ, в которых используются результаты, методы и подходы СТА (см например, обзор [6]).

#### Заключение

Проведенное выше рассмотрение современного состояния статистической теории антенн показывает, что за прошедшие с момента ее создания сорок лет эта теория существенно продвинута вперед. Наряду с более глубоким рассмотрением "традиционных" прямых задач (изучением средних ДН по мощности, среднего КНД, бокового излучения антенн) и распространением теории на разные классы и диапазоны антенн при различных вероятностных свойствах флуктуаций источников решено много новых интересных, практически важных вопросов СТА. К числу наиболее важных направлений развития СТА за прошедший период можно отнести: обобщение теории на зону Френеля для обычных непрерывных линейных и апертурных антенн, а также для линейных решеток (включая случайные решетки); построение статистической теории непрерывных линейных и апертурных антенн, сфокусированных в зону Френеля; развитие теории статистического синтеза; разработку статистической теории антенных измерений.

Следует отметить и ряд возникших в последнее время новых специфических аспектов СТА. К их числу можно отнести отмеченный в настоящем обзоре метод имитационного моделирования (СИМ); изученную в работе [39] статистику поля оптоуправляемых антенн и исследование зависимости внутренних характеристик ( $Z_{вх}$ , КБВ и т.д.) электрически малых антенн от случайностей в их конструкции [40].

Достиженные успехи позволяют сказать, что на сегодня статистическая теория антенн вполне сформировалась, как одно из важных направлений современной общей теории антенн.

Как показывает практика, в настоящее время учет возможного влияния случайностей разного происхождения на характеристики антенны стал обязательным компонентом при проектировании и разработке крупных дорогостоящих антенных систем. Это обстоятельство является достаточно весомым подтверждением значимости и актуальности СТА. Признанием этого является и то, что сам термин «статистическая теория антенн» стал уже общепризнанным и широко используется в научной литературе, а также и то, что элементы СТА в той или иной мере включены практически во все отечественные антенные учебники, вышедшие в свет после 1970.

Заметный вклад в развитие СТА внесли многие ученые. Если говорить об отечественных специалистах, то здесь, в частности, можно отметить Л.Г. Корниенко, В.И. Замятина, В.А. Усина, Л.М. Лобкову, Л.Г. Содина, Д.Б. Островского, Ю.М. Бородавко, В.В. Должикова, Г.А. Евстропова, Е.П. Меркулова и ряд других ученых.

В заключение отметим, что развитие радиоэлектроники, оптики, акустики, науки о распространения радиоволн выдвигает все новые и новые задачи. Некоторые из них могут быть успешно решены при использовании уже полученных в СТА результатов, другие – требуют дальнейшего развития и обобщения общей статистической теории антенн.

**Список литературы:** 1. *Ruze J.* The effect of aperture errors on the antenna radiation pattern // Suppl. al Nuovo Cimento, 1952, v.9, # 3, p. 364. 2. *Robieux J.* Influence de la precision de fabrication d'une antenne sur ses performances Ann.de Radioelectricite, 1956, v. 11, # 43, p.29. 3. *Шифрин Я.С., Черный Ф.Б., Тихомиров Ю.А., Тарасов В.А., Трашков П.С.* Экспериментальное исследование дальнего тропосферного распространения ультракоротких радиоволн. Изд-во АРТА, 1964, 103 с. 4. *Чернов Л.А.* Распространение волн в среде со случайными неоднородностями. Изд-во АН СССР, 1958. 5. *Шифрин Я.С.* Вопросы статистической теории антенн. М.: Сов. радио, 1970. 384 с. 6. *Шифрин Я.С.* Статистическая теория антенн (Современное состояние, основные направления развития). Харьков. 1985.181 с. Деп. в Укр НИИНТИ 9.09.85 № 2098. 7. *Шифрин Я.С.* Современное состояние статистической теории антенн // РЭ. 1990. Т. 35, № 7. С.1345. 8. Справочник по антенной технике / Под ред Бахраха Л.Д., Зелкина Е.Г. М.: ИПРЖР, 1997, гл. 8. С.148-206. 9. *Shifrin Y.S.* Statistical antenna theory (theory foundation, state-of-the-art, basic application) // Telecommunication and Radioengineering. 2001. v 55, № 6. P.1-67. 10. *Шифрин Я.С., Корниенко Л.Г.* Статистика поля антенных решеток // Антенны. 2000. №1. С. 3-26. 11. *Шифрин Я.С., Замятин В.И., Левагин Г.А.* Статистика поля кольцевых антенных решеток // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. № 5. С. 34-39. 12. *Шифрин Я.С., Ульянов Ю.Н., Максимова Н.Г.* Статистика поля акустических антенных решеток аппаратуры дистанционного зондирования атмосферы // Успехи современной радиоэлектроники. 2007, № 11. С. 50. 13. *Шифрин Я.С., Ульянов Ю.Н., Максимова Н.Г.* К вопросу о боковом излучении аппаратуры акустического и радиоакустического зондирования атмосферы // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 11. С. 60. 14. *Активные фазированные решетки* / Под.ред Д.И.Воскресенского, А. И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004. Гл. 2. 15. *A.H.Quazi.* Array beam response in the presence of amplitude and phase fluctuations // J.Acoust. Soc. Am. V. 72, № 1. 1982. P.171. 16. *Шифрин Я.С., Должиков В.В., Радченко В.Ю.* Сверхнаправленность в статистической теории антенн. Харьков. 159 с Деп.в Укр НИИНТИ 05.01.88. 17. *Шифрин Я.С., Должиков В.В.* Статистический синтез линейной непрерывной антенны по заданной диаграмме направленности. // РЭ. 1994. № 8-9. С.1329. 18. *Бояхчан Г.П., Ванке В.А.* О влиянии флуктуаций фазы в падающем луче на характеристики ректенной системы // Радиотехника (Москва). 1984. № 9. С. 74. 19. *Бейдер А.Б.* Статистический анализ ДН ФАР при отказе излучателей // Изв. вузов. Сер Радиоэлектроника. 1994. Т.33, №2. С.28. 20. *Шифрин Я.С., Назаренко В.А.* Поле случайных антенных решеток в зоне Френеля // РЭ. 1991. №1. С.52-62. 21. *Шифрин Я.С., Должиков В.В.* Статистика поля

