

Открытое акционерное общество
«Концерн ПВО «Алмаз – Антей»

**Материалы
научно-практического семинара
по вопросам проведения антенных
измерений в ближней зоне**

Москва
2015

Проведение оценки характеристик антенн по результатам измерений поля в ближней зоне в настоящее время стало общемировым трендом. Этот способ анализа качества антенн в отличие от традиционного измерения в дальней зоне позволяет не только существенно экономить на содержании полигонных средств измерений, но и обеспечивает более детальное исследование зависимостей между технической реализацией антенны и создаваемым ею полем.

В радиоэлектронной отрасли России, и на предприятиях Концерна в том числе, наработан уникальный опыт и имеются собственные ноу-хау в области оценки выполнения измерений характеристик антенн по результатам измерений поля в ближней зоне. Вместе с тем существует достаточно большое количество проблем технического и организационного характера с внедрением и применением данного способа измерений.

Обсуждение существующих проблем и поиск направлений их разрешения явилось целью семинара.

СОДЕРЖАНИЕ

Общая информация о семинаре	4
Докладчики, темы докладов и их краткое содержание.	4
1 Доклад ООО «НПП «ТРИМ СШП Измерительные системы»	
Современные методы и средства измерения характеристик в ближней зоне	10
2 Доклад ОАО «ВНИИРТ»	
Юстировка каналов ФАР и восстановление ДН по измерениям на максимально приближенной референсной плоскости	33
Доклады ОАО «ВНИИРА»	
3 Автоматизированный антенный измерительный комплекс ближнего поля ОАО «ВНИИРА»	63
4 Особенности измерения коэффициента измерения на стендах ближнего поля с плоской и сферической поверхностью сканирования	73
5 Два метода восстановления АФР поля в раскрыве антенны по результатам сферического сканирования в ближней зоне	77
6 Доклад ОАО «ННИИРТ»	
Опыт и проблемные вопросы практической реализации технологии фазирования РЛС средних и больших высот с АФАР в ходе серийного производства и эксплуатации	85
7 Доклад ОАО «НПО «ЛЭМЗ»	
Антенные измерения с использованием специализированных сканеров на НПО «ЛЭМЗ»	97
8 Доклад ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей»	
Методы измерения параметров и диагностики отказов ФАР в ближней зоне без применения механических позиционеров	108
9 Доклад ОАО «Радиофизика»	
Сравнение методов измерения антенн в ближней, промежуточной и дальней зонах	119
10 Доклад АО «ЗРТО»	
Инженерное решение для определения характеристик ФАР по результатам измерений в ближней зоне	129
11 Сообщение филиала № 1 Концерна	
Реконструктивные (ближнепольные) антенные измерения в филиале № 1 ОАО «Концерн ПВО «Алмаз – Антей»	131
12 ГОСТ 8.309–78 ГСИ. Антенны остронаправленные. Методика выполнения измерений для определения параметров по полю в раскрыве	143

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СЕМИНАРЕ

Тема семинара:

Вопросы проведения антенных измерений в ближней зоне.

Дата и место проведения:

03.04.2015 г., ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей».

Состав участников семинара:

В семинаре приняли участие 45 человек от дочерних предприятий Концерна и представители производителя стендового оборудования ООО «НПП «ТРИМ СШП Измерительные системы».

Организаторы семинара:

Руководитель семинара – заместитель генерального директора Концерна по научно-техническому развитию, к.т.н. Друзин С. В.;

Секретарь семинара – заместитель начальника управления по научно-техническому развитию д.т.н., профессор Горевич Б. Н.;

Подготовка сборника семинара – начальник группы управления по научно-техническому развитию Лахин О. В.

ДОКЛАДЧИКИ, ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И ИХ КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

1. От **ООО «НПП «ТРИМ СШП Измерительные системы»** – генеральный директор Миляев П. В., заместитель генерального директора по научной работе Калинин Ю. Н. Тема доклада: «Современные методы и средства измерения характеристик антенн в ближней зоне».

Различают методы измерения характеристик антенн: в дальней зоне; коллиматорный (измерения в квазидальней зоне, формируемой за счет переотражения излучения зеркалом); ближнего поля. Выделяют следующие методы измерений поля в ближней зоне: планарного сканирования в двух плоскостях (для плоских апертур); телеметрический в одной плоскости (для линейных апертур); методы сферического сканирования (пригодны для апертур любого вида, но ввиду сложности такие стены создаются, главным образом, для слабонаправленных антенн).

ООО «НПП «ТРИМ» разработало и поставило более 70 измерительных комплексов. Других поставщиков в России нет.

Комплексы аттестованы и внесены в Госреестр Российской Федерации средств измерений (информация имеется на сайте Госреестра). Некоторые предприятия делают комплексы самостоятельно, без аттестации.

Наиболее сложные стенды – для АФАР, возможен режим снятия характеристик на прием и на передачу. Комплекс «под ключ» предполагает: интерфейс (подключение измерительного оборудования к антенне); безэховую камеру; измерительное оборудование с программным обеспечением. Этот состав комплекса нужно учитывать при формировании ТЗ на поставку измерительного комплекса. Аттестацию производит 32-й ГНИИТ Минобороны (г. Мытищи) всего комплекса в целом, в том числе с учетом обеспечиваемого уровня безэховости.

ООО «НПП «ТРИМ» провело четыре Всероссийские конференции по вопросам измерений в ближней зоне. Участвовали представители от 70 до 150 предприятий.

Создаваемые в настоящее время комплексы имеют ограничение по верхней границе частот около 50 ГГц. Ограничение обусловлено точностью позиционирования сканера (определяется допустимой фазовой ошибкой определения координаты по нормали к апертуре – ось z). Лазерный дальномер обеспечивает позиционирование с точностью до микрона.

Разработаны: цилиндрический сканер – для снятия веерных диаграмм антенн; наклонный 150-тонный сканер – позволяет не изменять положение антенны; коллиматор с рабочей зоной 8 м (второй в мире). Размер обследуемой апертуры в принципе не ограничен.

Метод известен с 80-х годов. Фундаментальные основы теории изложены в журнале «ТИИЭР» № 6, 8 за 1988 г., журнал «Антенные» за 2014 г. № 1, 4, ГОСТ 8.309–78 «Антенны остронаправленные. Методика выполнения измерений для определения параметров по полю в раскрыве».

Плоский сканер обеспечивает 4 степени свободы зонда (x, y, z, вращение (поляризация)). Размещение от апертуры – на расстоянии 3–5 λ , шаг сканирования $\sim \lambda/2$. Сектор обзора антенны (от нормали на краю антенны) – 60–70°.

Состав оборудования – опорно-поворотное устройство (для размещения и перемещение антенны или сканера), векторный анализатор цепей (измерение фазы), могут быть генератор, преобразователь частоты. Для больших апертур целесообразен переход на оптические линии, что снижает неточность выставки фазы на большой длине кабеля, температурные уходы, уходы из-за перегибов кабеля и его

старения. Алгоритм обработки – 2-мерное преобразование Фурье и коррекция диаграммы направленности зонда. Измерению подлежат две составляющие поля – на их основе рассчитываются все характеристики антенны. Измерение коэффициента усиления – на основе сопоставления с полем эталонной антенны. Зонд – переносчик характеристик эталонной антенны. Программное обеспечение – для сбора данных, расчета, отображения.

Адекватность результатов измерений (в сравнении с методом дальней зоны) обеспечивается (для линейных апертур) для диапазона отклонения луча до 60° от нормали.

Появляется новое видение диаграммы направленности (ДН), например, боковые лепестки под углом 45° к осям X-Y. В традиционном представлении ДН в двух плоскостях их не видно.

Имеется возможность дефектации элементов ФАР – путем пересчета эталонного поля на апертуру (восстановление АФР в раскрыве антенны).

Имеется возможность детального анализа влияния обтекателя на характеристики антенны.

2. От ОАО «ВНИИРТ» – заместитель генерального директора по НТР Сергеев В. Н. Тема доклада: «Юстировка каналов ФАР и восстановление ДН по измерениям на максимально приближенной референсной плоскости».

Референсная плоскость – это плоскость перемещения зонда.

Одна из проблем в создаваемых РЛС – юстировка трактов приема и передачи сигнала. Тракты имеют нестабильность. Для юстировки используетсястроенная система контроля (ВСК) по пилот-сигналу, прогоняемому через тракты в интервале между передачей и приемом сигнала. Однако ВСК не охватывает всего канала, в частности, приемо-передающих модулей. Кроме того, сама ВСК может вносить погрешность. Точный результат даст измерение в дальней зоне, но это невозможно в эксплуатации. Пример – один из корабельных локаторов – может работать только со своими сигналами, нельзя применить другой вид сигнала для проверки, кроме того, мощность на излучение не регулируется – всегда полная. Юстировку нужно делать на всех частотах излучения.

Для оценки качества ВСК искали ответы на вопросы:

- как близко можно приблизить референсную плоскость, чтобы не было взаимного влияния зонда и раскрыва?
- какие типы зонда выбрать?
- какой шаг перемещения зонда вдоль полотна должен быть (на большом удалении – шаг $\lambda/2$)?

– точный расчет поля – не преобразование Фурье, а вычисление интеграла Кирхгофа.

Использовали стенды ООО «НПП «ТРИМ». По результатам измерений подтвердили качество ВСК.

3. От ОАО «ВНИИРА»:

– начальник научно-исследовательского сектора Платонов О. Ю.

Тема доклада: «Автоматизированный антенный измерительный комплекс ближнего поля ОАО «ВНИИРА»;

– начальник научно-исследовательского сектора Пономарев М. Ю.

Тема доклада: «Особенности измерения коэффициента измерения на стенах ближнего поля с плоской и сферической поверхностями сканирования»;

– инженер 2 категории Шубников В. В. Тема доклада: «Два метода восстановления АФР поля в раскрыте антенны по результатам сферического сканирования в ближней зоне».

На предприятии используется измерительный комплекс собственной разработки, включающий два стенда для плоских апертур и один стенд для сферического сканирования. Выполняются измерения для своих нужд и по заказам сторонних организаций. Проблема аттестации ввиду смены дислокации оборудования. Зонды – свои – вибраторные, щелевые, волноводные. Перед измерением осуществляется контроль температуры, калибровка кабелей.

4. От ОАО «ННИИРТ» – заместитель начальника отдела Францев М. Е. Тема доклада: «Вопросы практической реализации технологии фазирования РЛС средних и больших высот с АФАР в ходе серийного производства и эксплуатации».

Отличительная особенность антенн РЛС – большая апертура и большое количество ППМ. Пример: один из РЛК имеет – РЛМ-М – 154 ППМ, РЛМ-Д – 1824 ППМ, РЛМ-С – 4600 приемных и 1500 передающих модулей. Используется внутреннее фазирование антенн – по спецсигналу в нерабочем стробе. Ввиду большого количества модулей в Д и С локаторах, сложной разводки сигнала, большой длины кабелей, их перегибов – неточность выставки фазы. Необходимо выполнять внешнее фазирование – по выносному излучателю (диполь) на выносной мачте. Проблема внешнего фазирования – промышленные помехи и точность выставки полотна по отношению к излучателю. Другой способ внешнего фазирования – с помощью перемещения диполя по отдельным ППМ на расстоянии λ от полотна. Проблемы – большие затраты времени (на РЛМ-Д – до 10 рабочих смен), недопустимость работы на закрытых

частотах. Созданный автоматизированный измерительный комплекс позволяет разрешить проблемы.

5. От ОАО «НПО «ЛЭМЗ» – инженер 1 категории Степанов Е.С. Тема доклада: «Антенные измерения с использованием специализированных сканеров на НПО «ЛЭМЗ».

На предприятии имеется стенд разработки ООО «НПП «ТРИМ» и стенд собственной разработки. Оба используются для оценки характеристик антенн.

Проблема измерений – отсутствие современной нормативной базы: ГОСТ 8.309–78 «Антенны остронаправленные. Методика выполнения измерений для определения параметров по полю в раскрыве».

6. От ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей» – начальник отдела Маничев А. О. Тема доклада: «Методы измерения параметров и диагностики отказов ФАР в ближней зоне без применения механических позиционеров».

Предложен альтернативный подход к оценке характеристик антенн – без механического перемещения испытуемой и/или вспомогательной антенн. Используется один зонд с известной ДН, регистрирующий изменение поля ФАР при последовательном управлении элементами ФАР. Возможен анализ характеристик отдельного излучателя ФАР и диагностика его исправности на основе индивидуального управления по сравнению с суммарным полем всех излучателей. Метод позволяет выполнять индивидуальную фазировку элементов для настройки параметров антенны. Верификация метода проведена по результатам измерений характеристик антенн в дальней зоне.

7. От ОАО «Радиофизика» – заместитель начальника сектора Тоболев А. К. Тема доклада: «Практика антенных измерений с помощью сканера в ОАО «Радиофизика».

На предприятии имеется самая большая безховая камера в Европе. Это позволяет выполнять измерения характеристик антенн и сопоставлять различные методы измерений в дальней, промежуточной и ближней зонах (в зависимости от размеров антенн, их частотного диапазона). Для измерений в дальней зоне используются прецизионные поворотные устройства; в промежуточной (зона Френеля) – используется аппаратура для дальней зоны, но объект может иметь существенно больший размер. Выбор метода – в зависимости от объекта измерений и характеристик метода: в ближней зоне (с применением сканера) – измерение дольше, однако размеры антennы могут быть очень большими.

Проведено сопоставление методов.

8. От АО «ЗРТО» – начальник отдела Еникеев В. М. Тема доклада: «Инженерное решение для определения характеристик ФАР по результатам измерений в ближней зоне».

На предприятии используется стендовое оборудование ООО «НПП «ТРИМ». Основная проблема – создание ОПУ для больших апертур с требуемыми характеристиками – погрешность установки должна быть: по углу менее 1 угл. мин, по х, у – менее 0,5 мм. Сложности связаны: с подъемом-опусканием ФАР, юстировкой оптической оси; большим временем измерений (полотно ФАР размером 3 × 3 м S-диапазоне требует 3 часов на одно сканирование; с учетом измерения характеристик на нескольких частотах потребные временные затраты на измерение характеристик одной ФАР составляют около 1 месяца). Стенд дорабатывается – вводится электронное управление поляризацией (сейчас механический поворот зонда), что обеспечит двукратный временной выигрыш. Совпадение с измерением в дальней зоне (погрешность по Ку) не более 10 %, по параметрам ДН – не более 7 %. Проблема с наличием аттестованных зондов (как правило, используются изготовленные самостоятельно).

Выводы:

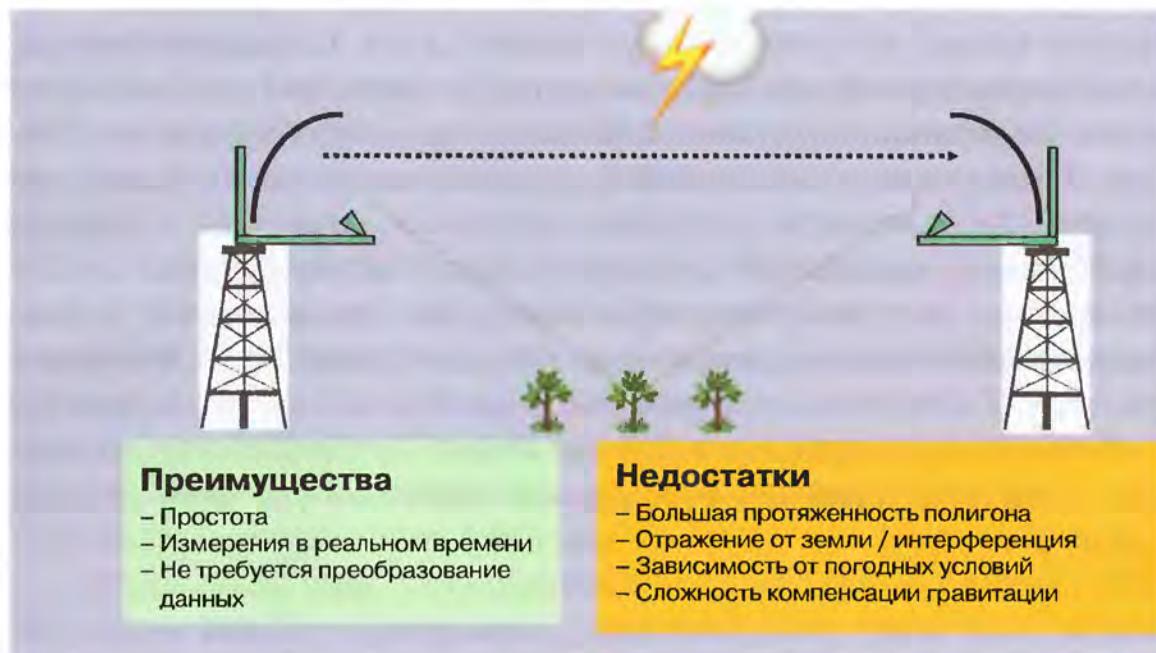
1. Измерение характеристик антенн в ближней зоне имеет ряд преимуществ перед измерением в дальней зоне, в том числе: снятие проблем транспортирования крупногабаритных антенн на полигон, создания и эксплуатации измерительных полигонов, обеспечения норм электромагнитного излучения; метод обеспечивает получение полной и детальной картины по параметрам антенн, чего сложно достичь методами измерений дальней зоны; появляется возможность дефектации элементов ФАР и др.;

2. Современными проблемами измерений в ближней зоне являются организационно-технологические – создание собственно комплекса измерений и его аттестация, и нормативные – устаревание нормативной базы измерений.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Миляев П. В., Калинин Ю. Н.

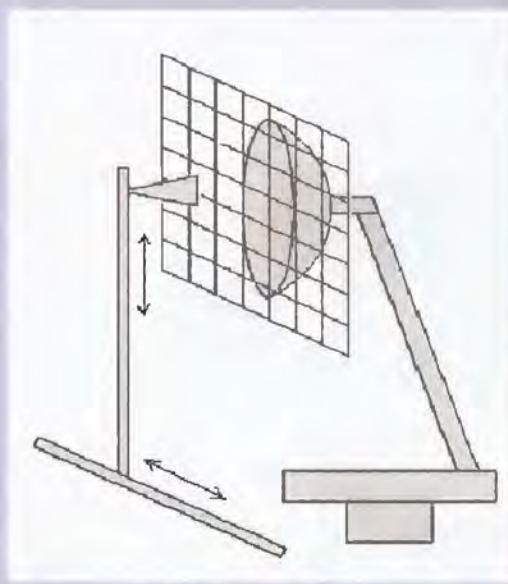
Измерения в дальней зоне



Измерения в коллиматоре



Измерения в ближней зоне



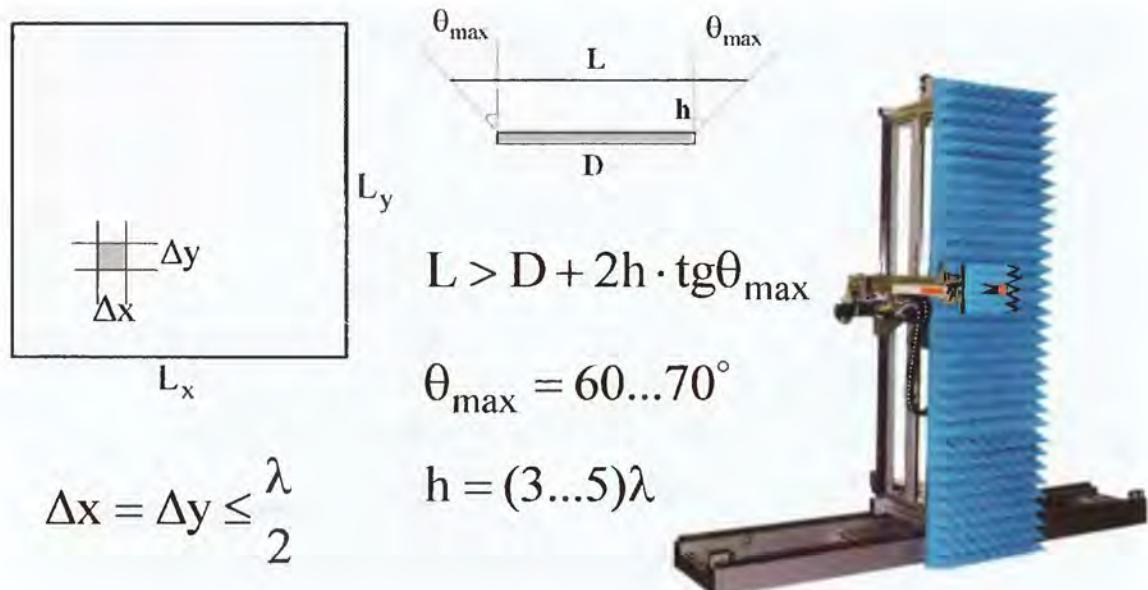
Преимущества

- Точные измерения (до ~ 50 Гц)
- Измерения на малых расстояниях:
 - Низкие потери в пространстве
 - Низкие переотражения
- Измерения в помещении:
 - Независимость от погоды
 - Круглосуточная погода
 - Измерения в «чистой зоне»
- Компенсация гравитации

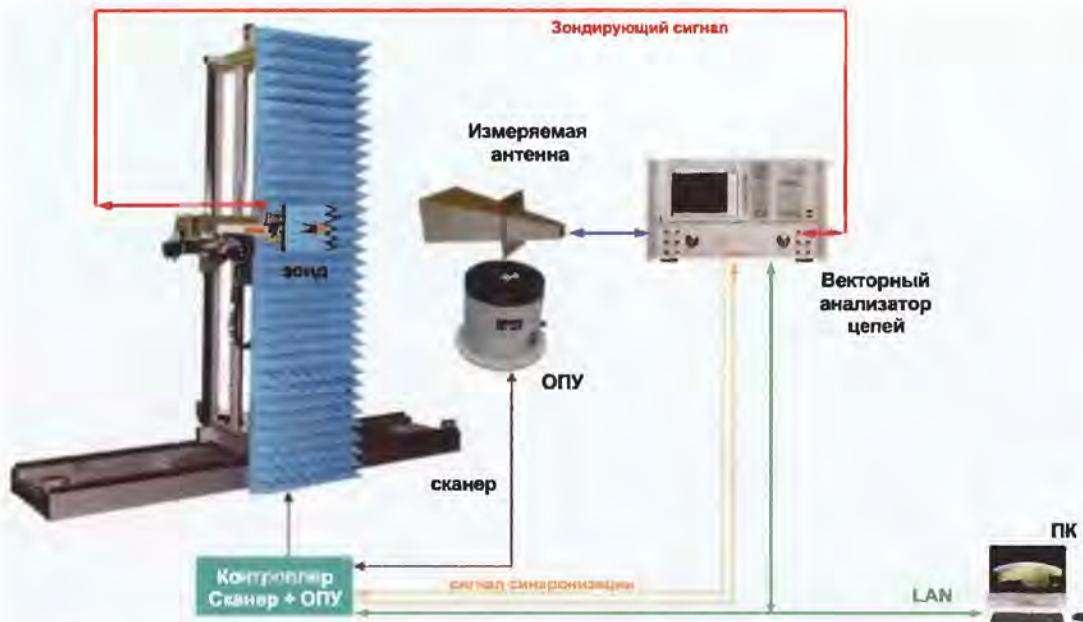
Ограничения/ Недостатки

- Необходимость преобразования данных
- Измерения не в реальном времени
- Связь между зондом и антенной
- Ограничение частоты до ~ 50 ГГц
(точность позиционирования ограничивает точность измерения фазы)

Измерения в ближней зоне (сканирование на плоскости)



Структурная схема комплекса для измерений в ближней зоне ЧМ



Алгоритм расчета диаграммы направленности

$$S_{x,y}(k_x, k_y) = \iint W_{x,y}(x, y, \omega_q) e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy;$$

$$S_{x,y}(k_x, k_y) \rightarrow S_{x,y}(A, E);$$

$$F'_A(A, E) = k_z S_x(A, E);$$

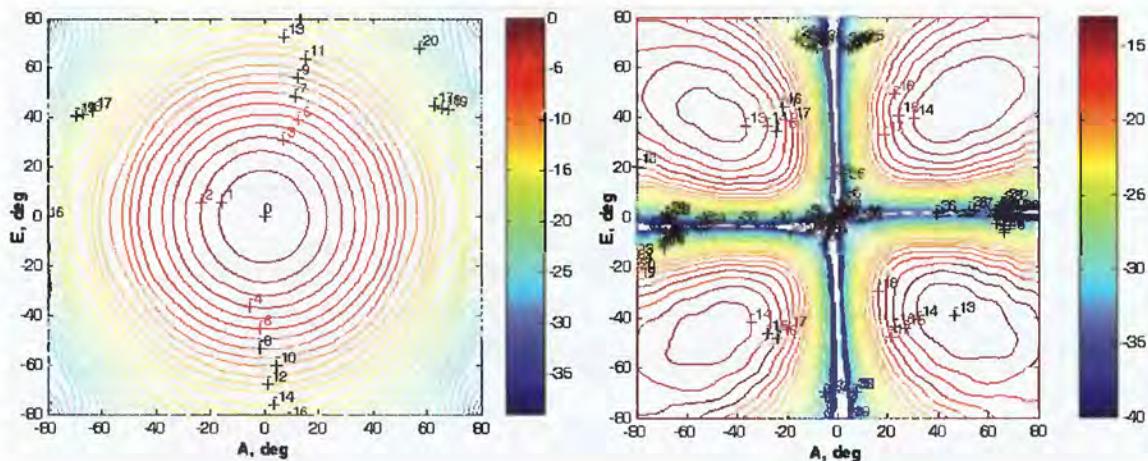
$$F'_E(A, E) = k_z S_y(A, E).$$

$$k_x = \sin A \cos E;$$

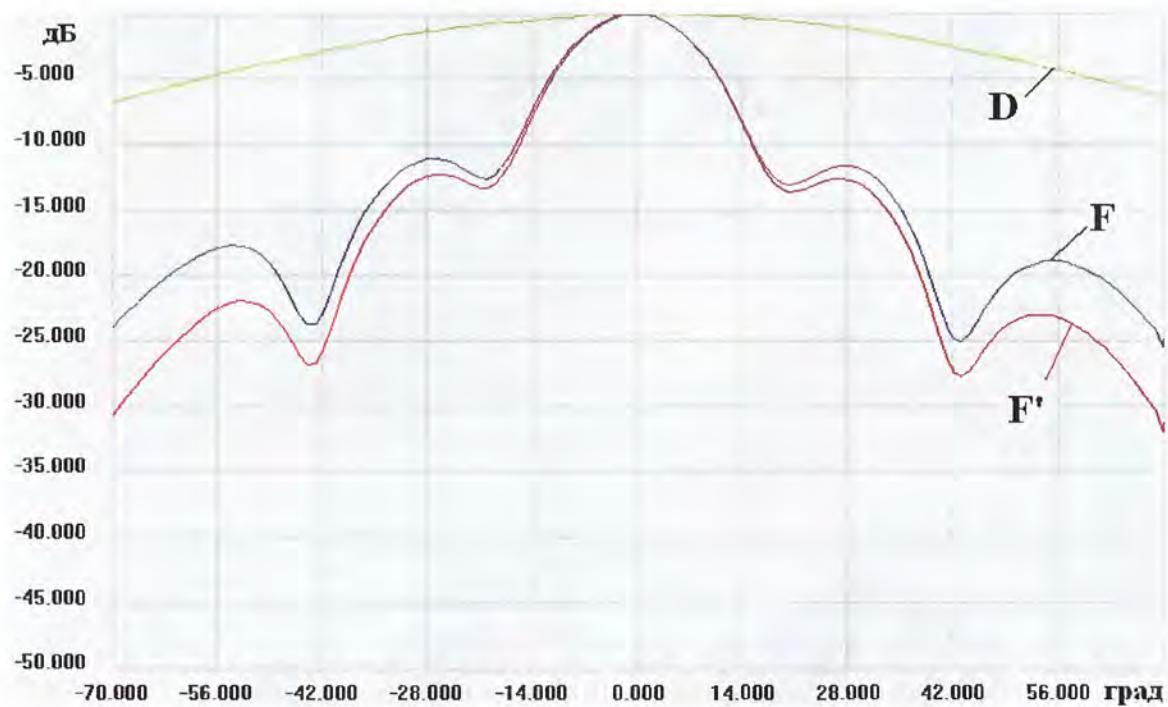
$$k_y = \sin E;$$

$$k_z = \cos A \cos E;$$

Y-поляризованный зонд ($f=8$ ГГц)



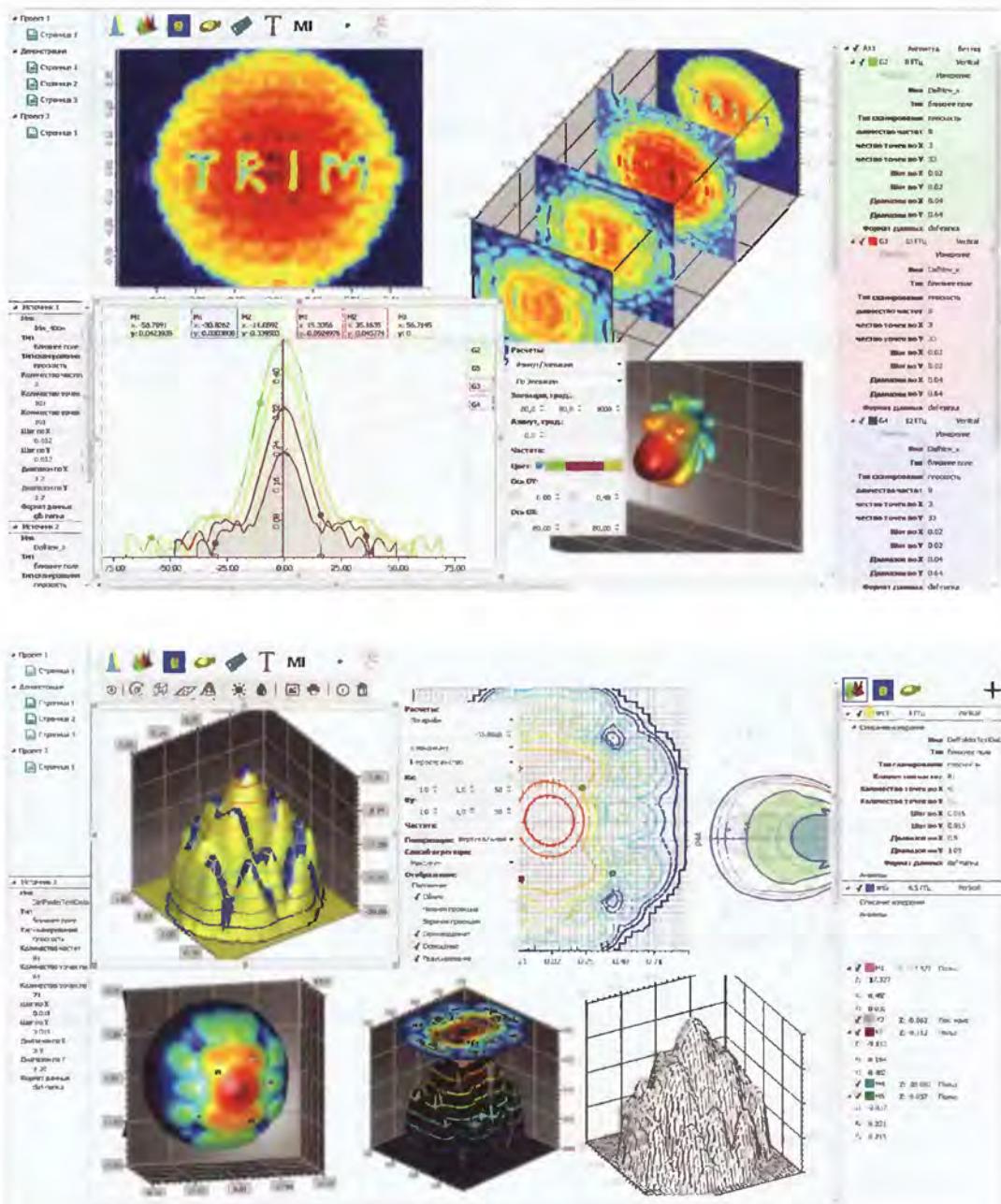
Коррекция ДН зонда



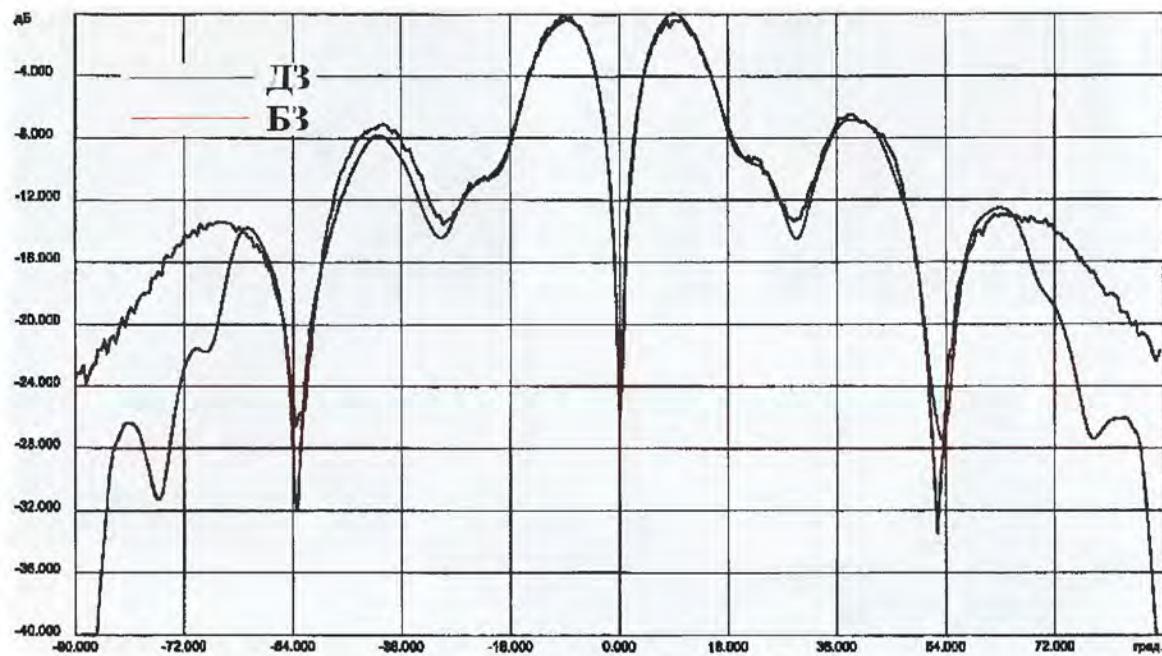
Состав измеряемых параметров:

- амплитудные и фазовые ДН по основной и кросской поляризации (объемные и сечения);
- поляризационные ДН;
- коэффициент усиления;
- ЭИИМ;
- КНД;

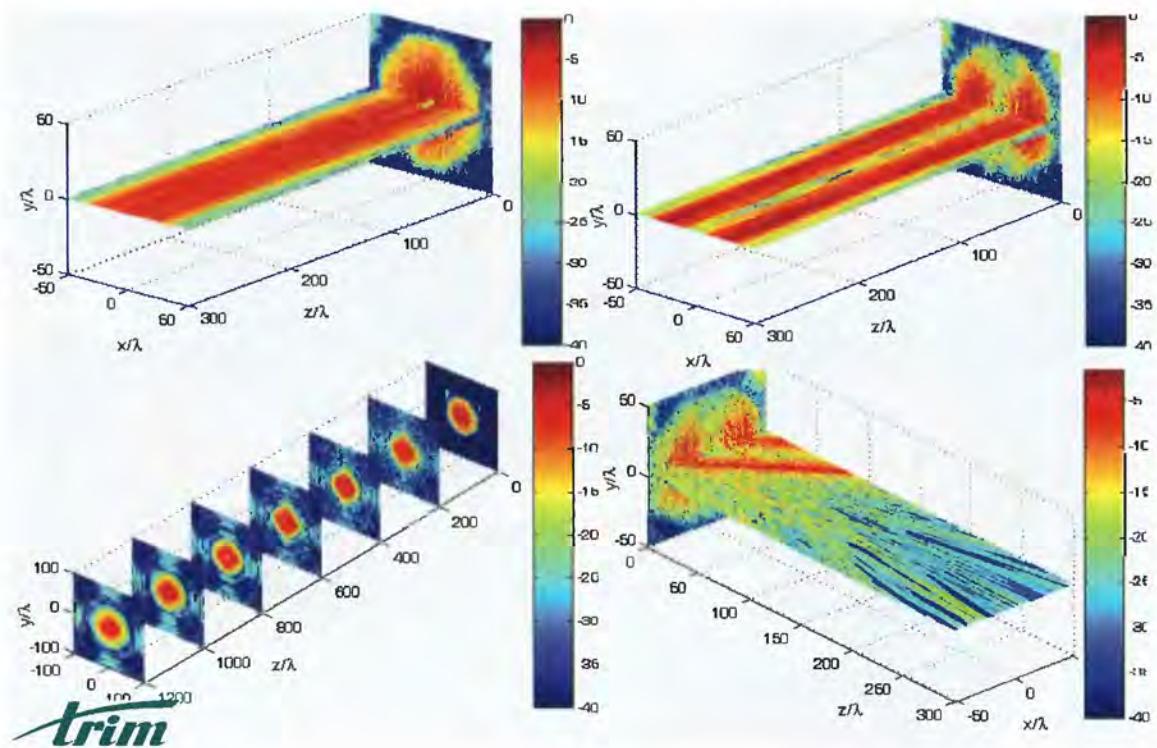
- коэффициент эллиптичности;
- угол наклона поляризационного эллипса;
- уровень кроссполяризационной развязки;
- координаты ФЦ;
- ширина луча по заданному уровню;
- направление максимума ДН по заданному уровню;
- пересчет в круговой базис;
- пересчет и отображение в разных системах координат;
- восстановление АФР в апертуре антенны;
- расчет ближнего поля в заданной области пространства и пр.



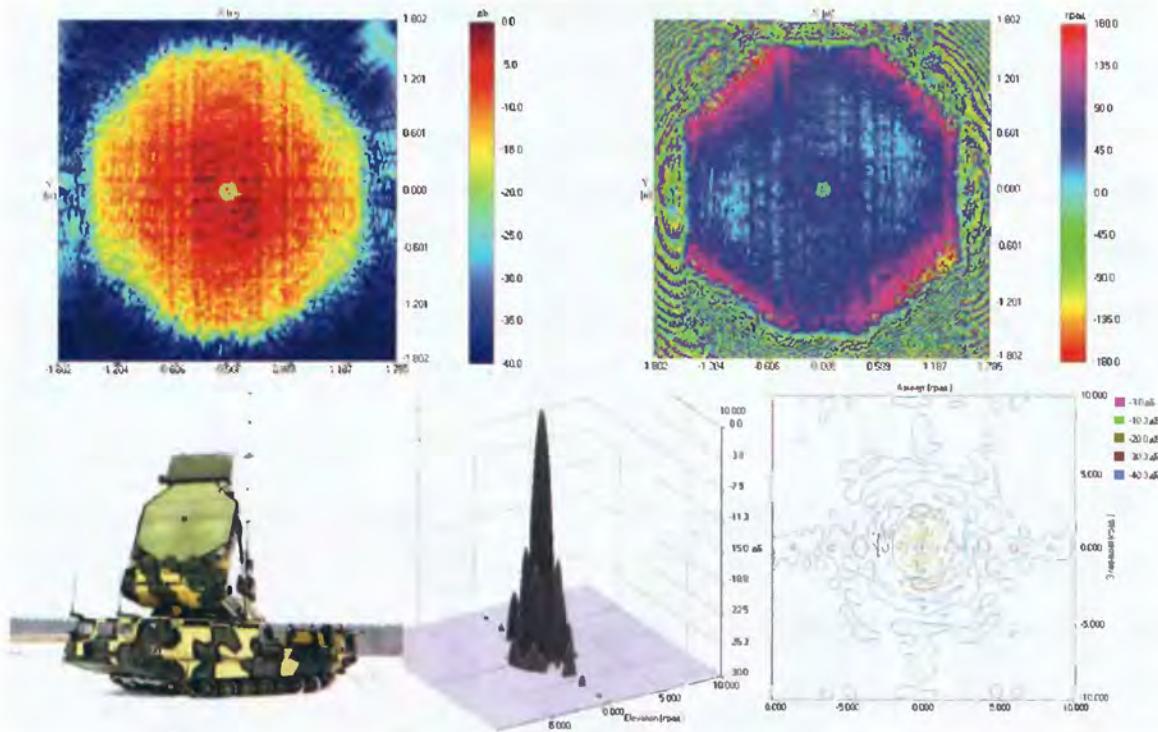
Сравнение измерений ДН в дальней зоне и в плоском сканере