антенны с круглой апертурой // Радиофизика и радиоастрономия. 2010. №1. С.98-112. 22. *Петров В.А., Шейко С.А.* О потерях усиления антенн в системах измерения профиля ветра // Радиоэлектроника и информатика. X. 2002. №3. С. 19-22. 23. *Петров В.А., Шейко С.А.* Корреляционные функции и потери усиления антенн в радиолокационных системах зондирования поля // Радиотехника. X., 2002. Вып. 125. С.18-24. 24. *Поляк В.С., Соколов А.Г., Альперин В.М., Половченя И.Е.* Измерительный комплекс для натуральных механических исследований конструкций антенн // Антенны. № 238. С.171. 25. *Levy Roy.* Structural Engineering of Microwave Antennas // IEEE Press. 1996, USA. 354 p. 26. *von Hoerner S.V.* Homologous deformation of tiltable telescopes // Proc. ASCE J, Struct.Div.93. STS October 1967. 27. *Adams A.T., His P. G., Farrer A.* Random effects in planar arrays of thin wire dipoles // IEEE Trans., 1978, v.EMC-20, № 1. P.22. 28. *Маслов О.Н.* Случайные антенны // Электросвязь. 2006. №7. С.12. 29. *Маслов О.Н.* Устойчивые распределения и их применение в радиотехнике. М.: Радио и связь, 1994. 152 с. 30. *Корниенко Л.Г., Шифрин Я.С.* Статистический синтез антенн. Гл. 13 в кн: Проблемы антенной техники / Под ред Л.Д.Бахраха, Д.И.Воскресенского. М.: Радио и связь, 1989.С. 275-297. 31. *Шифрин Я.С., Корниенко Л.Г., Бычков А.А.* О синтезе разностных диаграмм направленности с глубокими провалами в заданных секторах при наличии флуктуаций тока в элементах антенной решетки // РЭ. 1981. Т.26. №3. С.513. 32. *Потехин В.А., Татаринов В.Н.* Теория когерентности электромагнитного поля. М.: Связь, 1978. 33. *Иванов А.В., Кандидов В.П., Криндач В.П., Соколов В.Н.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т.29, №10. С. 1176. 34. *Беленький М.С., Миронов В.Л.* Измерение пространственной корреляции флуктуаций интенсивности света с помощью апертуры переменного диаметра // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17, № 7. С.1050. 35. *Жуков В.Б., Островский Д.Б.* Статистические моменты распределения возбуждения в задаче синтеза // Акуст. журнал. 1978. Т.24, № 4. С.516. 36. *Фролов О.П.* Определение характера возбуждения тропосферного объема переизлучения по мгновенным диаграммам тропосферных антенн // Радиотехника. 1974. Т. 29, № 2. С.94. 37. *Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне* / Под ред Л.Д. Бахраха. Л.: Наука, 1985. Гл. 5. 38. *Шифрин Я.С., Усин В.А.* Статистическая теория антенных измерений // Антенны. 2000. №1. С.27. 39. *Карпенко В.И., Карпенко О.В., Збрицкий Р.А., Онищенко В.В.* Статистика адаптивных оптоуправляемых антенн // Прикладная радиоэлектроника. 2010. № 1. С. 78-93. 40. *Макаров А.Л., Овсяников В.В., Ольшевский А.Л., Попель В.М., Романенко Е.Д., Сафонов В.В.* Малогабаритные вибраторные антенны с резистивными нагрузками для космических аппаратов // Антенны. 2010. № 3. С.46-56.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 06.02.2010*