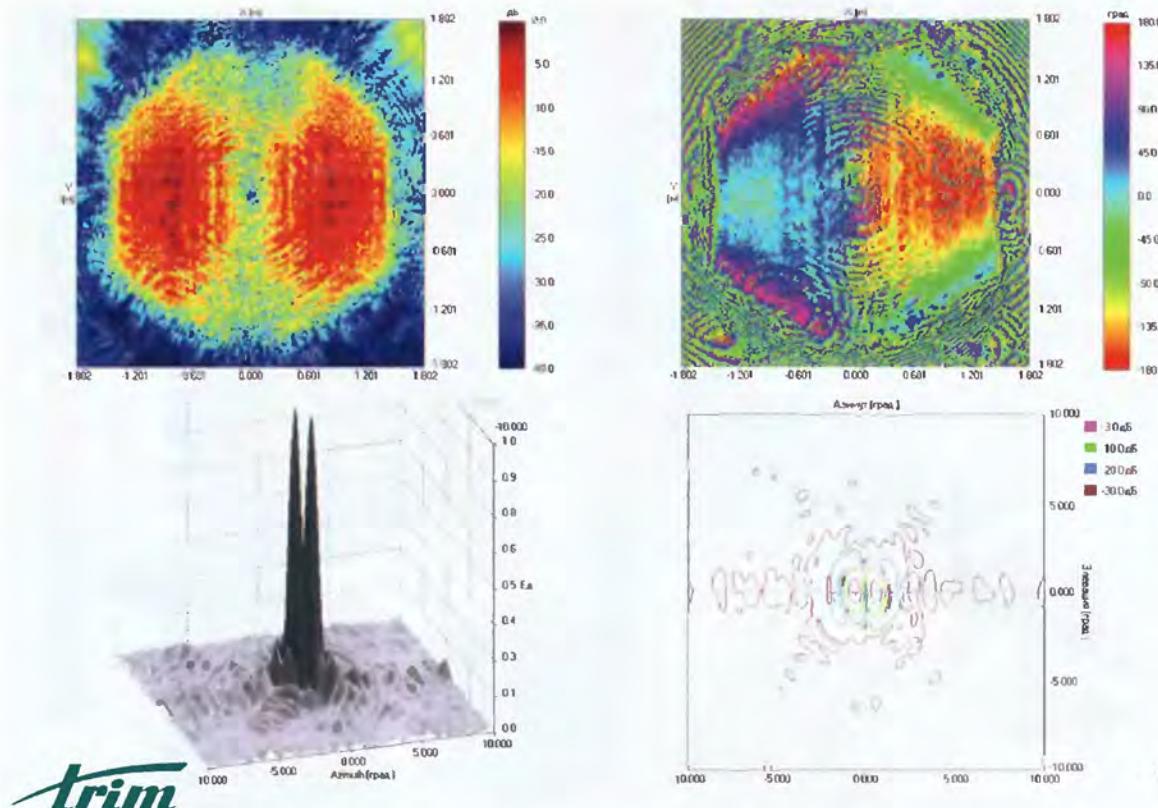
Распространение ближнего поля



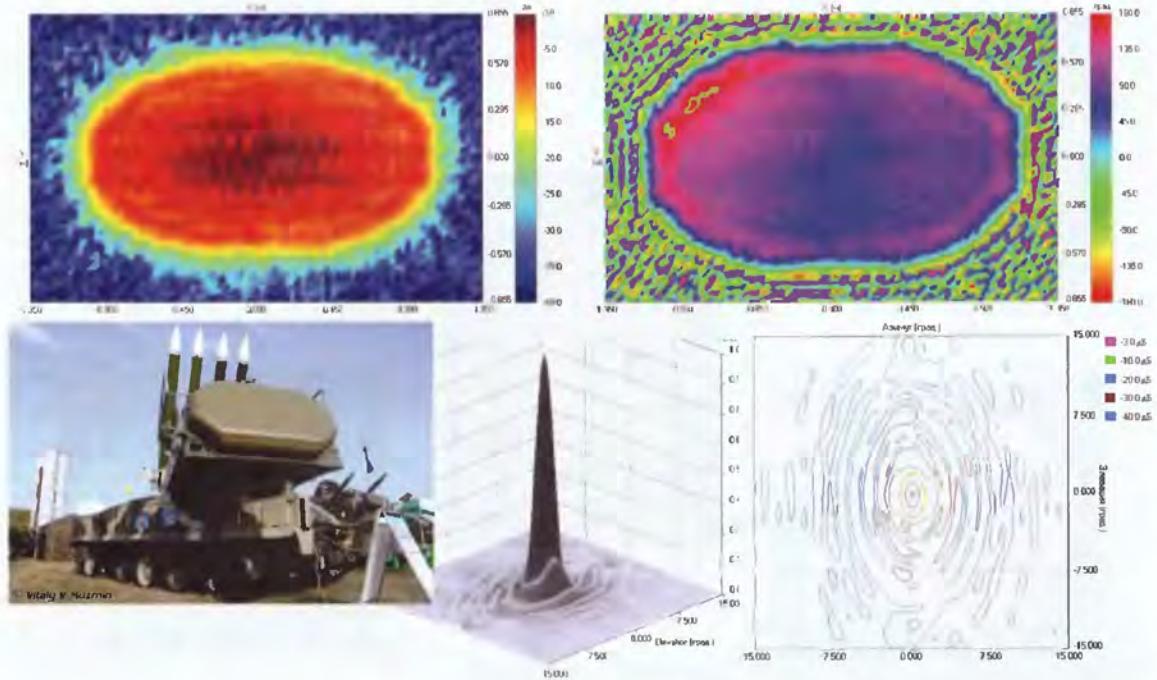
Примеры измерений



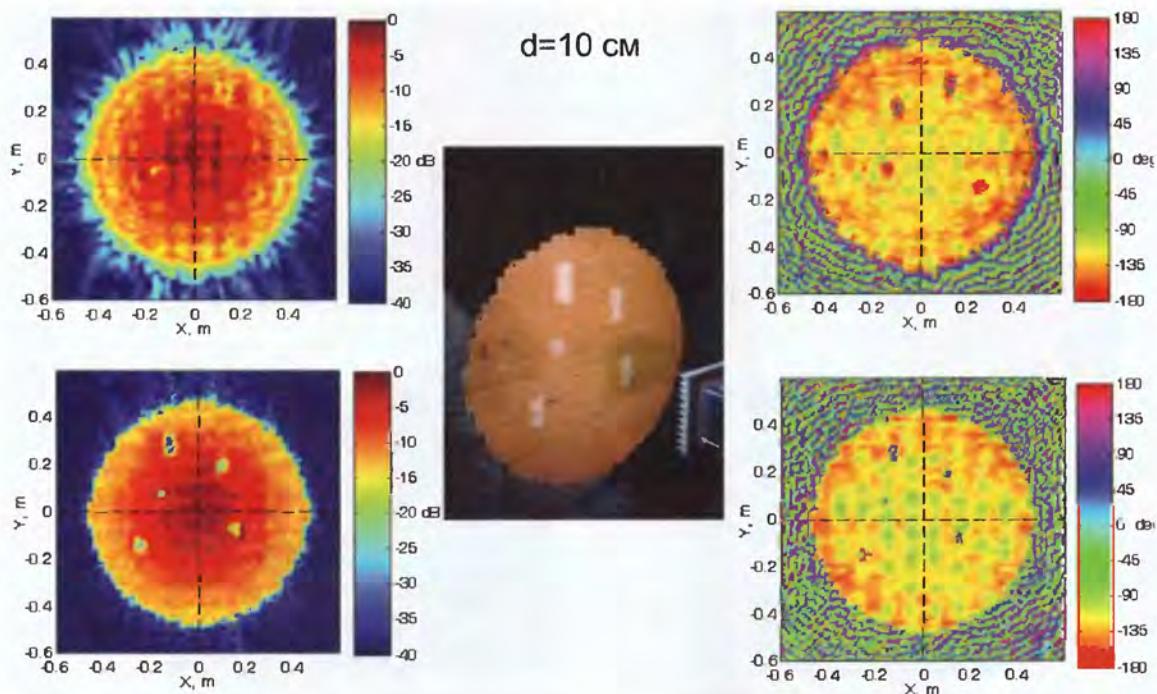
Примеры измерений



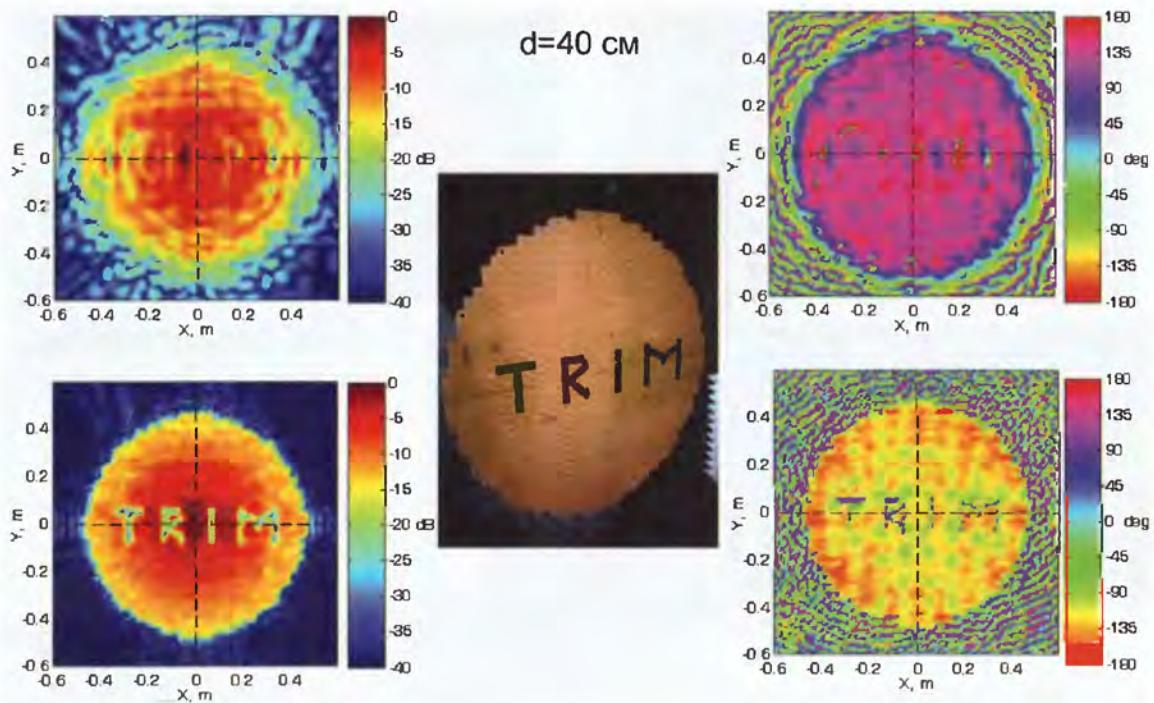
Примеры измерений



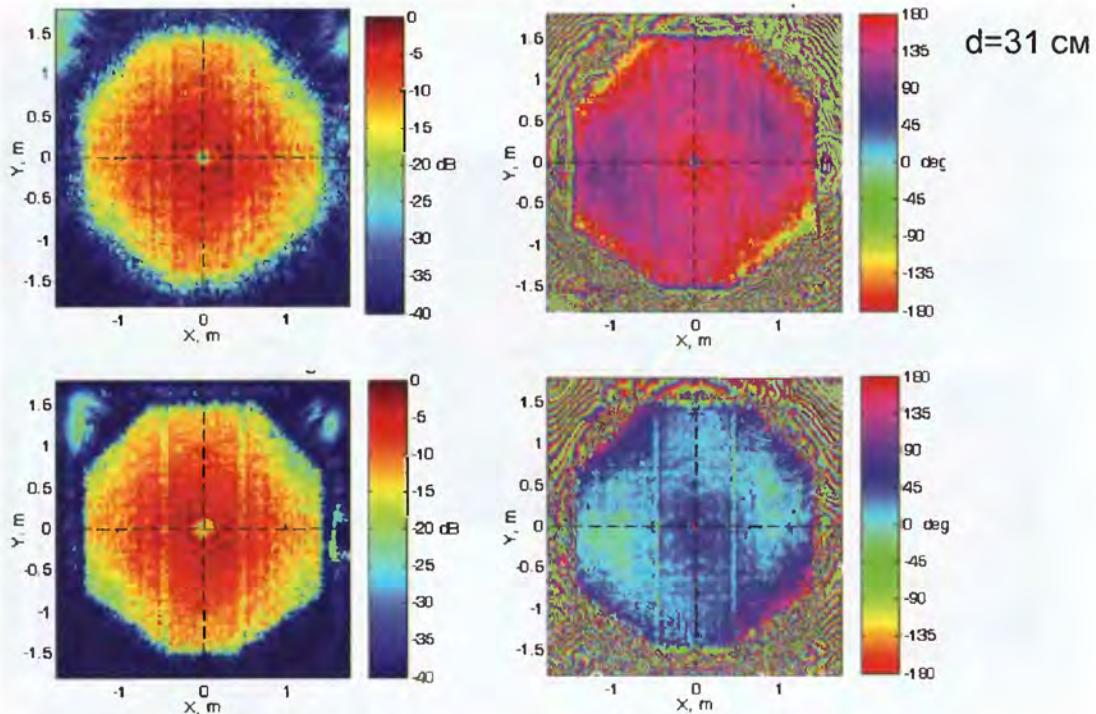
Восстановление АФР в раскрыве

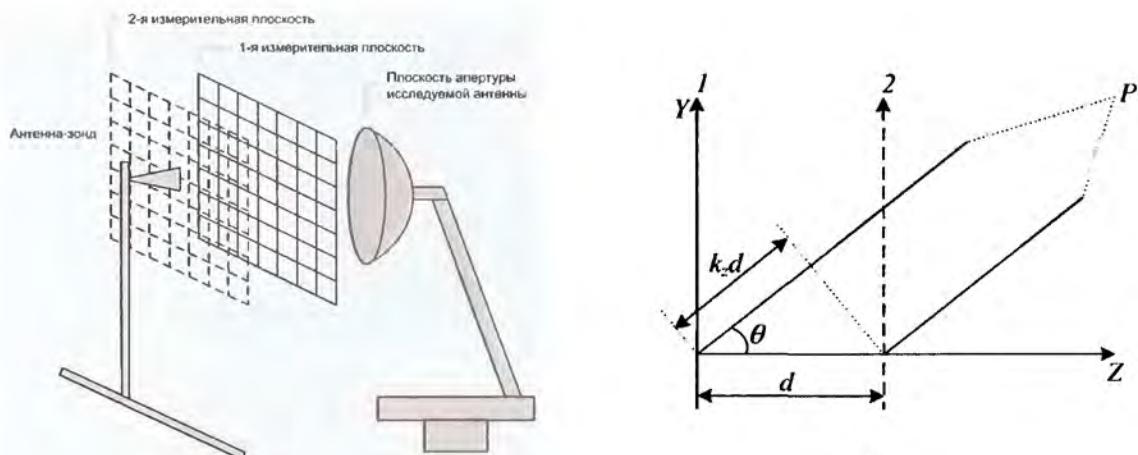


Восстановление АФР в раскрыве



Восстановление АФР в раскрыве





$$A_{x,y}(k_x, k_y) = \Im\{E_{x,y}(x, y, z=0)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{x,y}(x, y, z=0) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy,$$

$$\varphi_d = \frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta = k_z d.$$

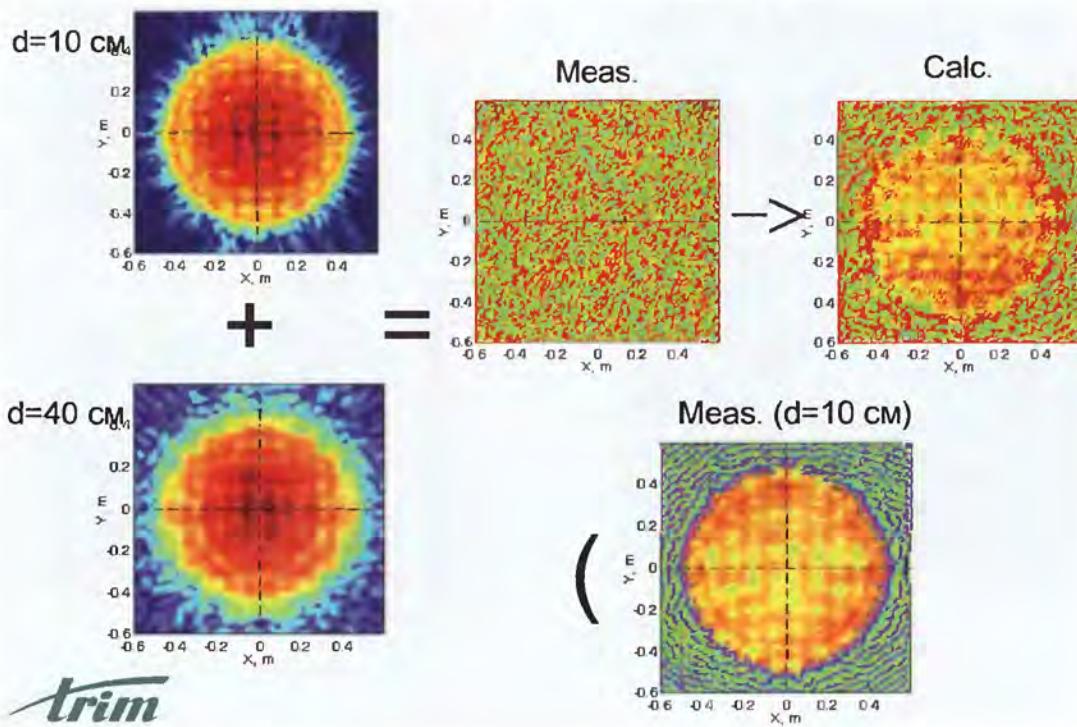
$$E_{x,y}(x, y, z=0) = \Im^{-1}\{A_{x,y}(k_x, k_y)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_{x,y}(k_x, k_y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y$$

$$k_x = k_0 \sin \theta \cos \phi, \quad k_y = k_0 \sin \theta \sin \phi$$

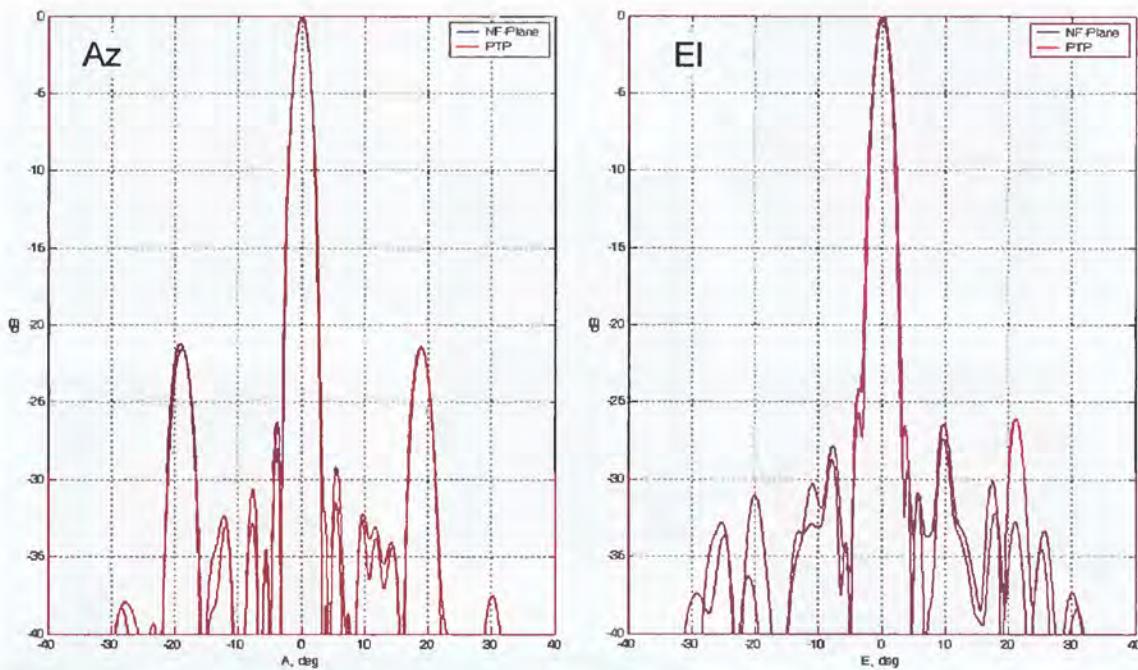
$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda},$$

$$E_{x,y}(x, y, z=d) = \Im^{-1}\{\Im\{E_{x,y}(x, y, z=0)\} e^{-jk_z d}\}$$

Восстановление фазового распределения



Восстановление фазового распределения

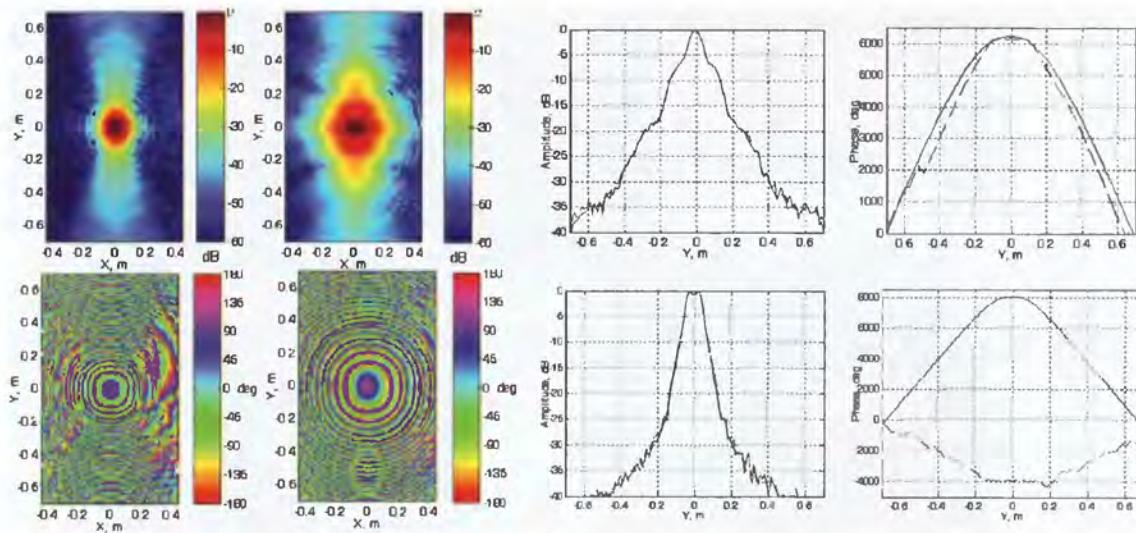


Восстановление фазового распределения

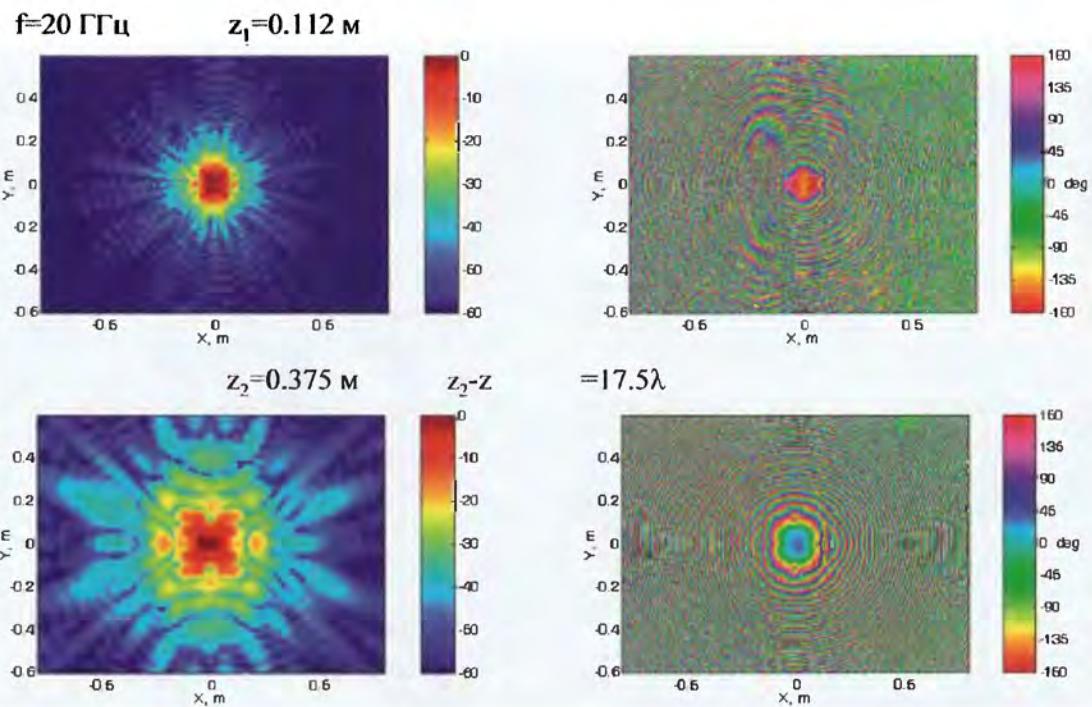
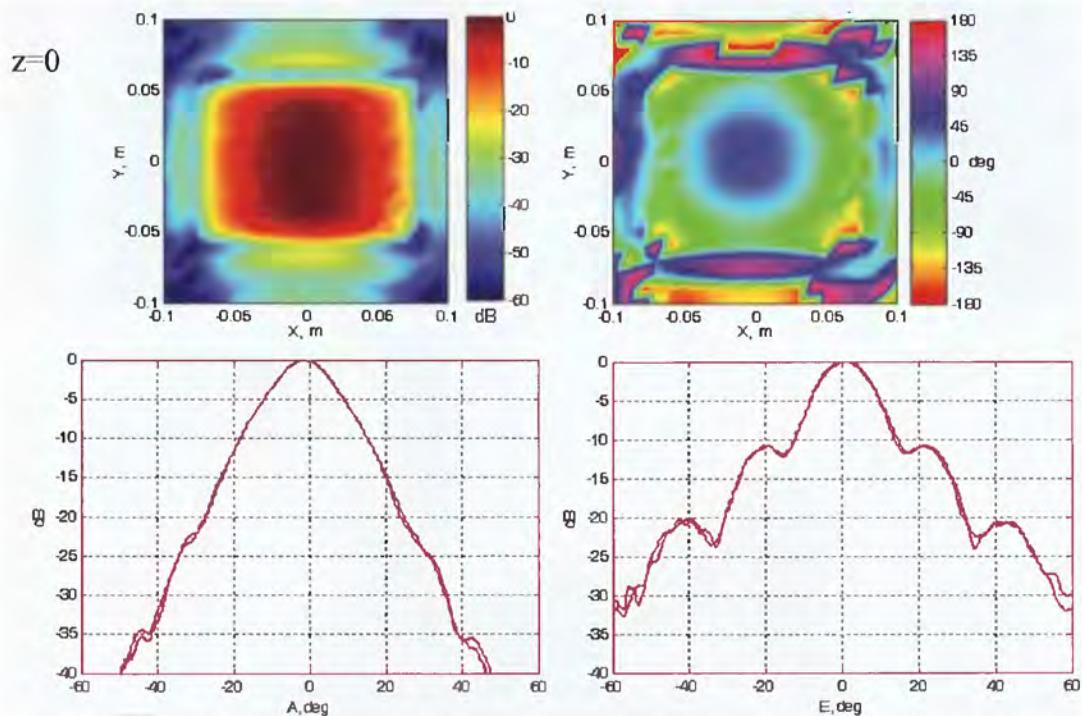
$f=12 \text{ ГГц}$

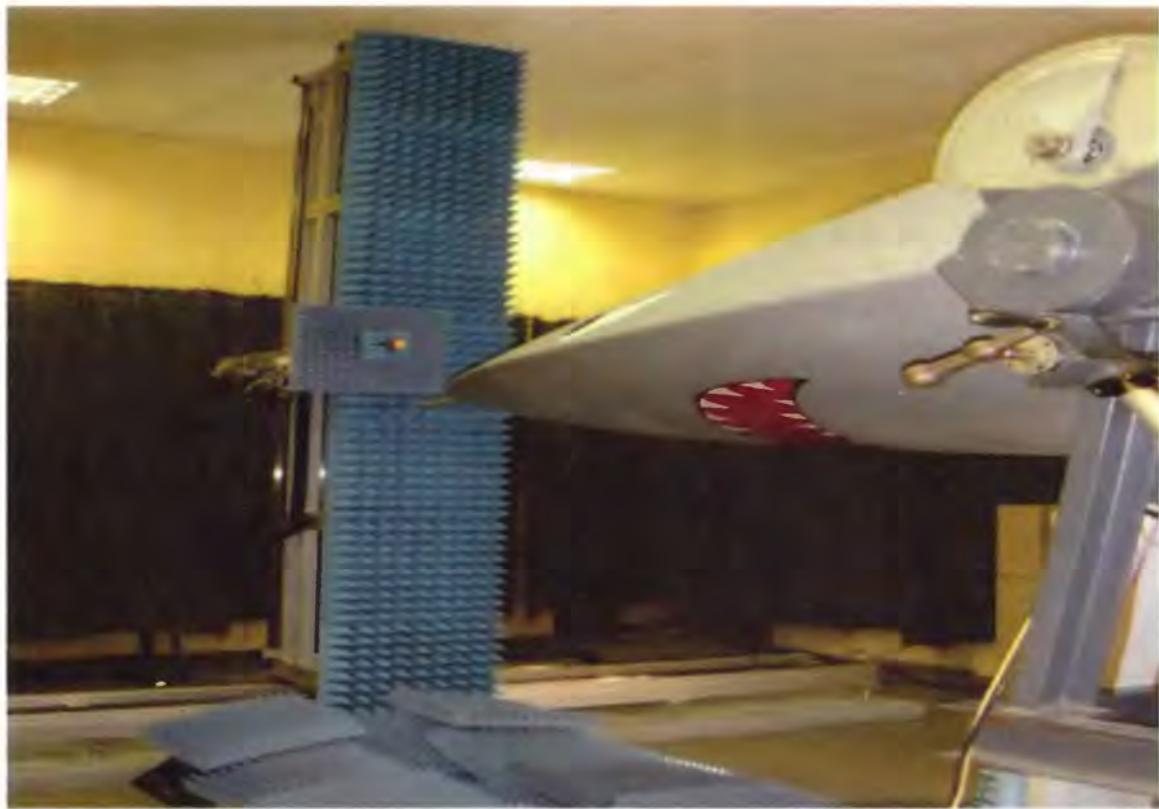
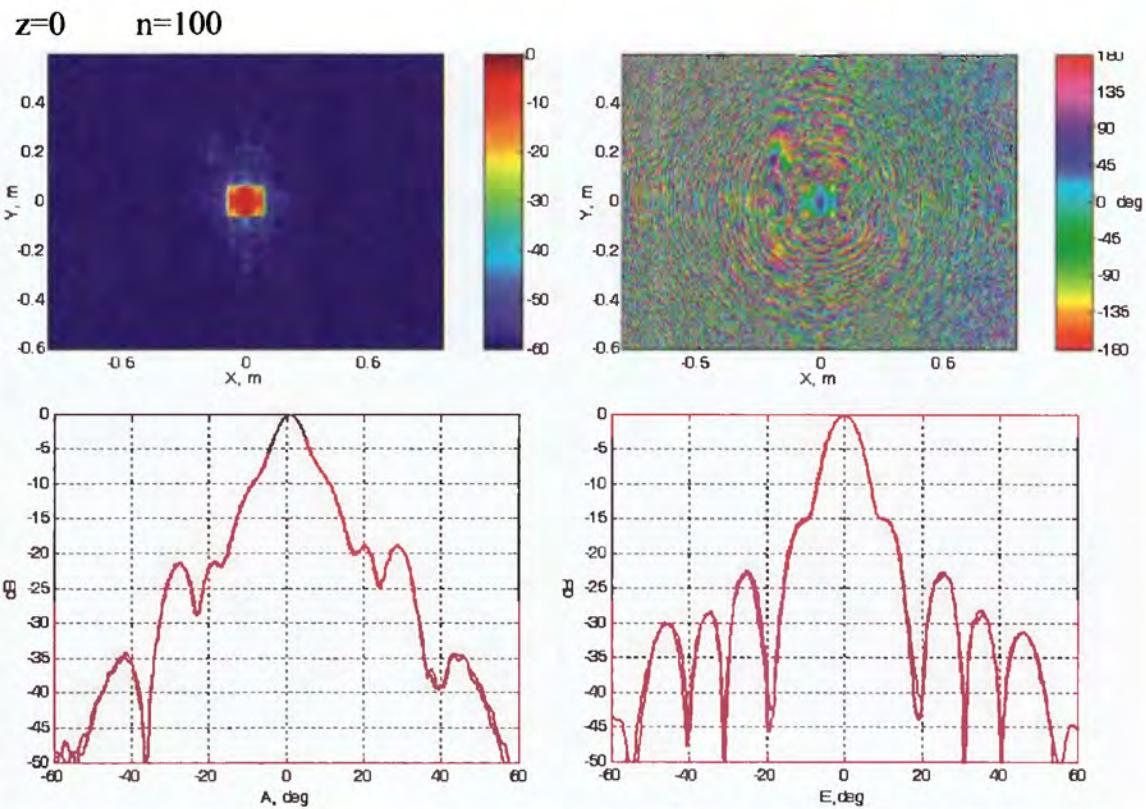
$z_1=0.9 \text{ м}$

$z_2=0.29 \text{ м}$



Восстановление фазового распределения

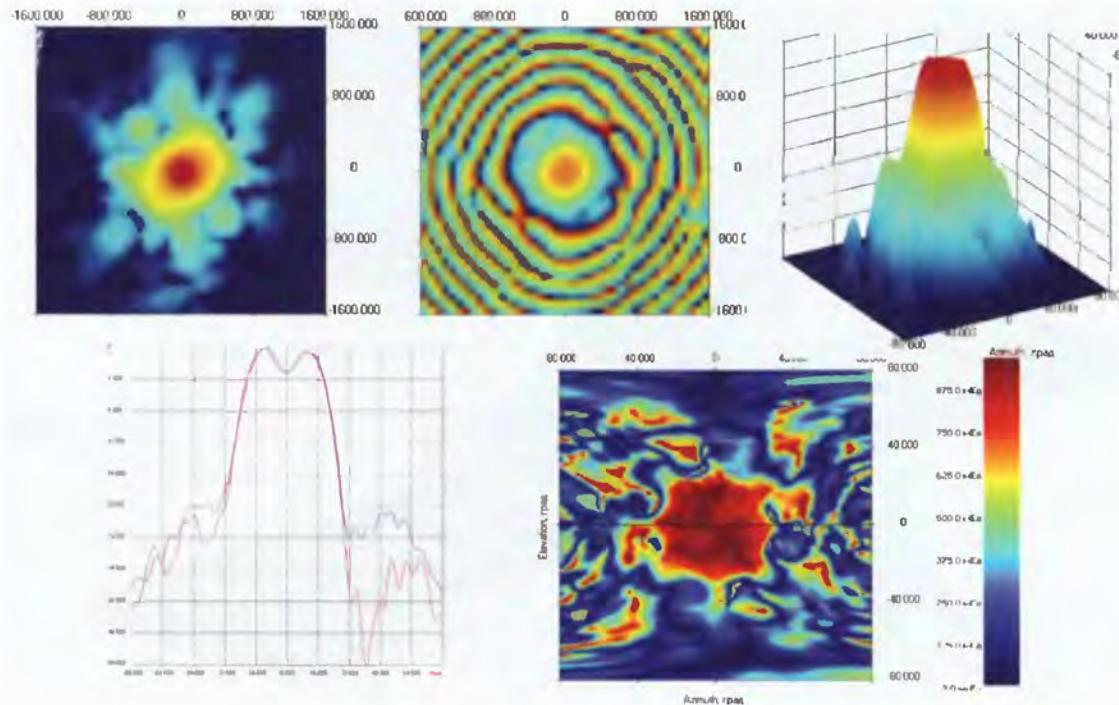








Примеры измерений

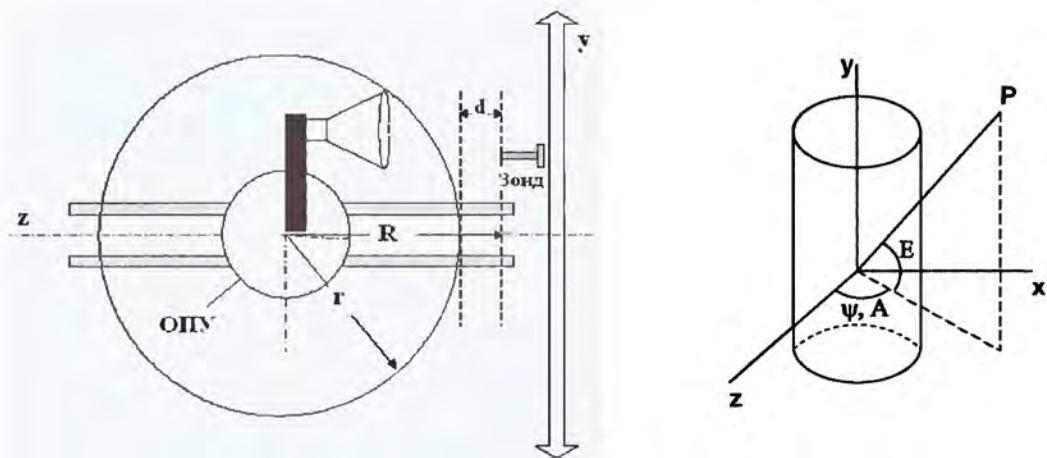


Наклонный сканер



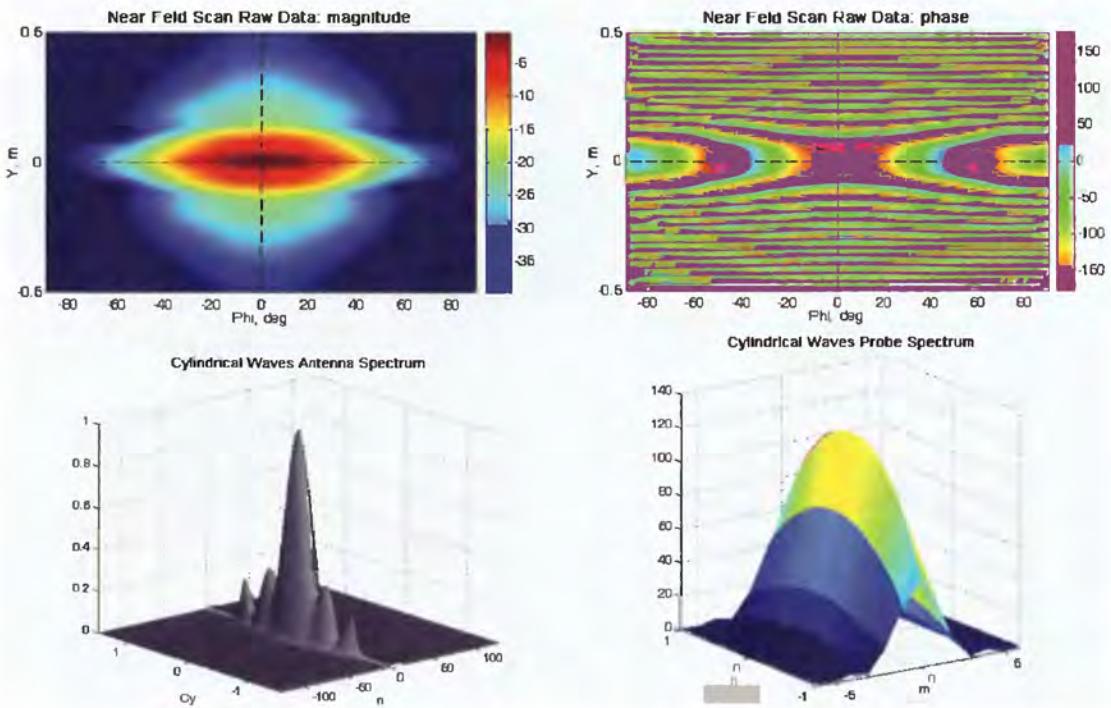


Измерения в ближней зоне (цилиндрический сканер)

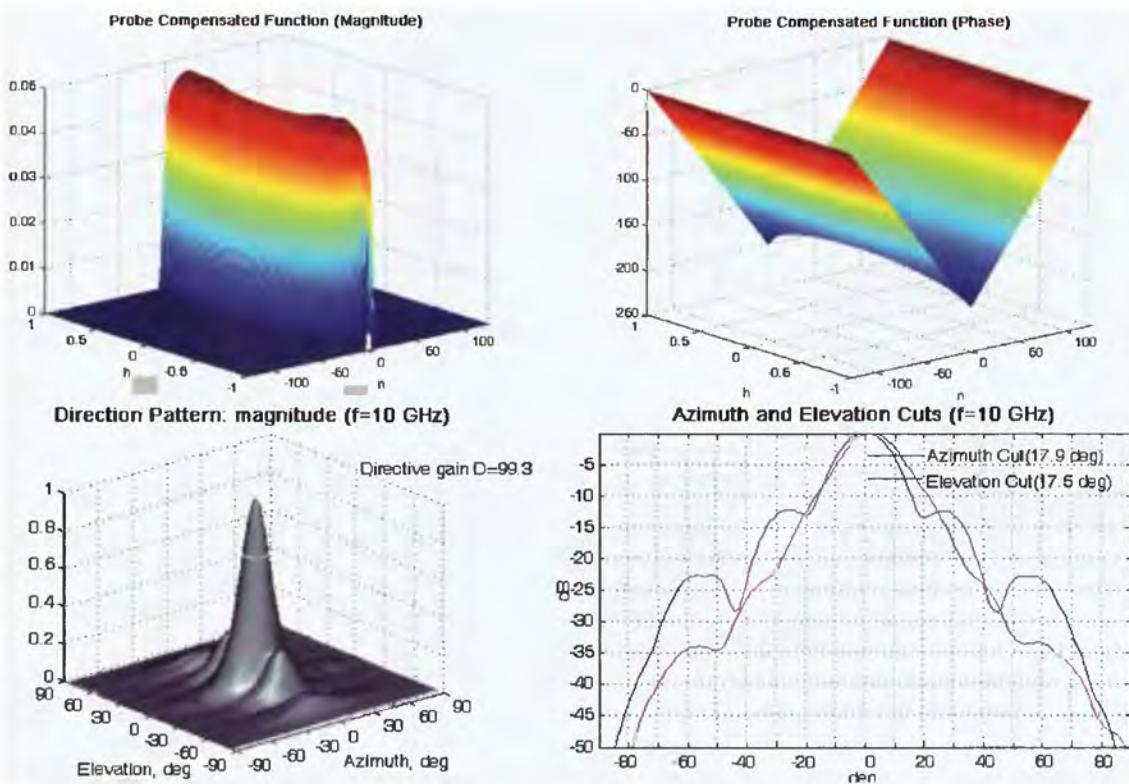


$$\Delta y \leq \frac{\lambda}{2}; \quad \Delta \psi \leq \frac{\lambda}{2r}; \quad r \equiv \text{MRA}.$$

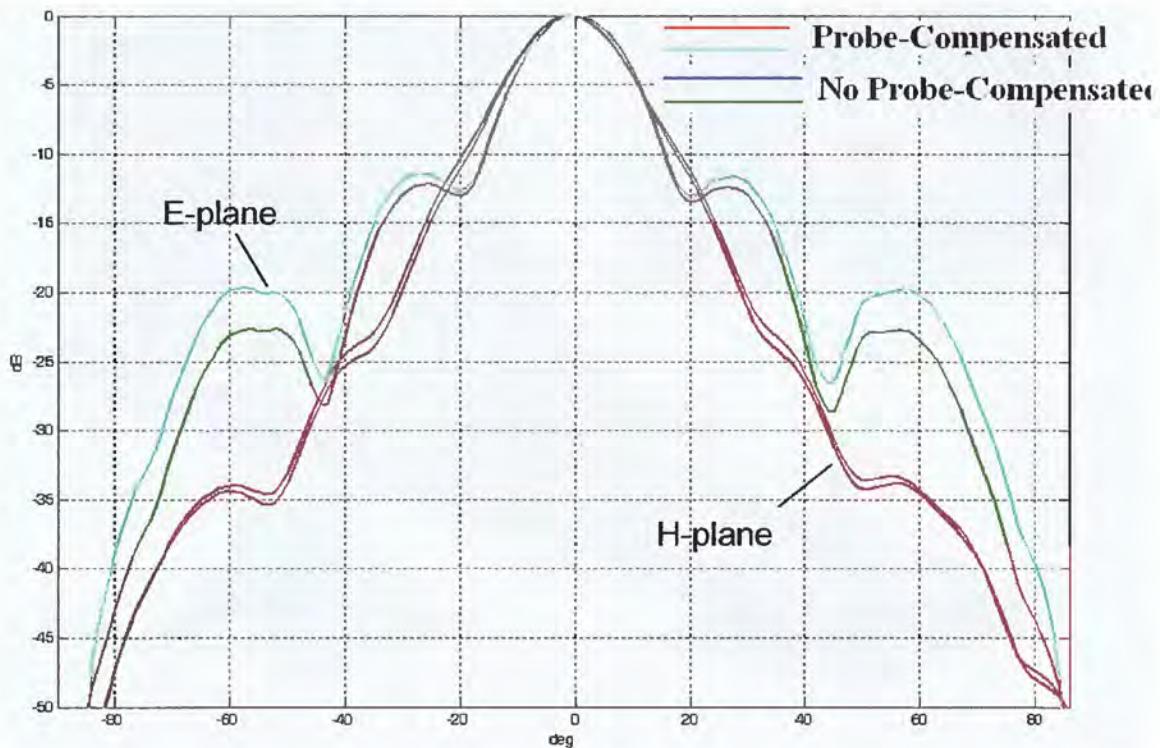
Примеры измерений



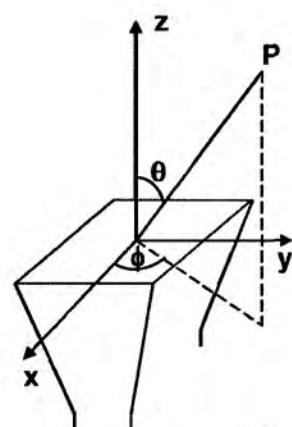
Примеры измерений



Коррекция ДН зонда



Измерения в ближней зоне (сферическое сканирование)

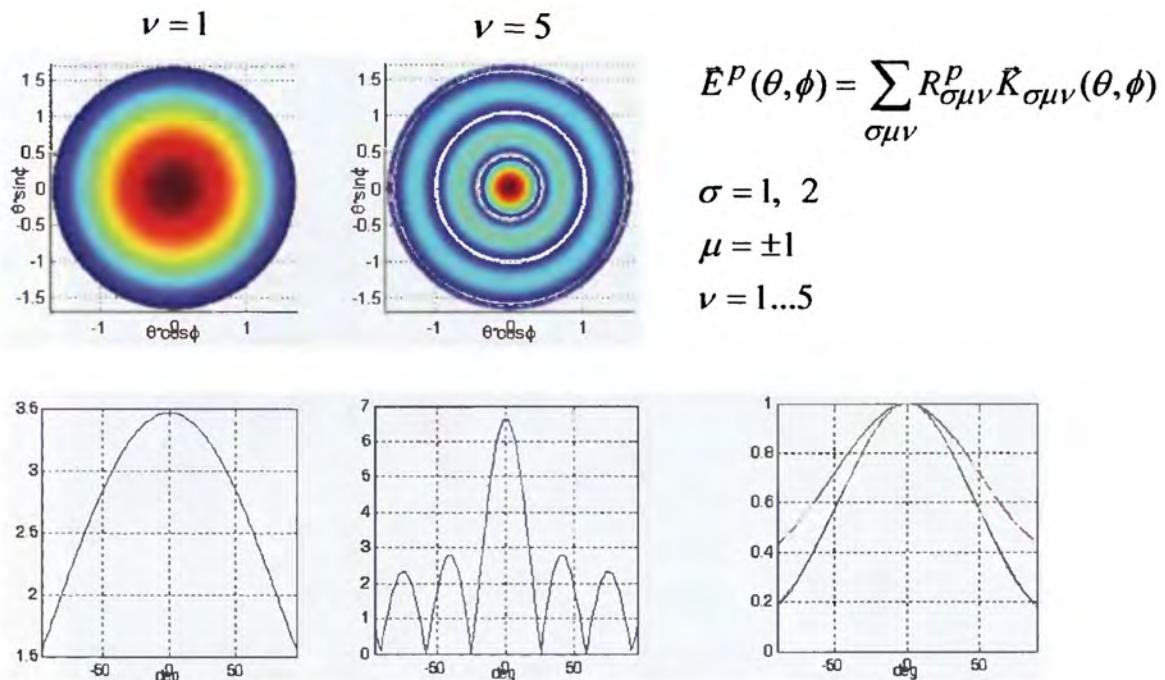


$$\Delta\phi = \Delta\theta \leq \frac{\lambda}{2r}$$

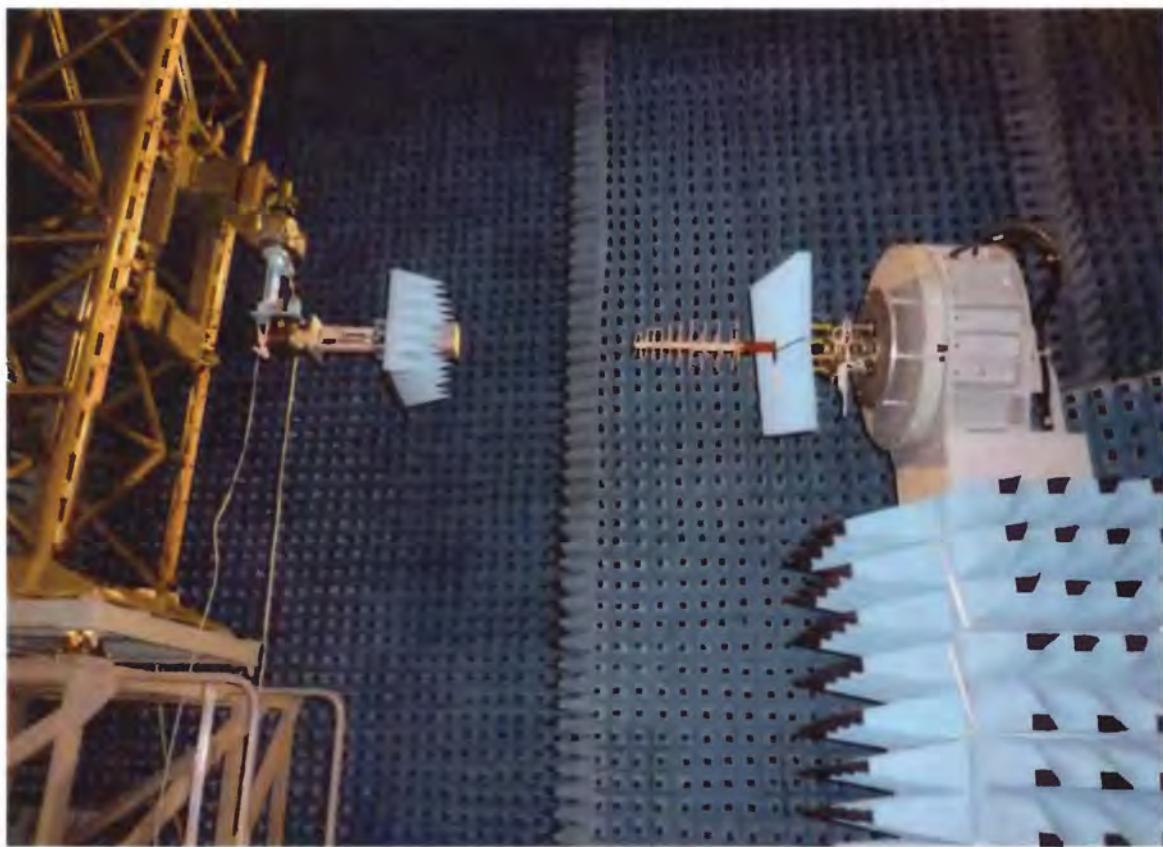
$$r \equiv \text{MRA}$$

$$n_{\max} \geq kr + 5$$

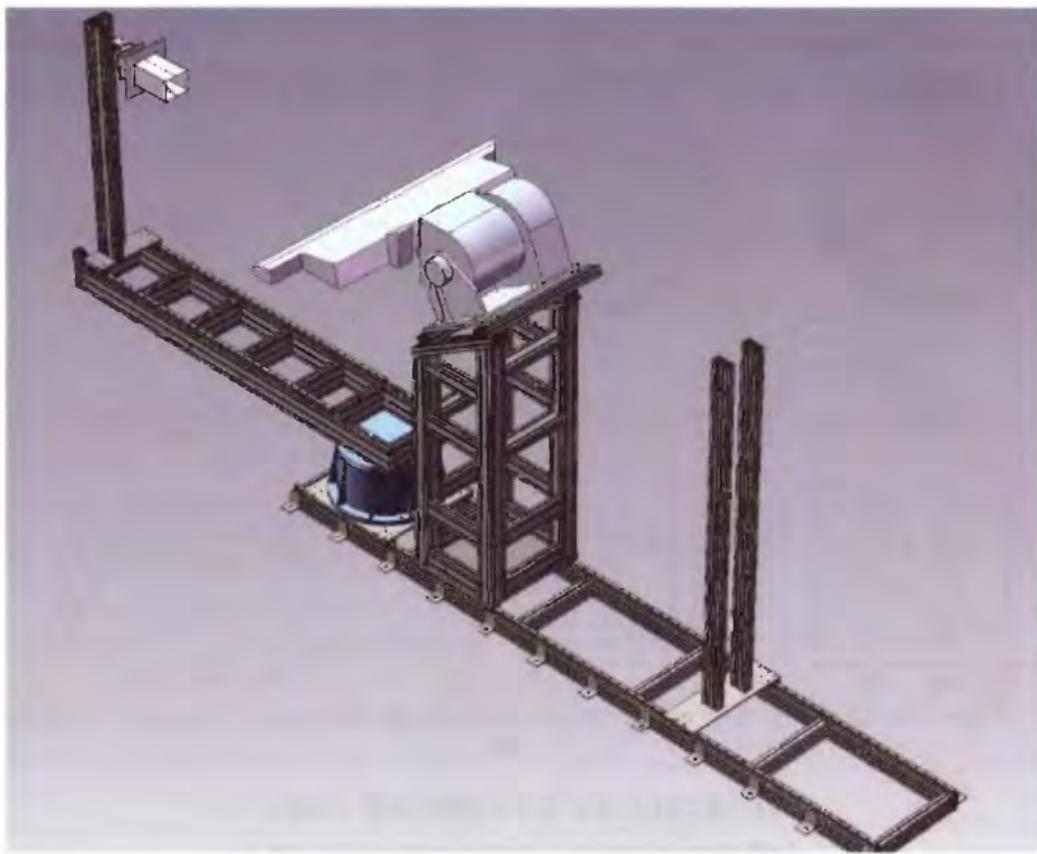
Аппроксимация ДН зонда



Измерения в ближней зоне (сферическое сканирование)



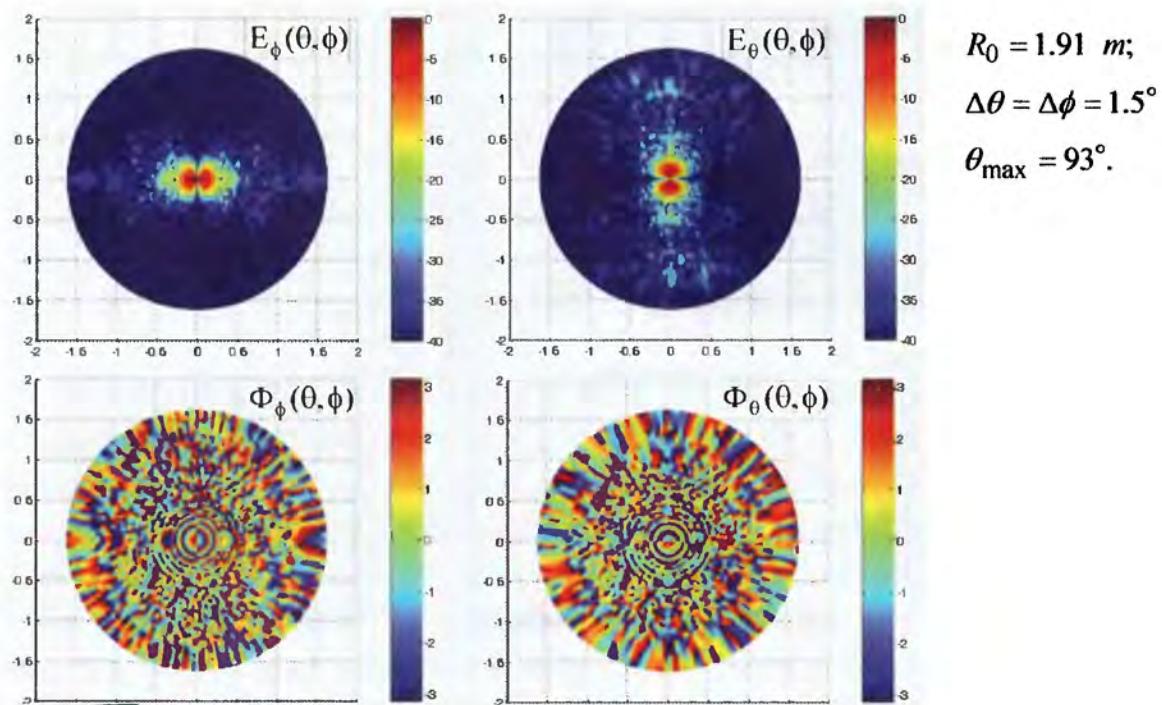
Вариант сферического сканера



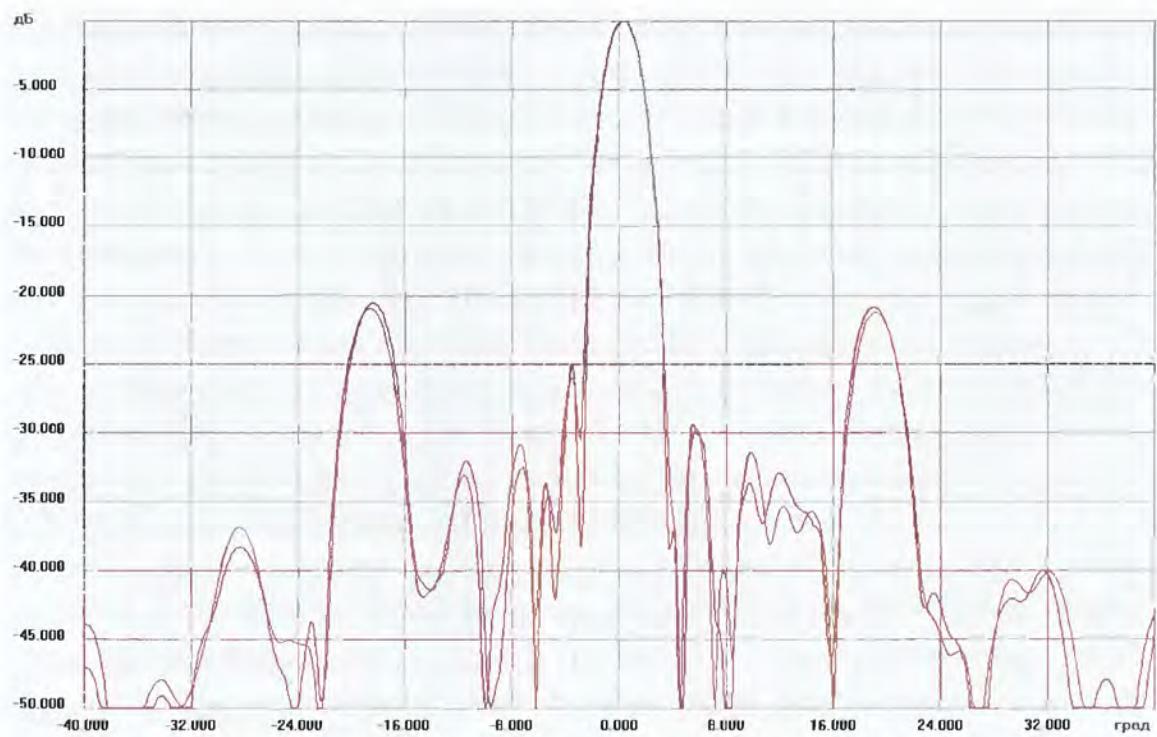
Измерение ФАР с обтекателем



Измерение ФАР в ближней зоне в сферическом сканере



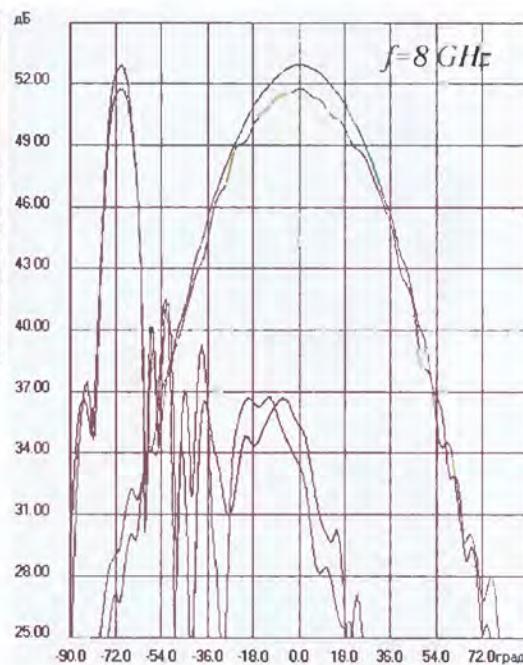
Измерение ФАР: NF Plane-NF Sphere



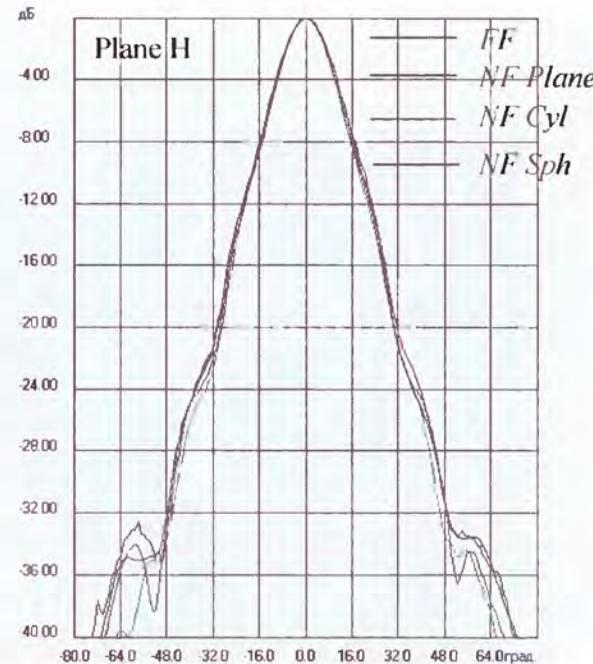
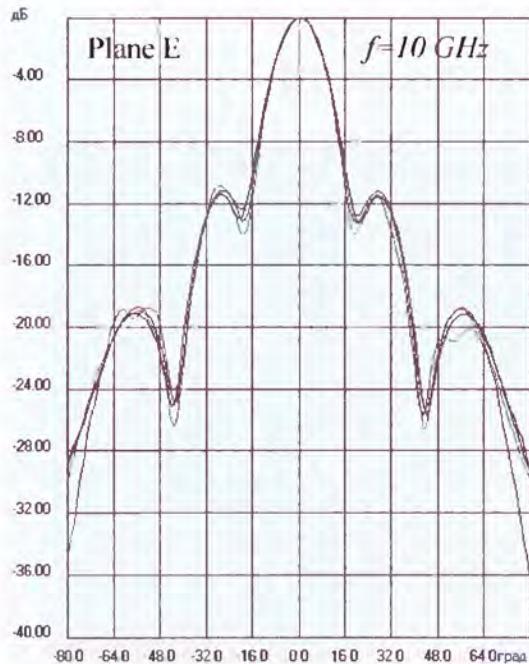
Измерение антенны с обтекателем



$f = 4 \dots 18 \text{ GHz}$
 $R_0 = 1.2 \text{ m}$
 $\Delta\theta = \Delta\phi = 1.5^\circ$
 $\theta_{\max} = 90^\circ$
 $N = 50 \dots 105$



Сравнение методов измерений



ЮСТИРОВКА КАНАЛОВ АФАР И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДН ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА МАКСИМАЛЬНО ПРИБЛИЖЕННОЙ РЕФЕРЕНСНОЙ ПЛОСКОСТИ

Зайцев В. Е., Сергеев В. Н., Локтин В. И.

Постановка задачи

Юстировка или выравнивание по амплитуде и фазе каналов АФАР на прием и передачу является необходимым и часто повторяемым этапом работ при вводе в эксплуатацию любого радиолокатора. В дальнейшем во время эксплуатации юстировка проводится с помощью встроенных систем контроля, таких как система пилот-сигнала, измерение динамических ДН с помощью вынесенных стационарных зондов и т. д.. Как правило, встроенные системы контроля АФР охватывают не весь тракт и дают косвенную информацию о поле в раскрыве антенны. Проведение прямых эфирных измерений АФР или ДН позволяет охватить весь тракт и уточнить погрешность измерений АФР системой встроенного контроля.

Прямые измерения ДН в дальней зоне требуют больших продольных размеров безэховых камер, а восстановление ДН по измерениям поля в раскрыве антенны с отступом от сильно реактивной зоны требует при сканировании больших поперечных размеров камеры. Кроме этого, при юстировке не отдельной антенны, а локатора в целом, приходится сталкиваться с ограничениями, которые обусловлены возможностями работы локатора. В качестве иллюстрации рассмотрим эти ограничения на примере выполнения юстировочных работ локатора S диапазона.

Приемный тракт локатора обрабатывает только «свои» сигналы, т. е. только ЛЧМ в импульсном режиме со станционной синхронизацией. Получить обработанный сигнал в виде оцифрованных квадратур можно на выходе блока обработки сигналов локатора.

В режиме передачи можно излучать гармонический сигнал, имеющийся в перечне сигналов блока формирователя сигналов, но только в импульсном режиме и с полной мощностью. Изменение излучаемой мощности при работе выходных транзисторов усилителей мощности в режиме насыщения возможно в незначительных пределах, а переход к непрерывному сигналу невозможен по причине превышения мощности теплового рассеивания.

Восстановление ДН локатора по измерениям АФР в прожекторной зоне и контролю таким образом качества юстировки встроеннымми средствами локатора были организованы в безэховой камере довольно малых размеров – 5 м × 6 м × 17 м – значительно меньших, чем требуется для прямых измерений ДН в дальней зоне локатора.

Для оценки погрешности юстировки каналов локатора мы задались целью ответить на конкретные вопросы, возникающие при необходимости проведения измерений АФР при малых размерах референсной плоскости (плоскости перемещения зонда). В нашем случае с целью сокращения поперечных размеров референсной плоскости (особенно при сканировании) по критерию существенного спадания амплитуды измеряемого поля на ее краях необходимо приблизить плоскость измерений максимально близко к излучающему раскрыву. Но при этом усиливается влияние измерительного зонда на излучатель измеряемой антенны. Вопрос первый: насколько близко можно приблизится к излучающему раскрыву? Далее: зависит ли измеряемое поле от типа зонда и его согласования? Если да, то каким зондом или набором зондов следует пользоваться? Насколько отличается поле в точке расположения зонда от коэффициента передачи между измеряемой антенной и зондом? Каким должен быть шаг перемещения зонда?

Кроме этого, следует отметить известный факт, что восстановление ДН по измерениям сильно реактивных полей (очень близко от раскрыва) требует большего количества вычислений, чем простое Фурье преобразование тангенциальных компонент электрического поля в дальнюю зону, т. е. требуется анализ стандартного алгоритма обработки результатов измерений.

Проиллюстрируем ответы на эти вопросы на примере вычисления полей и восстановления ДН простейшей 6-элементной линейной решетки полуволновых вибраторов (рис. 1).

**Восстановление ДН по измерениям полей
в прожекторной зоне.
(шестиэлементная линейка вибраторов)**

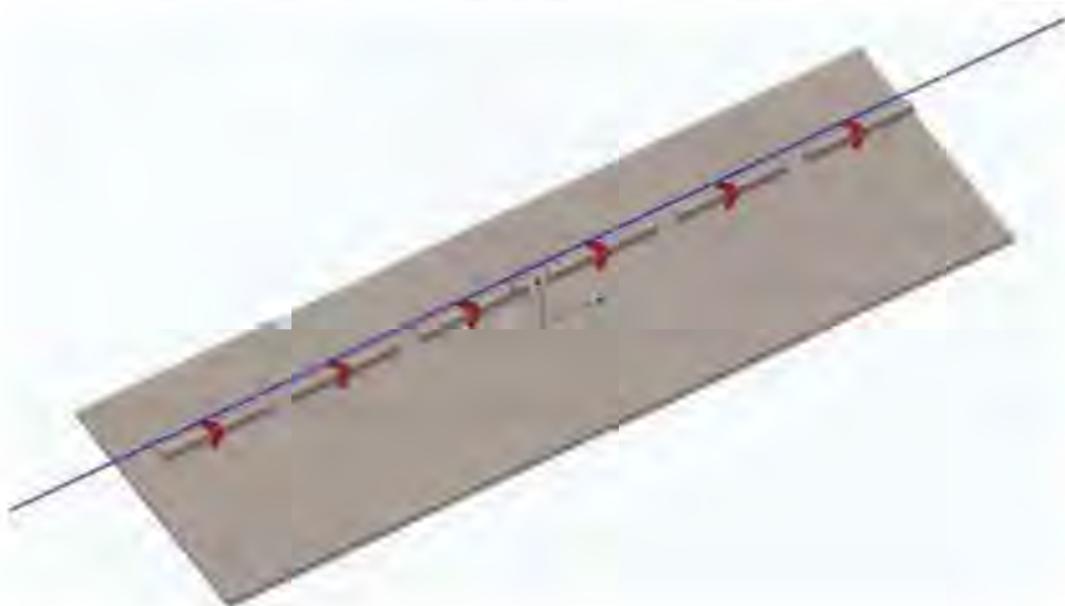


Рис. 1. Шестиэлементная решетка полуволновых вибраторов на расстоянии

Прежде всего отметим, что алгоритм пересчета полей из прожекторной зоны в дальнюю путем Фурье преобразования каждой из компонент поля в раскрыве пригоден для «гладких» полей и только в области нормали к раскрыву. Это утверждение легко пояснить следующими известными доводами. Действительно, поле в дальней зоне определяется только касательными компонентами полей в плоскости интегрирования. Имея в раскрыве, например, только E_x компоненту электрического поля после Фурье преобразования в дальней зоне будем иметь тоже только E_x компоненту, в то время, как в дальней зоне вектор E должен быть перпендикулярным к радиусу в точку наблюдения, т. е. иметь еще и z -компоненту.

В области углов около нормали поле в дальней зоне почти параллельно полю в раскрыве и не имеет z -компонент. Если к тому же поле «гладкое», т. е. E_{tg} компонента поля и H_{tg} связаны соотношением 120π , как в плоской волне, то алгоритм пересчета поля в дальнюю зону сводится к вычислению Фурье образа только тангенциальных компонент электрического поля.

Для «негладких» полей в плоскости интегрирования необходимо учитывать помимо E_{tg} компонент поля еще и H_{tg} компоненты, кото-

рые в сильно реактивных полях не связаны коэффициентом 120π , хотя и остаются ортогональными. В общем случае для расчета компонент электрического поля в дальней зоне (E_{∂_3}) необходимы два набора измерений (поле E_{tg} и поле H_{tg}) или оценка отбрасывания ряда слагаемых в интеграле Кирхгофа, точно задающем поля в пространстве.

В дальней зоне интеграл Кирхгофа имеет вид:

$$\overrightarrow{E_{\partial_3}(\theta, \varphi)} = \iint [[\vec{n} \overrightarrow{E_{tg}}] \vec{r}_0] e^{-j\vec{k}\vec{r}} dS - 120\pi \iint [\vec{r}_0 [[\vec{n} \overrightarrow{H_{tg}}] \vec{r}_0]] e^{-j\vec{k}\vec{r}} dS, \text{ где } \quad (1)$$

$$\vec{r}_0 = \frac{\vec{k}}{k} = \vec{e}_x \cos \theta \cos \varphi + \vec{e}_y \cos \theta \sin \varphi + \vec{e}_z \sin \theta, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda},$$

\vec{n} — нормаль к раскрыву, dS — элементарная площадь с существенной амплитудой поля антенны.

Первый интеграл в (1) после раскрытия векторных произведений разделяется на два слагаемых

$$\iint [[\vec{n} \overrightarrow{E_{tg}}] \vec{r}_0] e^{-j\vec{k}\vec{r}} dS = \iint \{ (\vec{n} \overrightarrow{E_{tg}}) \vec{r}_0 - \overrightarrow{E_{tg}} \cos \theta \} e^{-j\vec{k}\vec{r}} dS, \quad (2)$$

первое из которых дает все три компоненты поля $E_{\partial_3}(\theta, \varphi)$, в том числе и E_z компоненту поля в дальней зоне. Второе слагаемое представляет Фурье образ тангенциальных компонент электрического поля, которым часто ограничиваются при вычислении ДН. Таким образом, сведение вычисления ДН по измерениям в ближнем, а потому реактивном поле к преобразованию Фурье поля E_{tg} в раскрыве является приближением. При ограничении вычислений ДН Фурье образом поля E_{tg} требуется анализ веса второго слагаемого в (1) и первого слагаемого в (2). Проанализируем это на примере выбранной решетки полуволновых вибраторов (рис.1).

Рассмотрим вспомогательную упрощенную область интегрирования, показанную на рисунке (1) синей линией. Помимо сведения двухмерного интегрирования к одномерному задача упрощается наличием на этой линии только двух компонент полей: E_x и H_y (из симметрии задачи). Уменьшение площади интегрирования до линии позволяет выявить общие закономерности поведения полей без претензии на количественное совпадение с точным результатом.

Как видно из рисунков (2–5), по мере удаления от излучающего раскрыва антенны поле E_x становится более гладким, но занимает все большую площадь по критерию одинакового спадания на краях. Метками на рисунках отмечены края раскрыва антенны.

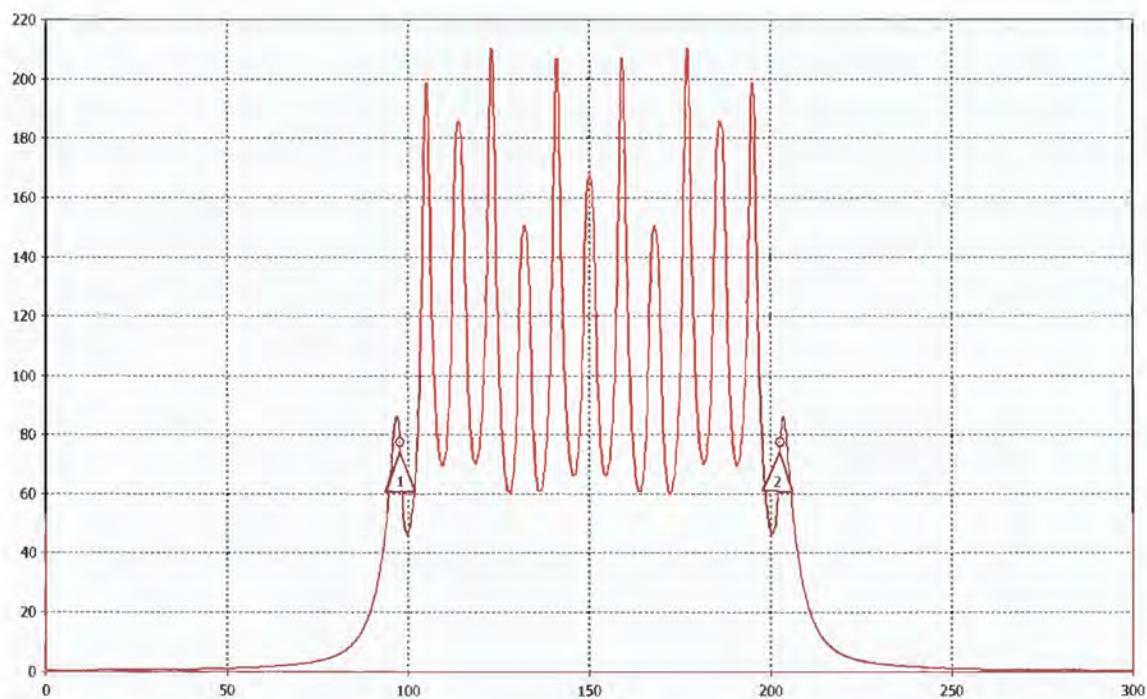


Рис. 2. Амплитудное распределение вдоль решетки на расстоянии $\lambda/12$ от вибраторов

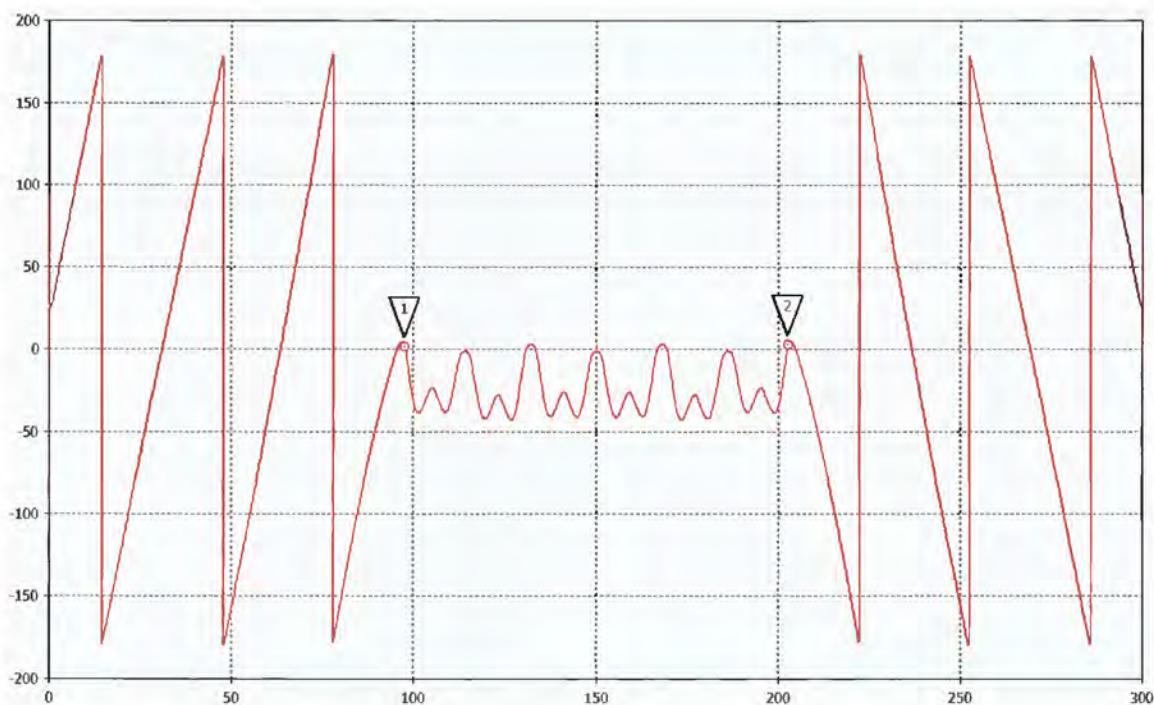


Рис. 3. Фазовое распределение вдоль решетки на расстоянии $\lambda/12$ от вибраторов

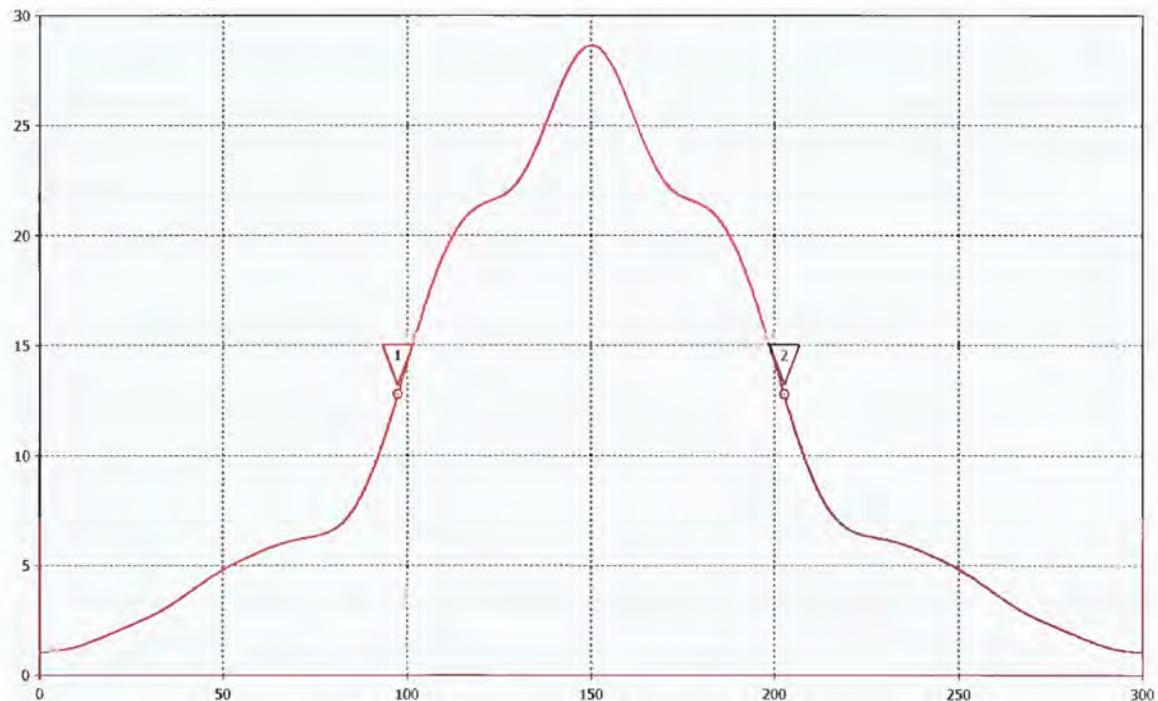


Рис. 4. Амплитудное распределение вдоль решетки на расстоянии 3λ от вибраторов



Рис. 5. Фазовое распределение вдоль решетки на расстоянии 3λ от вибраторов

При малом удалении амплитуда отслеживает точки запитки вибраторов и их концы при почти постоянной фазе поля вдоль раскрыва. При удалении на 3λ амплитуда сглаживается, растягивается на более длинную линию существенного влияния поля, а фазовое распределение становится значительно нелинейным. При постоянном и очень мелком шаге ($\lambda/180$) на длине, вдвое превышающей размер решетки, восстановленная ДН во втором случае приводит к ошибке ≈ 1 дБ на уровне первого лепестка, а на уровне второго ≈ 5 дБ (рис. 6).

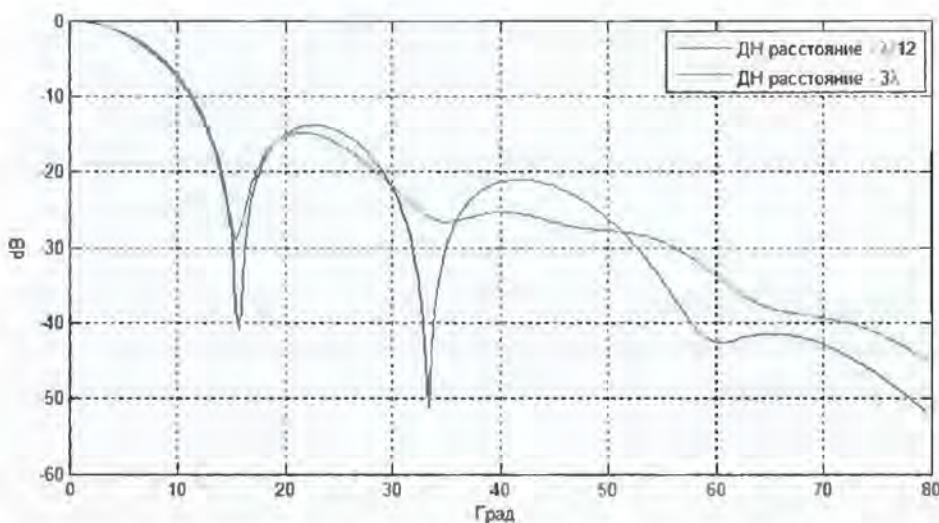


Рис. 6. Фурье образ поля E на синей линии (двойной раскрыв)

Для уменьшения ошибки на уровне -13 дБ до 0.3 дБ во втором случае необходимо увеличить длину линии существенного влияния втрое по отношению к размеру решетки (рис. 7).

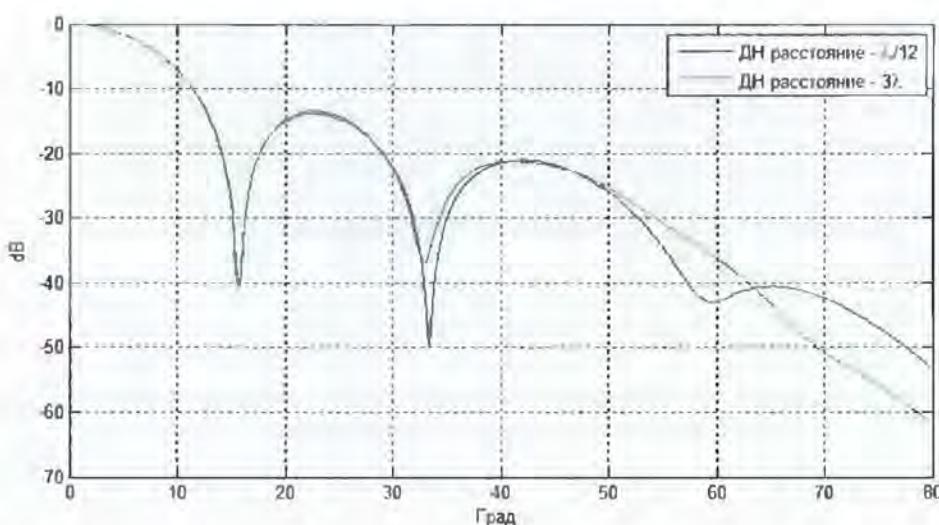


Рис. 7. Фурье образ поля E на синей линии (тройной раскрыв)

Почти одинаковое искажение восстановленной ДН по мере приближения к раскрыву от 3λ до $\lambda/12$ наблюдается, если при этом приближении шаг выборки поля уменьшается от $\lambda/2$ до $\lambda/8$ (рис. 8–10).

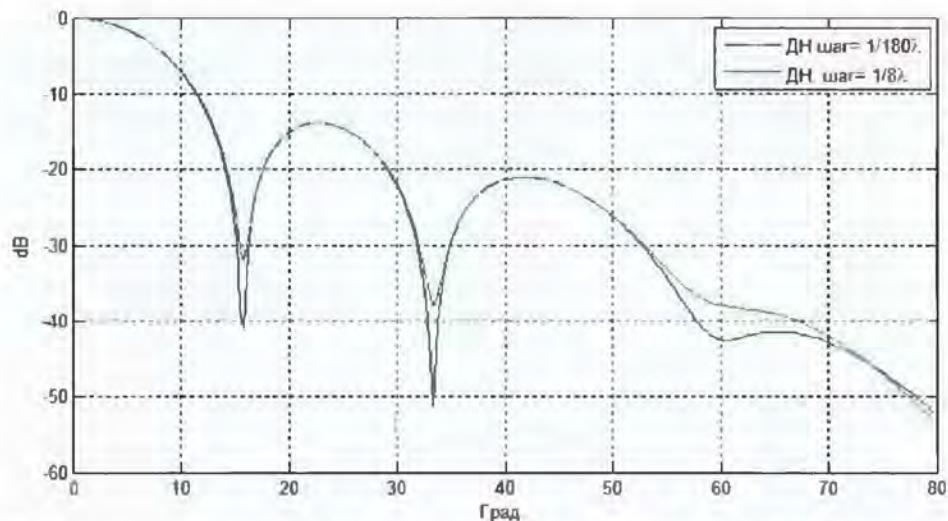


Рис. 8. Фурье образ поля Е на синей линии (удаление $\lambda/12$, двойной раскрыв)

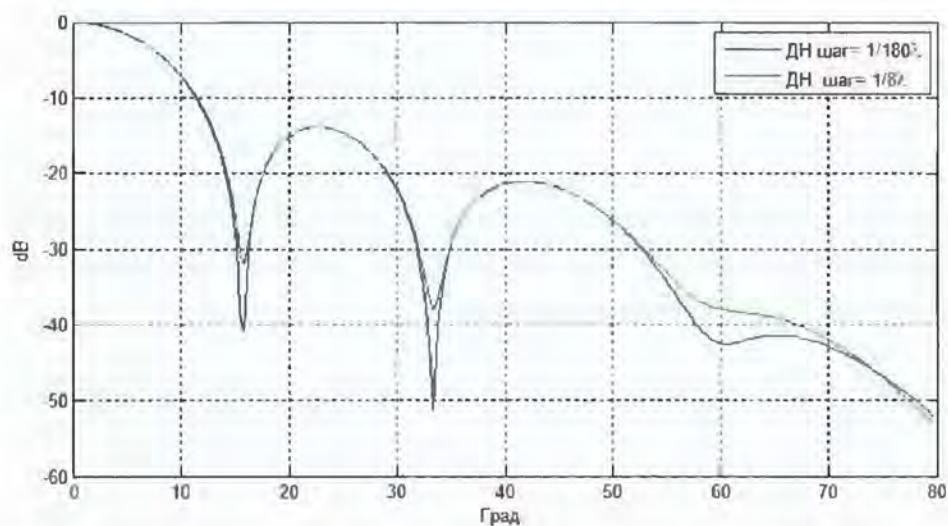


Рис. 9. Фурье образ поля Е на синей линии (удаление $\lambda/12$, двойной раскрыв)

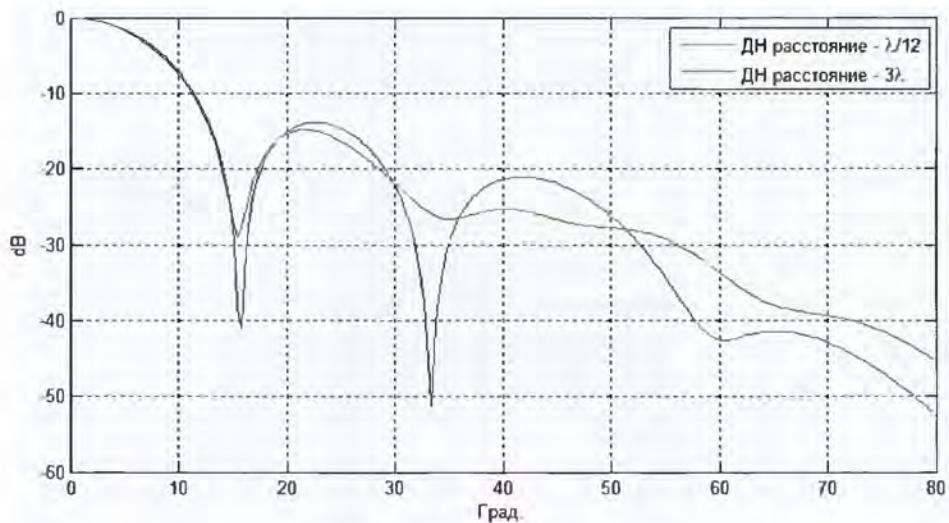


Рис. 10. Фурье образ поля Е на синей линии (удаление 3λ тройной раскрытия)

Одним из критериев «гладкости» поля может служить отношение тангенциальных составляющих электрического и магнитных полей на плоскости интегрирования. В дальней зоне это отношение равно 120π . На (рис. 11) показано это отношение для сравнительно гладкого поля в раскрытии решетки (рис. 1).

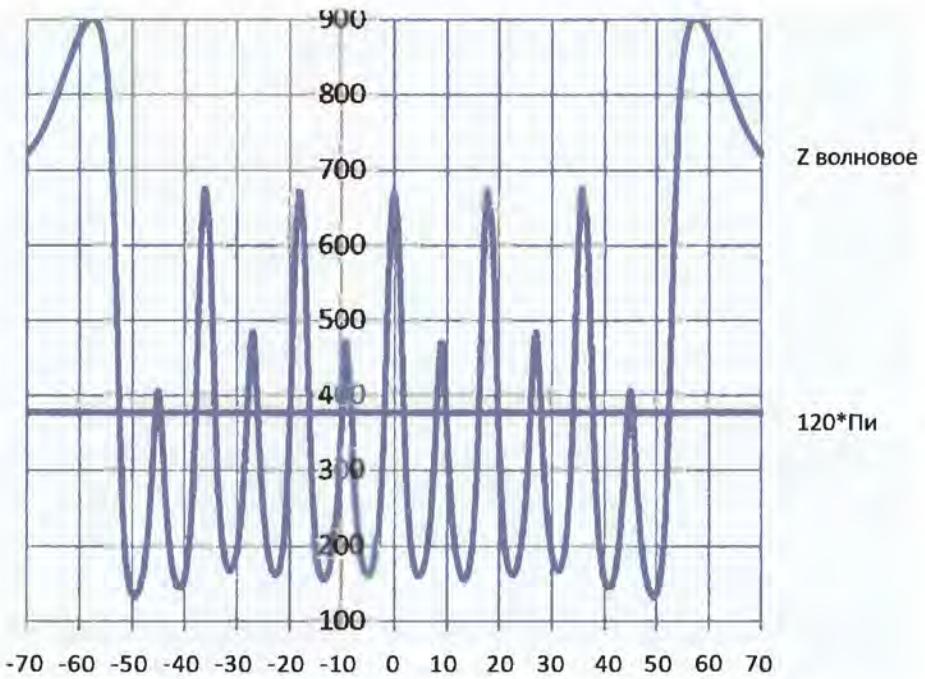


Рис. 11. Волновое сопротивление в раскрытии решетки

При восстановлении ДН быстро осциллирующие гармоники распределения поля дают нулевой вклад в Фурье образ поля. На (рис. 12–13)

показано влияние быстро осциллирующих гармоник поля на ДН по сравнению с равномерным амплитудным распределением.

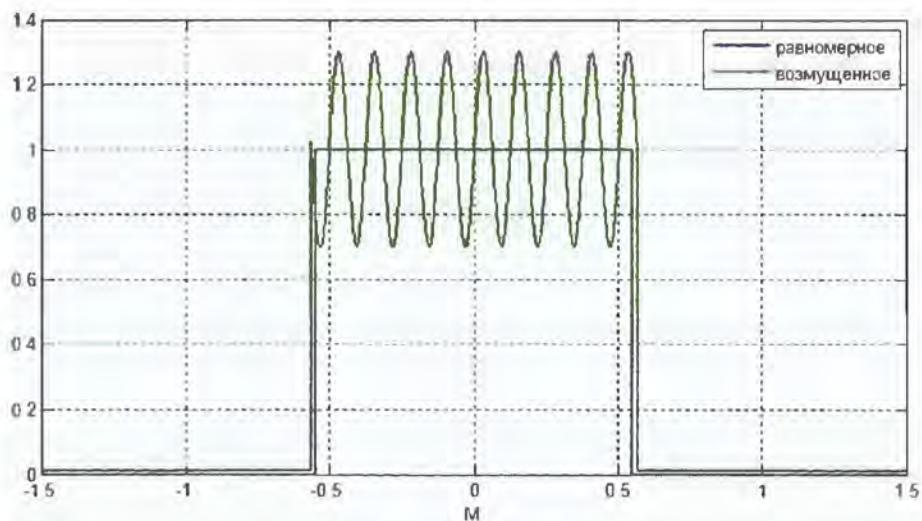


Рис. 12. Аппроксимация распределения поля (рис. 2)

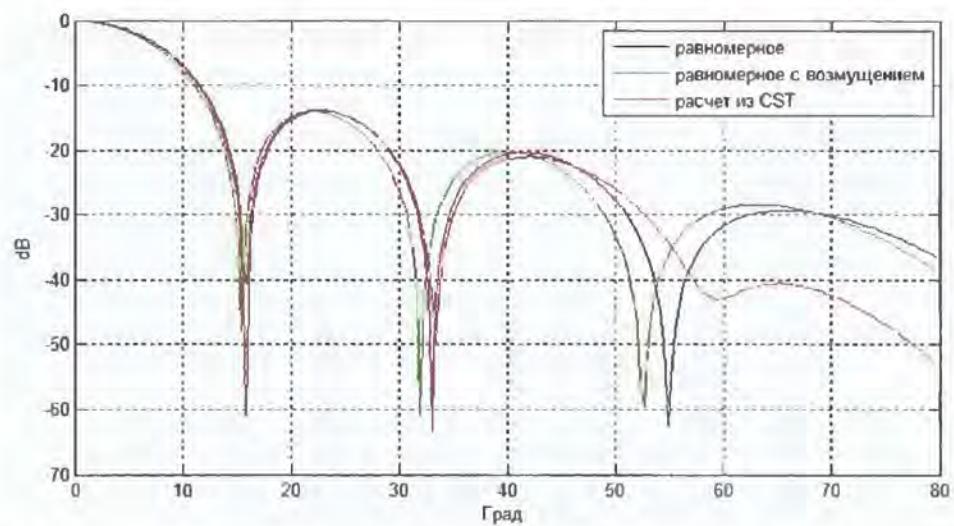
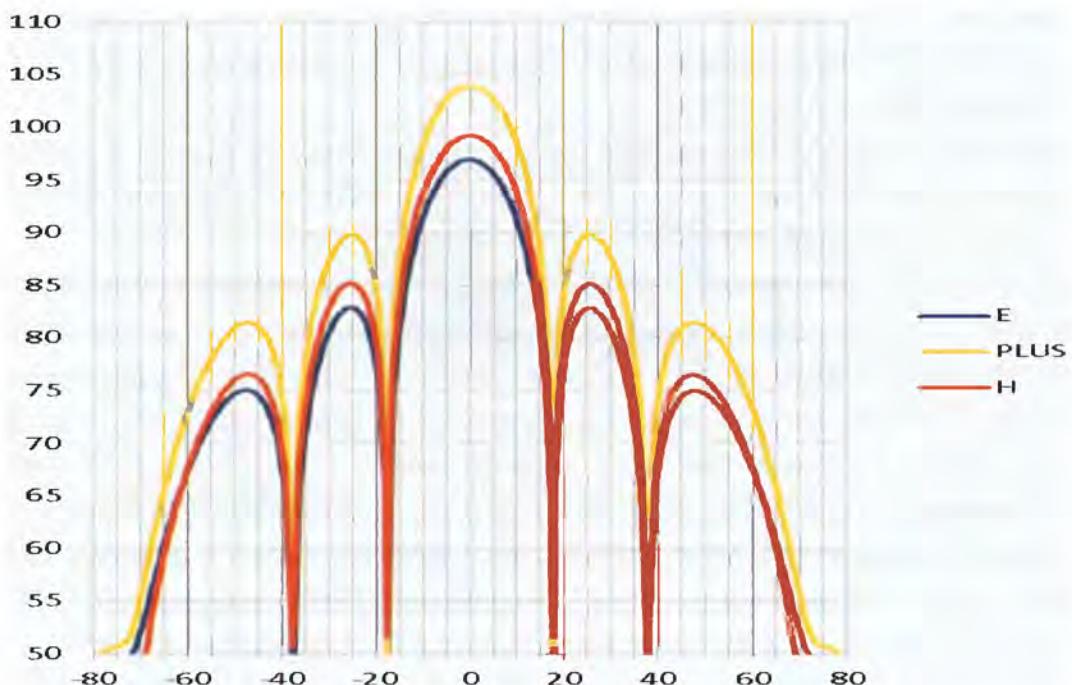


Рис. 13. Восстановленные ДН для гладкого, осциллирующего и поля (рис. 2)

Оценим разницу в оценке ДН как Фурье образа только поля E_x и как полного интеграла Кирхгофа (1). Применим к полю на синей линии (рис. 1) преобразование (1), т. е. наряду с Фурье образом поля E_x найдем Фурье образ H_y с сомножителями (1). На (рис. 14) показан результат счета.



*Рис. 14. Вычисление интегралов от E и H по (1) и их суммы
(по осям: x – угол отклонения от нормали, y – поле в дБ)*

Отметим хорошее совпадение ДН по полям E и H , что позволяет сделать вывод о достаточности восстановления ДН по одному из полей по крайней мере для полей с реактивностью (рис.11).

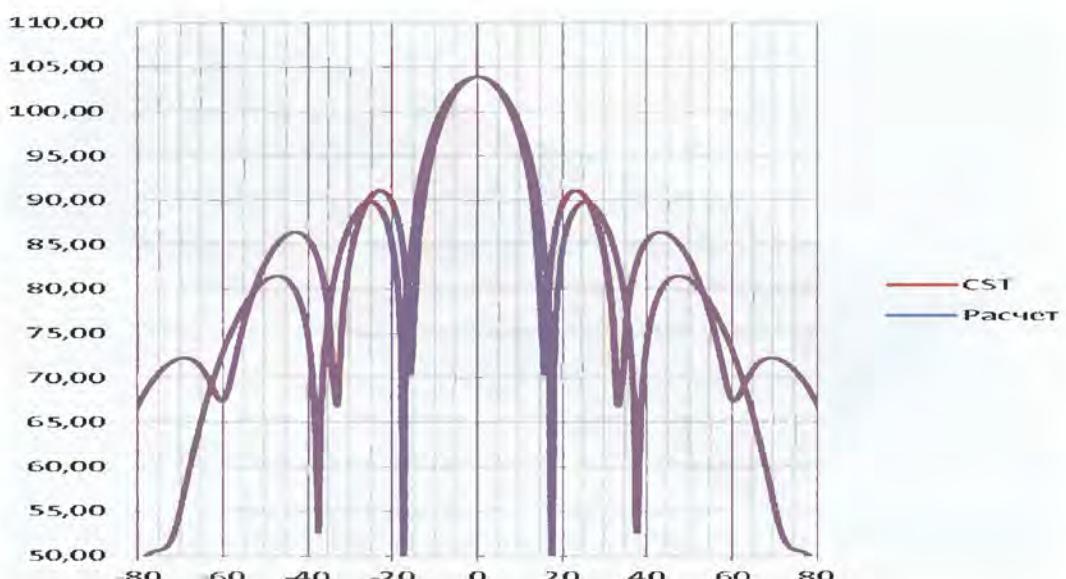


Рис. 15. Сравнение главного сечения ДН (CST) и интеграла (1) для решетки (по осям: x – угол отклонения от нормали, y – поле в дБ)

На (рис. 15) показаны главное сечение трехмерной ДН решетки, вычисленное с учетом экрана по алгоритму CST и полный интеграл (1), вычисленный на синей линии.

Несмотря на разницу в областях интегрирования видно хорошее совпадение результатов в пределах первого бокового лепестка, причем как полного интеграла, так и отдельных его слагаемых.

Рассмотренный пример позволяет сделать вывод о допустимости расположения референсной плоскости очень близко от раскрыва и о достаточности восстановления ДН по одному из полей на референсной плоскости для модели антенны (рис. 1) с погрешностью 0.5 дБ на уровне первого бокового лепестка. Представляет интерес получить аналогичные результаты для антенн с более сильным по критерию отличия отношения тангенциальных составляющих электрического и магнитных полей от 120π реактивным полем на референсной плоскости.

Антenna с сильным реактивным полем

Ниже для иллюстрации приведены результаты расчетов и натурных измерений специального эталона (рис. 16–17) с очень «негладким» полем в раскрыве.

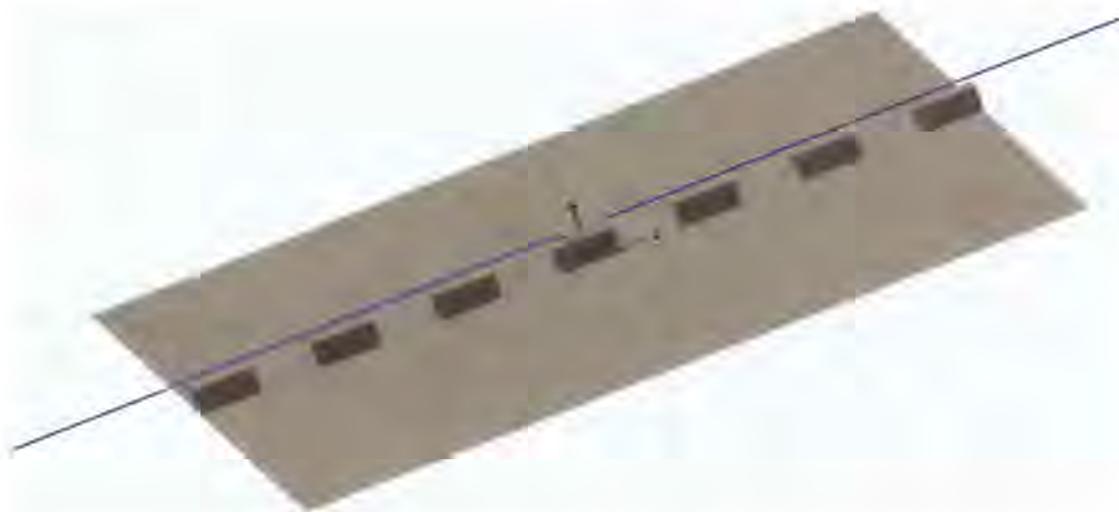


Рис. 16. Эталонная антenna

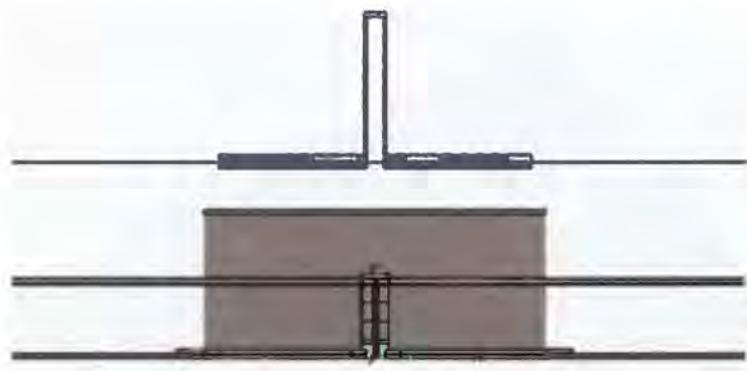


Рис. 17. Сечение эталонной антенны и зонда

Антенна (эталон) возбуждается по центру коаксиальным портом и формирует на синей линии как и в случае решетки (рис. 9) только E_x и H_y компоненты полей.

Эталон формирует существенное реактивное поле, что обусловлено наличием E_z компоненты на синей линии, много превосходящей E_x и H_y компоненты (рис. 18), которая поскольку не излучается в направлении нормали, то формирует реактивное поле.

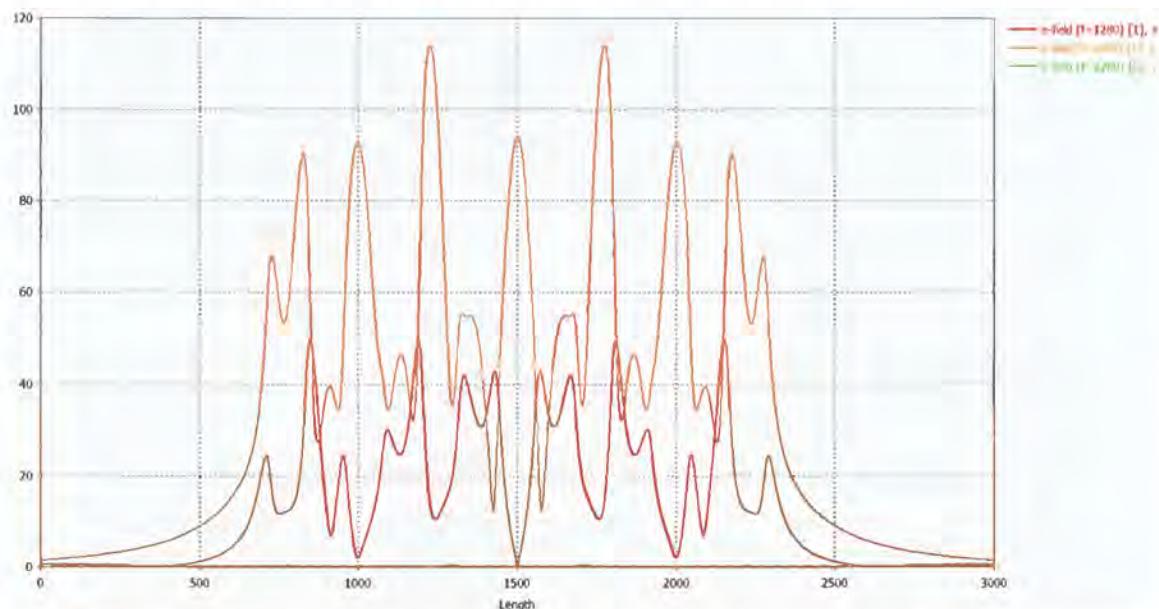
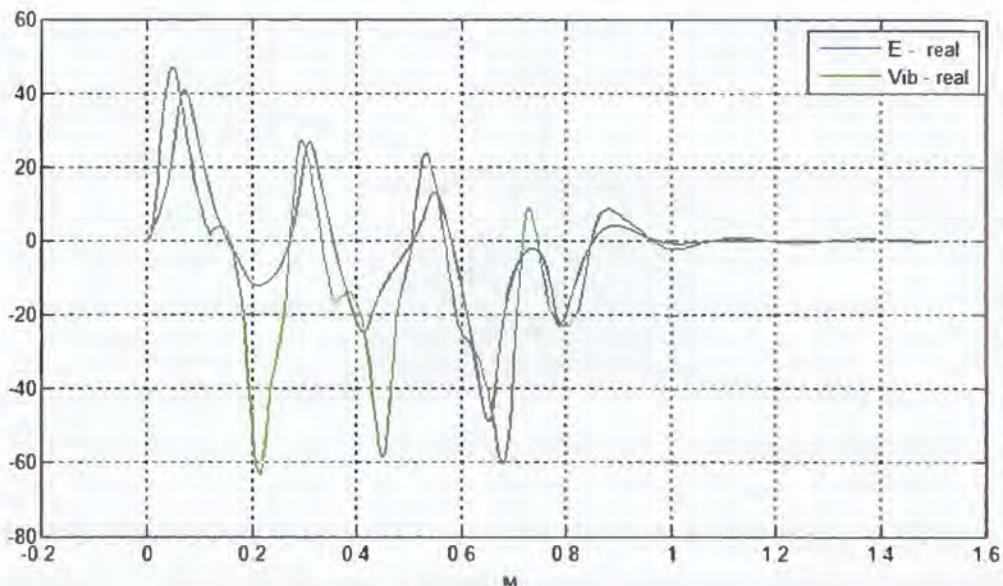


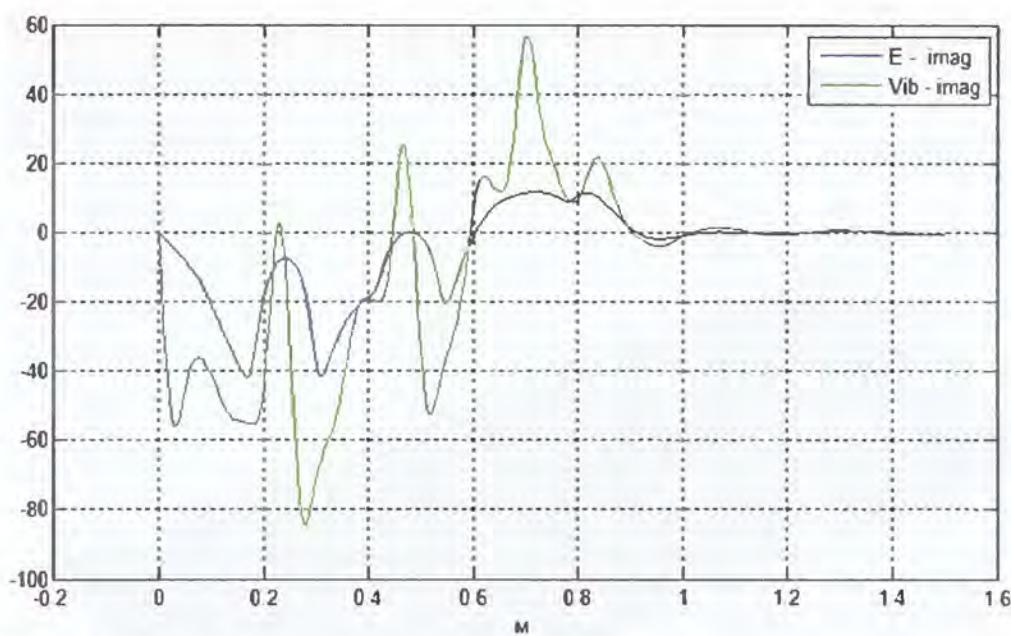
Рис. 18. Амплитуда E_x , E_z и H_y компонент поля на синей линии (0.085λ)

Для строгого восстановления ДН необходимо воспользоваться (1) т. е. иметь возможность измерять, как поле E_{tg} , так и поле H_{tg} .

Известно, что вибратор вблизи раскрыва (удаление много меньше длины волны) выдает сигнал, пропорциональный параллельной вибратору компоненте вектора E , а щель – вектору H .



*Рис. 19. Реальная часть поля E_x на синей линии
(расчет – голубая, коэф. передачи – зеленая)*



*Рис. 20. Мнимая часть поля E_x на синей линии
(расчет – голубая, коэф. передачи – зеленая)*

Результаты расчетов (рис. 19–20) иллюстрируют это утверждение по отношению к вибратору.

На (рис. 21) показано измерение H – компоненты поля с помощью щелевого зонда, где щель выполнена в виде волновода с узкой стенкой.

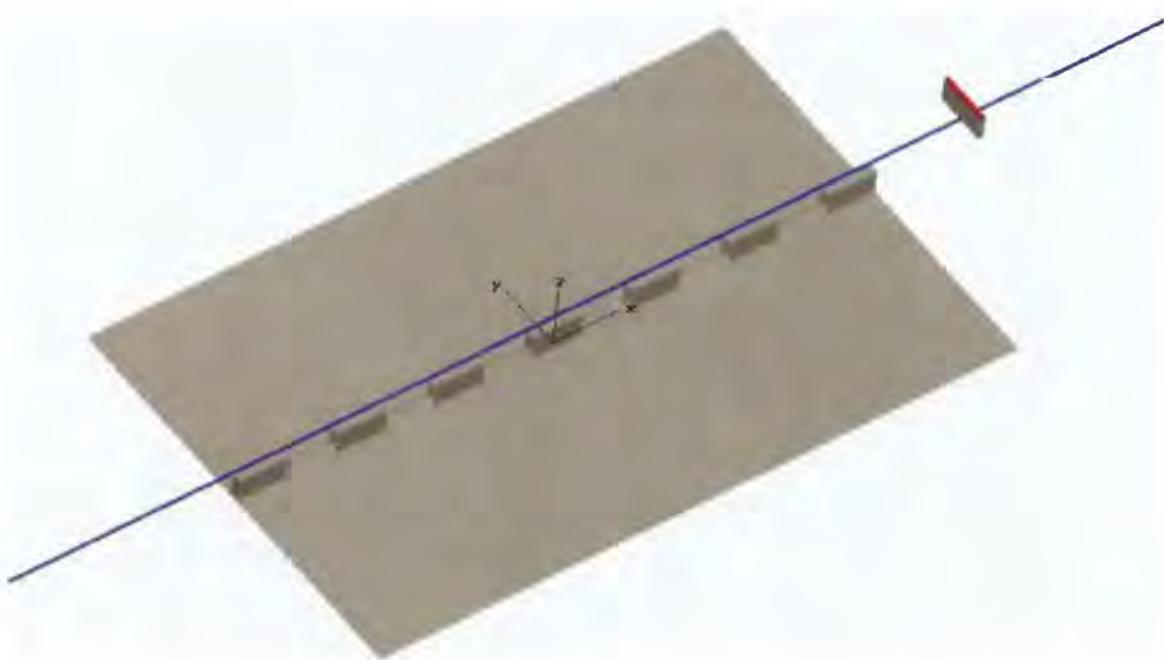


Рис. 21. Измерение H – компоненты поля на синей линии

На (рис. 22–23) показаны результаты расчета поля H_y на синей линии (рис. 21) и коэффициента передачи антенна – зонд, который перемещается по синей линии. Можно отметить лучшее совпадение расчетного и измеренного зондом – щелью полей, чем в случае зонда – вибратора (рис. 19–20).

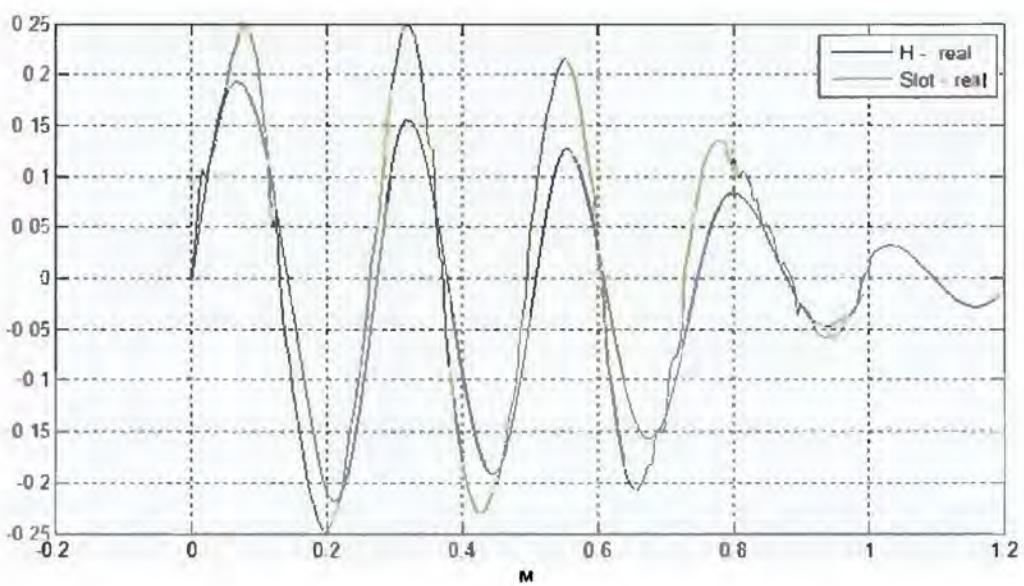


Рис. 22. Реальная часть поля H_y на синей линии (расчет – голубая, коэф. передачи – зеленая)

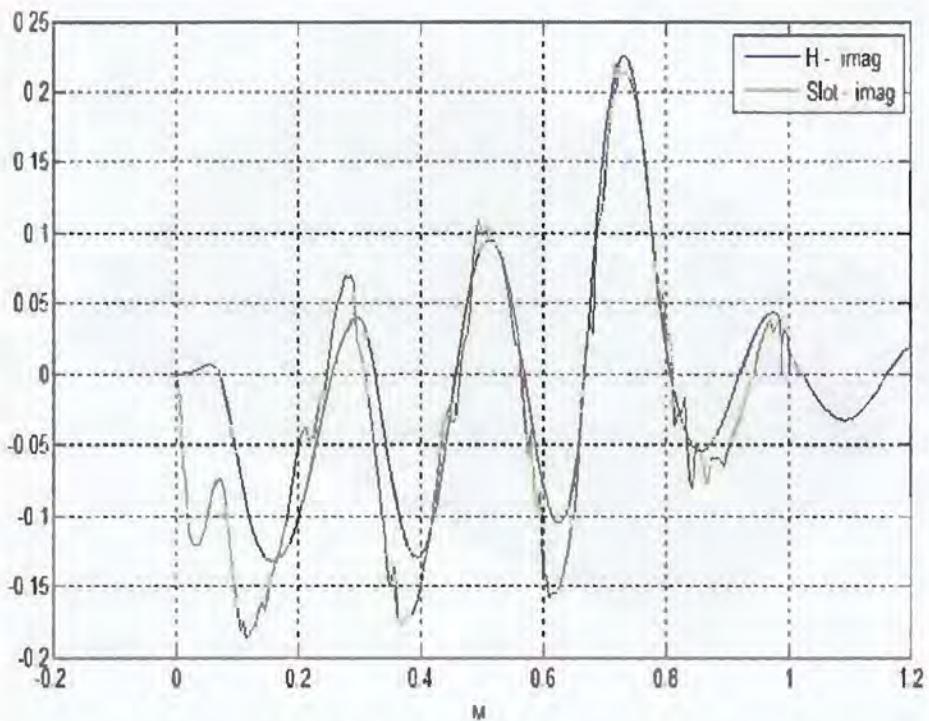


Рис. 23. Мнимая часть поля H_y на синей линии (расчет – голубая, коэф. передачи – зеленая)

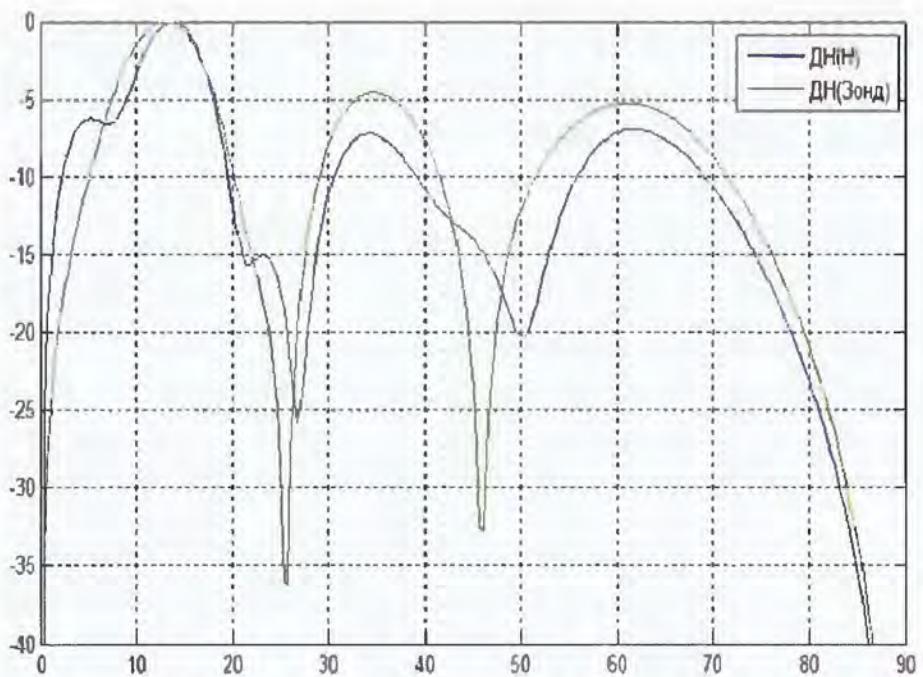


Рис. 24. Фурье образ поля H на синей линии (расчет – голубая, коэф. передачи – зеленая)

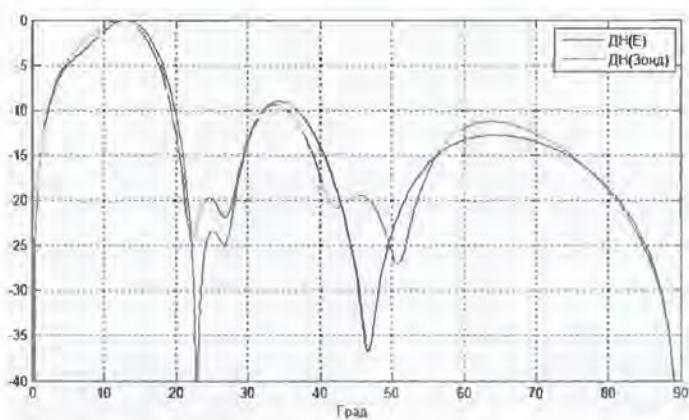


Рис. 25. Фурье образ поля E на синей линии (расчет – голубая, коэф. передачи – зеленая)

Тем не менее Фурье образы коэффициентов передачи по полям E и H с одинаковой погрешностью совпадают с Фурье образами расчетных полей (рис. 24–25). Еще раз отметим существенное отличие (рис. 26) волнового сопротивления поля эталона от волнового сопротивления (рис. 11) поля решетки, что соответствует более сильному реактивному полю эталона, чем решетки.

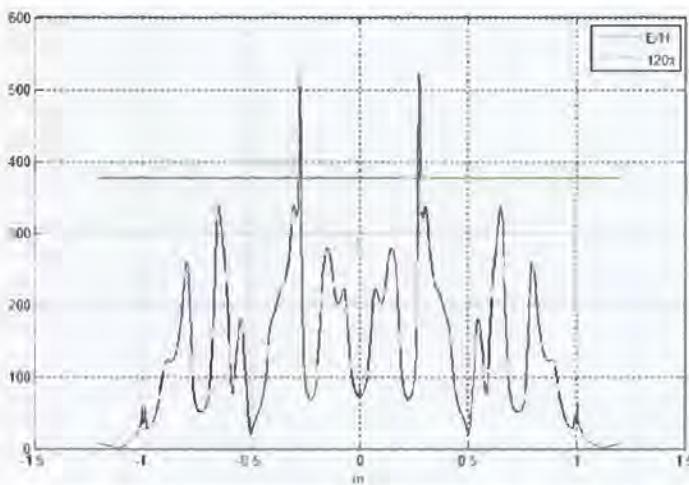


Рис. 26. Волновое сопротивление в раскрыве эталона

Как и в случае более гладких полей шестиэлементной решетки (рис. 9), частичные и суммарная ДН (рис. 27) антенны – эталона (рис. 14) достаточно хорошо совпадают между собой в секторе углов $\pm 40^\circ$ с точностью до амплитудного сдвига. Вне этого сектора ДН по E обнаруживает большую скорость убывания, чем по H .

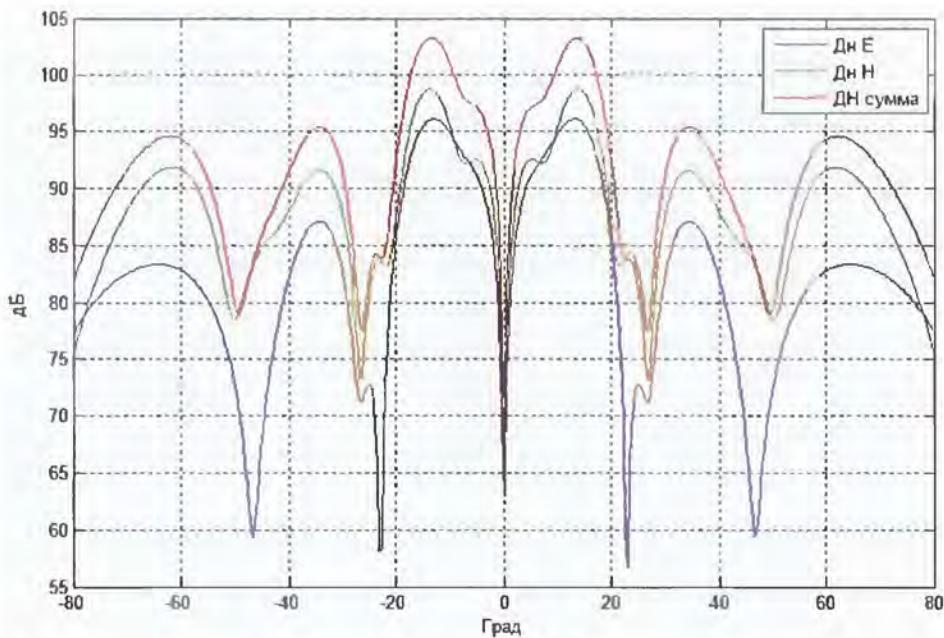


Рис. 27. Вычисление интегралов от E и H по (1) и их суммы

На (рис. 28) показано главное сечение трехмерной ДН, вычисленной с помощью CST и суммарная ДН в соответствии с (1). Видно хорошее совпадение результатов в области углов близких к нормали. Для большего сектора углов начинает сказываться разница в областях интегрирования: двумерная поверхность для CST и линия для (1).

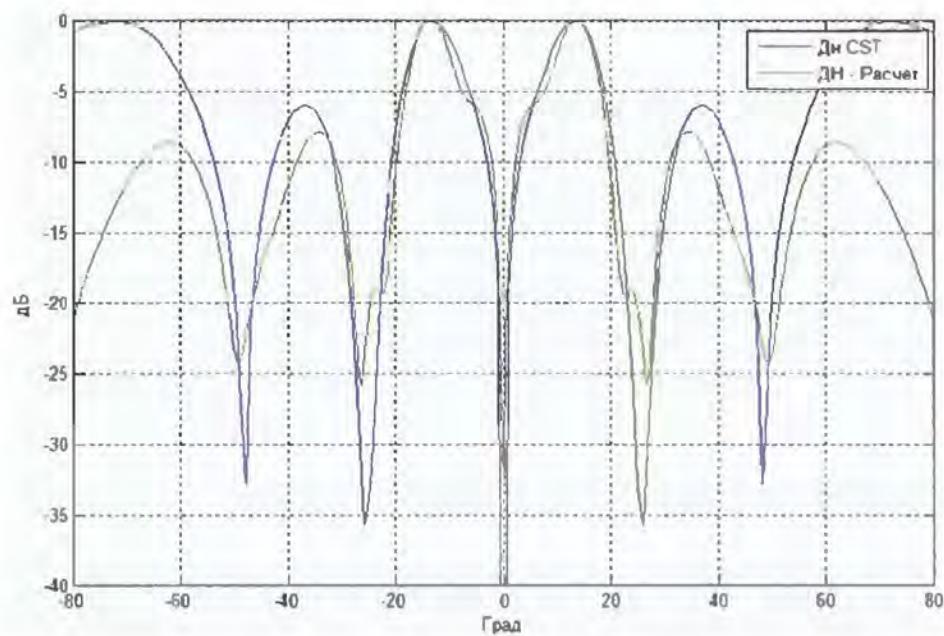


Рис. 28. Сравнение главного сечения ДН (CST) и интеграла (1) для эталона

Измерения антенны – эталона Выбор оптимального зонда

Как в случае решетки, так и эталона достаточным для восстановления ДН оказалось измерение компонент одного из полей, например E , с дальнейшим Фурье преобразованием поля в дальнюю зону в соответствии с (2). Для подтверждения этого утверждения был изготовлен эталон (рис. 29) с размерами модели: экран – 1,56 м × 1 м, струна – 1,52 м.



Рис. 29. Семиэлементный эталон на поворотном столе

Результаты вычисленных ДН и главных сечений трехмерных ДН, пересчитанные по измеренным полям с помощью алгоритма разработчика стенда (компания TRIM) для разных зондов, приведены на (рис. 30, 34, 35).

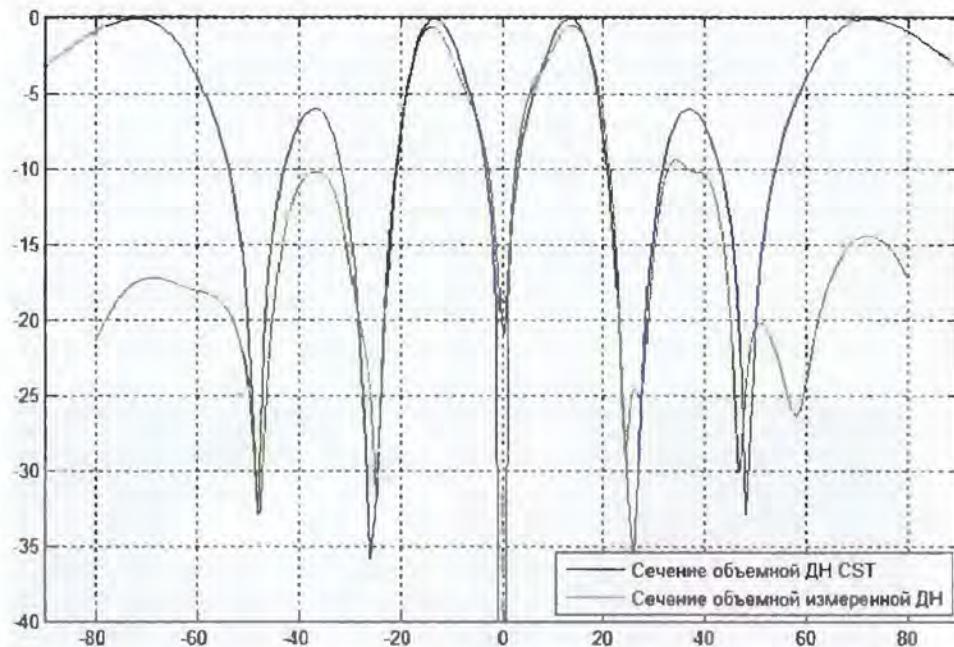


Рис. 30. Главные сечения объемной ДН CST (синяя) и ДН TRIM (зеленая по измерениям поля зондом в виде излучателя локатора S-диапазона)

Обращает на себя внимание существенное расхождение результатов вне сектора углов $\pm 45^\circ$. При этом распределение полей измеренное и расчетное соответствуют друг другу (рис. 31–32).

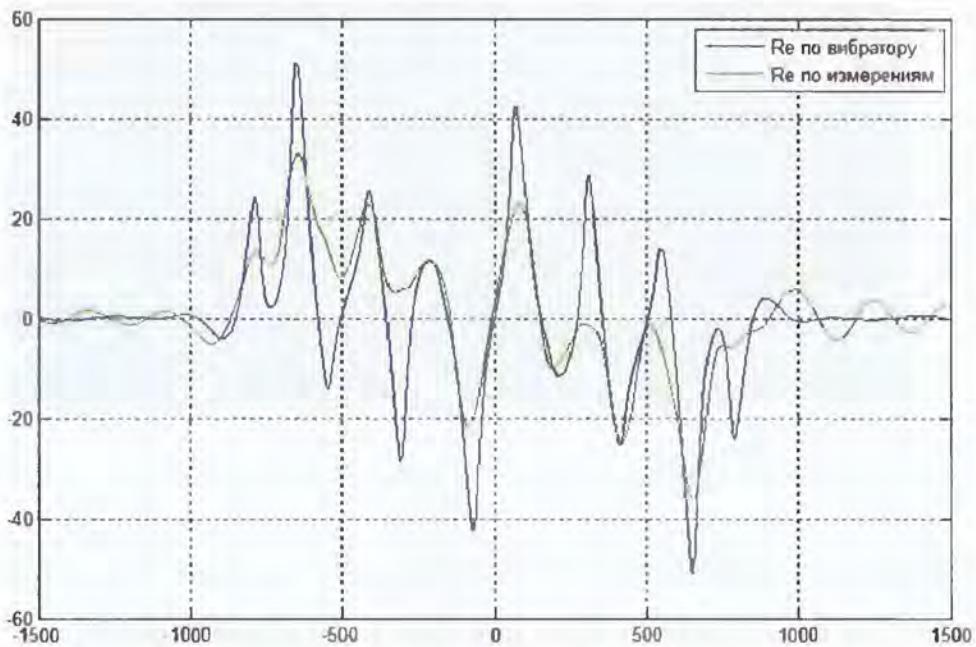


Рис. 31. Реальная часть распределения полей в раскрыве эталона

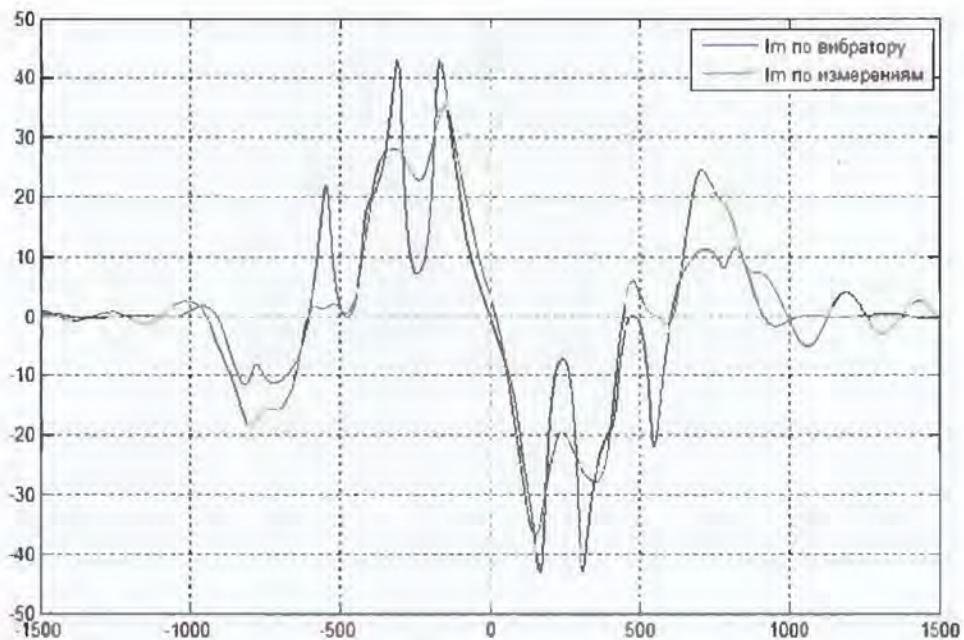


Рис. 32. Мнимая часть распределения полей в раскрыве эталона

По всей видимости причиной расхождения является особенность учета ДН зонда, выполненного в виде вибратора со скошенными племенами, в алгоритме вычисления ДН TRIM. Основанием для такого вывода является сравнение Фурье образов полей E (рис. 31–32), измеренных зондом и вычисленных по программе CST (рис. 33).

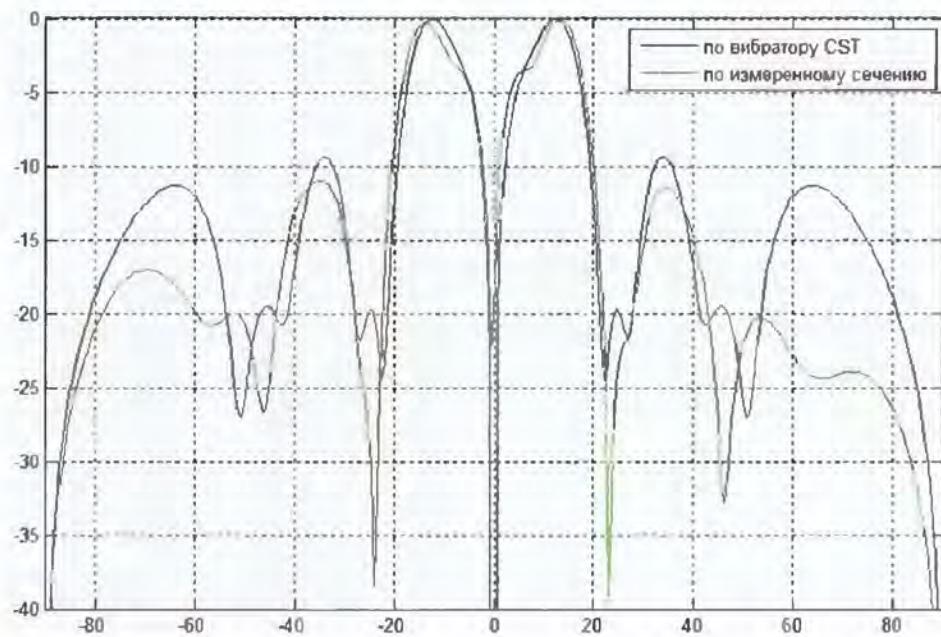


Рис. 33. Фурье образы полей E , измеренных зондом и вычисленным по программе CST

Разница для углов вне сектора $\pm 45^\circ$ уменьшилась на 10 дБ.

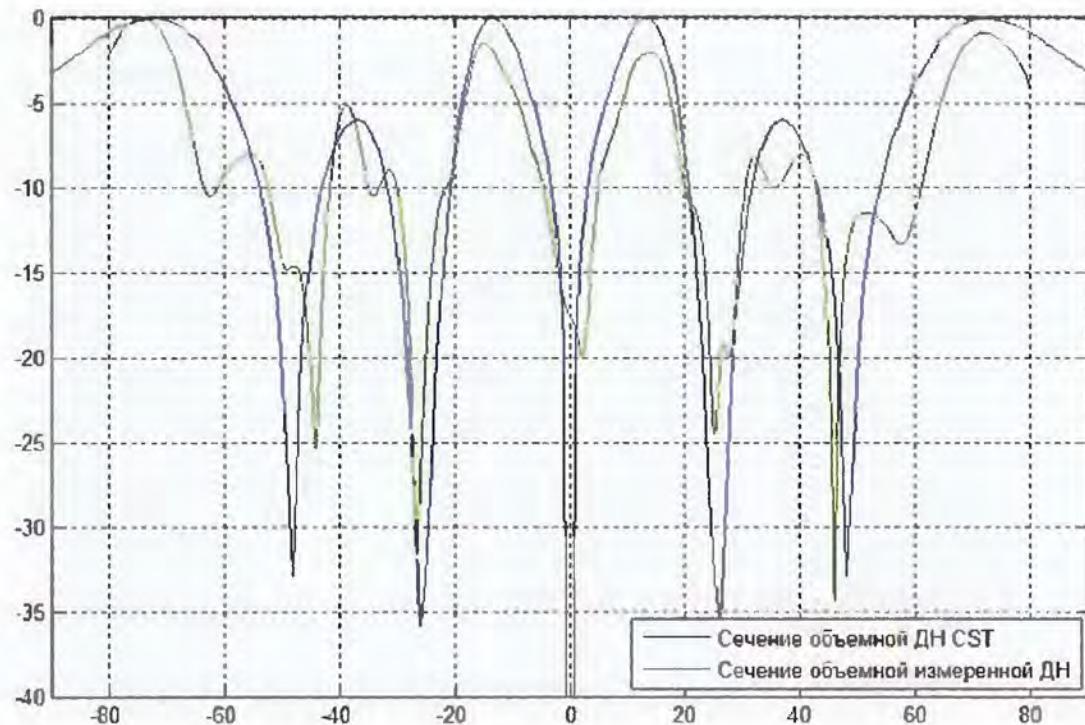


Рис. 34. Главные сечения объемной ДН CST (синяя) и ДН TRIM

(зеленая по измерениям поля зондом в виде открытого конца волновода 120×10 мм)

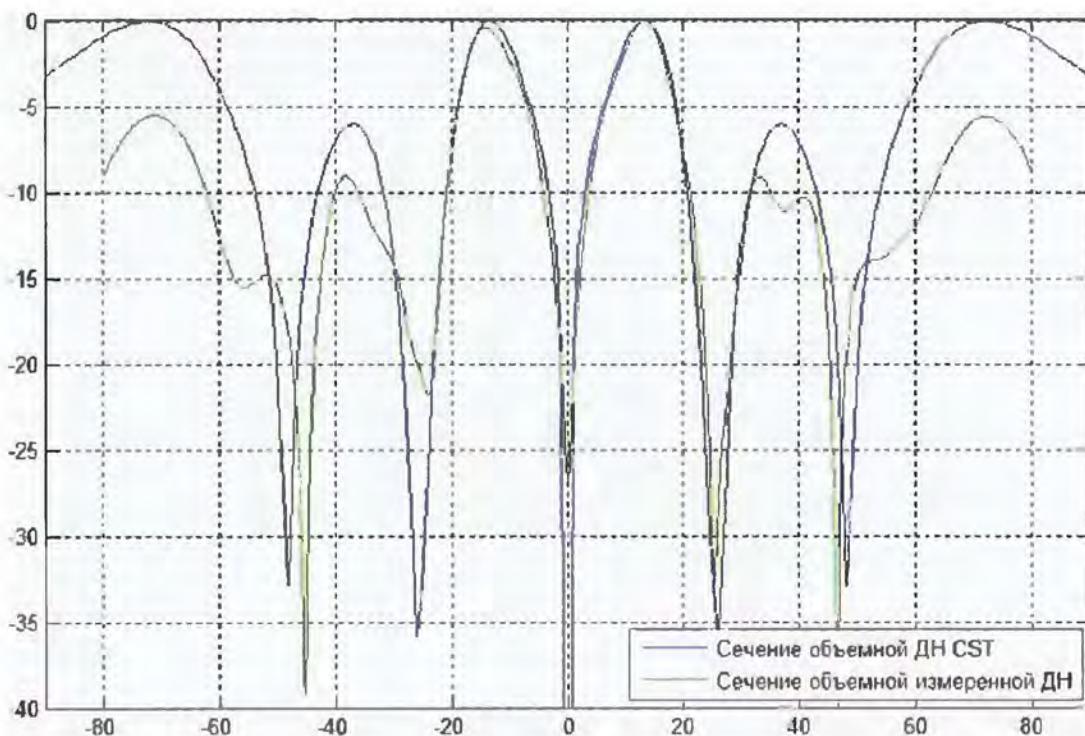


Рис. 35. Главные сечения объемной ДН CST (синяя) и ДН TRIM (зеленая по измерениям поля зондом TRIM)

Анализ результатов расчетов и измерений эталона позволяют сделать вывод о возможности приближения референсной плоскости к раскрыву для специализированных зондов (электрического или магнитного вибраторов). Зонд и алгоритм пересчета ДН компании TRIM для этих целей требуют доработки.

Измерение АФР локатора S диапазона

Как отмечалось выше для юстировки каналов локатора при организации измерительного стенда необходимо учесть ограничения, которые обусловлены возможностями работы локатора. Это, прежде всего, реализация работы аппаратуры в импульсном режиме; в режиме передачи – работы с полной мощностью локатора; в режиме приема – стыковка цифровых эхо-сигналов локатора с алгоритмами обработки, примененными в измерительном стенде.

Измерительное оборудование было поставлено и запущено фирмой TRIM. В дополнение к нему были разработаны дополнительные программы, переводящие станционные данные в формат измеренных данных программ TRIM. Была подобрана аппаратура для проведения измерений в импульсном режиме. На (рис. 36) показана схема стенда, где:

1. Контроллер локатора;
2. АФАР в составе локатора;
3. Контроллер сканера АИВК;
4. Локатор (опорный сигнал A1 подается на опорный вход ВАЦ (6);
5. АРМ АИВК измерения параметров антенн;
6. Векторный анализатор цепей (ВАЦ) ZVA-8 Rohde&Schwarz;
7. Антенна-зонд: (излучает «на прием» пилот-сигнал B1 от (4) на АФАР, «на передачу» принимает сигнал B1 и подает на измерительный вход ВАЦ);
8. Привод-датчик X;
9. Привод-датчик Y;
10. Привод-датчик Z;
11. Привод-датчик P;
12. Ethernet LANswitch +WiFi;
13. Система из 5 камер видеонаблюдения.
14. Генератор синхроимпульсов измерения АФР Rohde&Schwarz SMB.

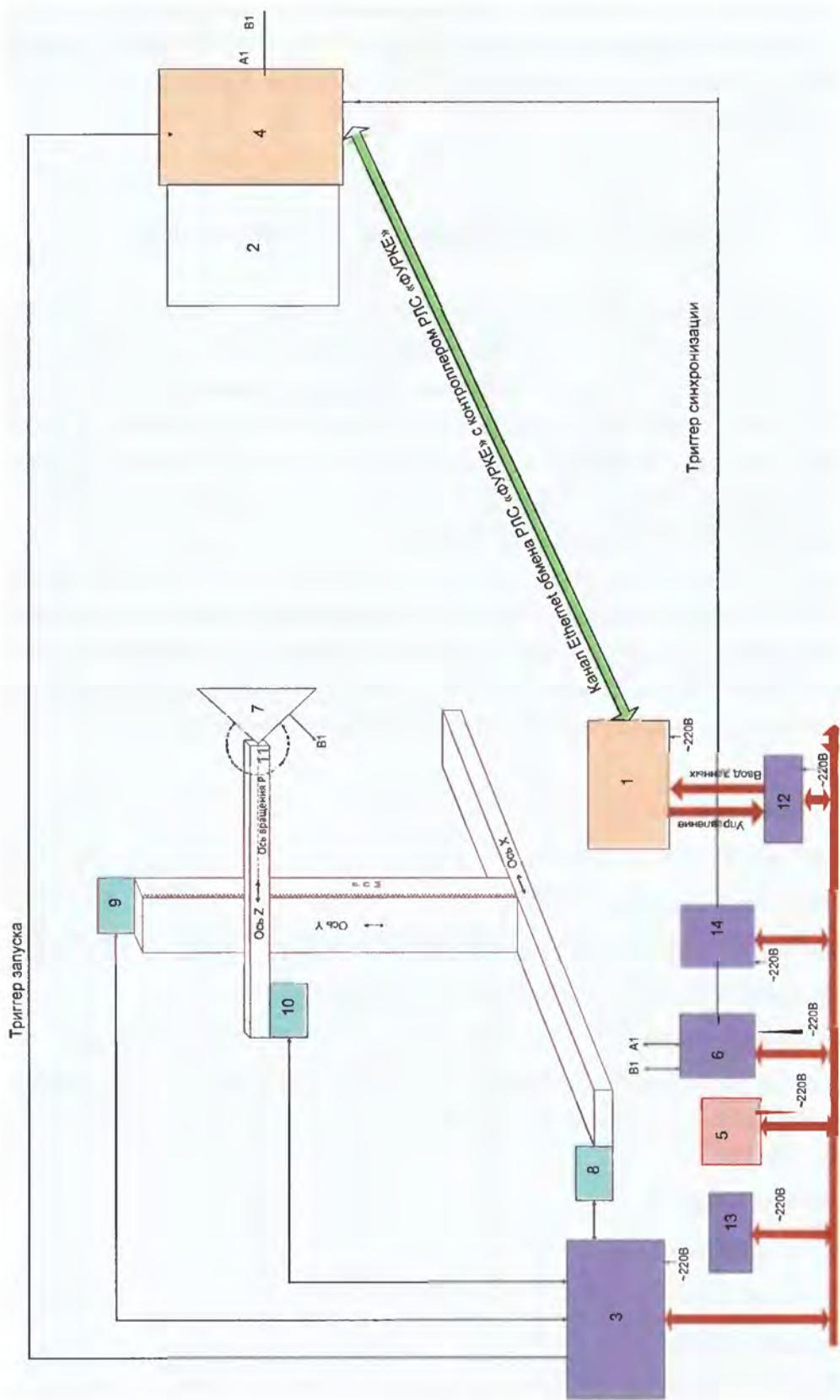


Рис. 36. Схема стенда измерений АФР

В прожекторном луче локатора была установлена поглощающая стенка с заявленной плотностью потока средней мощности без обдува $8 \text{ кВт}/\text{м}^2$.

Векторный анализатор цепей ZVA-8 Rohde&Schwarz с импульсными опциями (рис. 36 п. 6) измеряет распределение амплитуд и фаз излучения на референсной плоскости в результате синхронизации с помощью генератора синхроимпульсов Rohde & Schwarz SMB (рис. 36 п. 14), совмещающего по схеме совпадений синхроимпульсы позиционера зонда и синхроимпульсы РЛС.

В качестве зонда был применен штатный зонд TRIM. В соответствии с показанными выше возможностями зонда измерять реактивные поля референсная плоскость была отодвинута от раскрыва на λ , а шаг перемещения был выбран $\lambda/8$ по обеим координатам.

Для оценки погрешности юстировки без наличия расчетного поля на референсной плоскости было решено оценить разницу среднего значения первых боковых лепестков от теоретического значения – 13.2 dB при синфазном и равноамплитудном поле на передачу и распространить этот результат на отклоненные положения луча и режим приема.

Ниже приведены некоторые результаты измерений локатора на передачу (рис. 37–47). В обоих режимах измерения проводились без одного канала в нижней строке, который являлся опорным, потому дальнейшие оценки параметров следует проводить по верхней половине решетки.

Как следует из рисунка (37), погрешность юстировки каналов локатора для нормального к раскрыву положению луча (вместе с погрешностью измерений) приводит к отклонению среднего значения первых боковых лепестков от теоретического значения –13.2 dB на 0.2 dB, что в пересчете на разброс фазового распределения при точном амплитудном соответствует дисперсии фазы менее 50 в квадрате. Оценка получена в соответствии с (1), где приведена связь между фазовыми ошибками при равномерном амплитудном распределении в ФАР и уровнем боковых лепестков ДН.

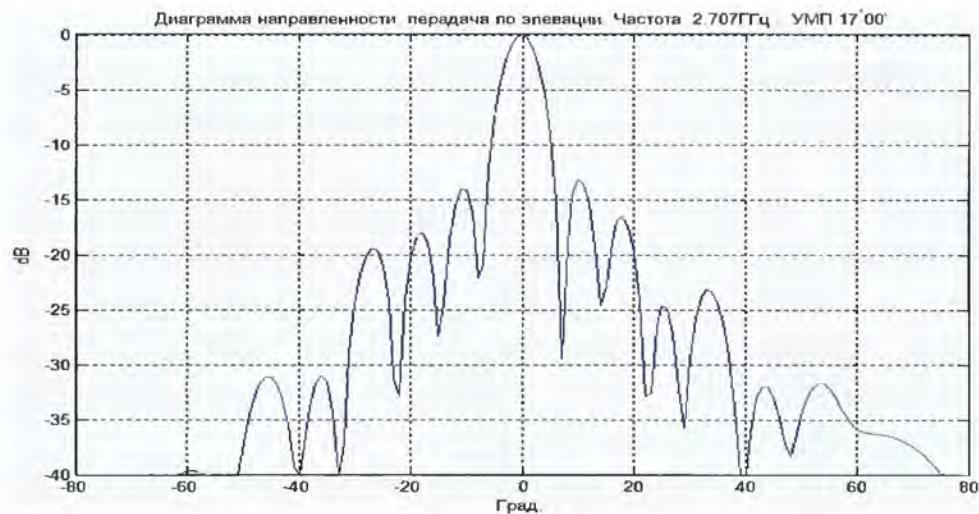


Рис. 37. Сечение ДН по элевации, $\phi = 0$

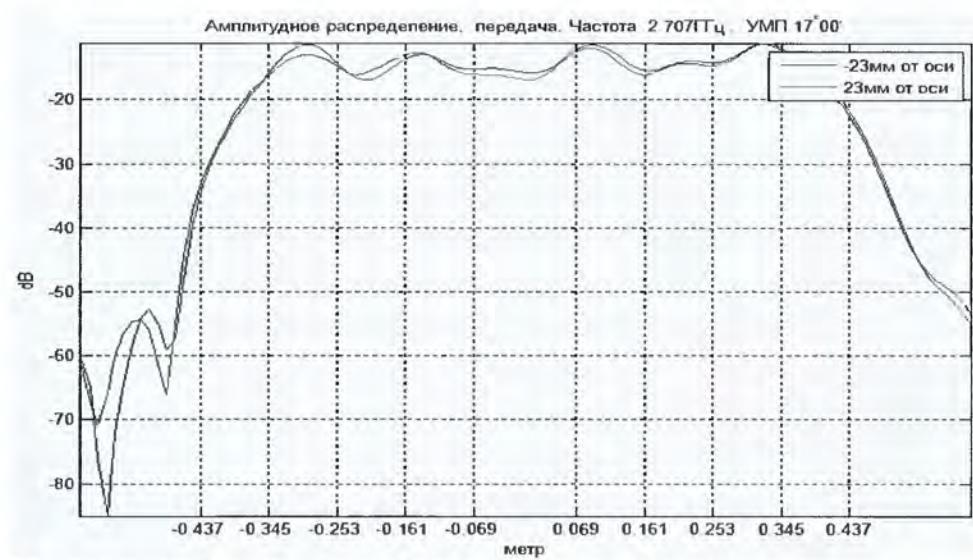


Рис. 38. Амплитудное распределение на передачу



Рис. 39. Фазовое распределение на передачу



Рис. 40. Сечение ДН по элевации, $\phi = 0$

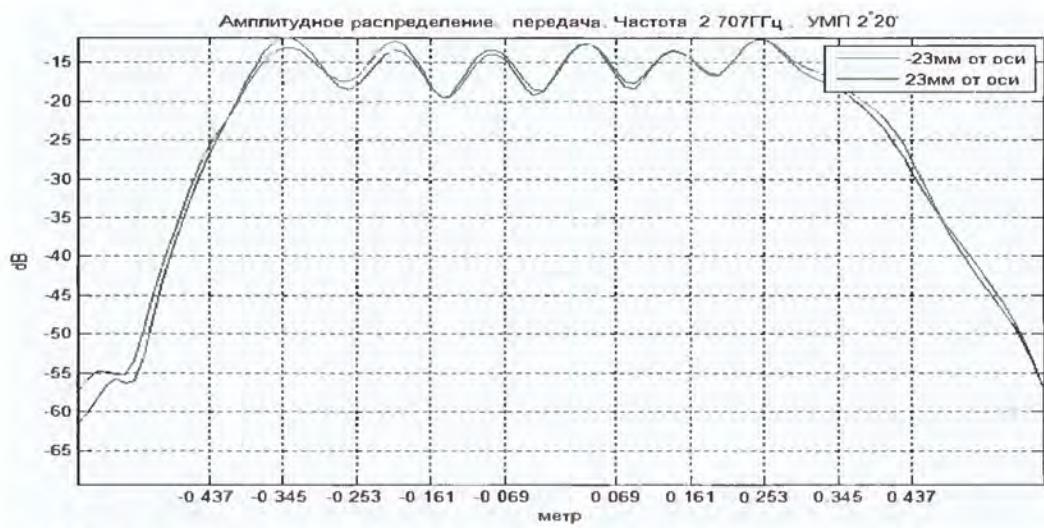


Рис. 41. Амплитудное распределение на передачу

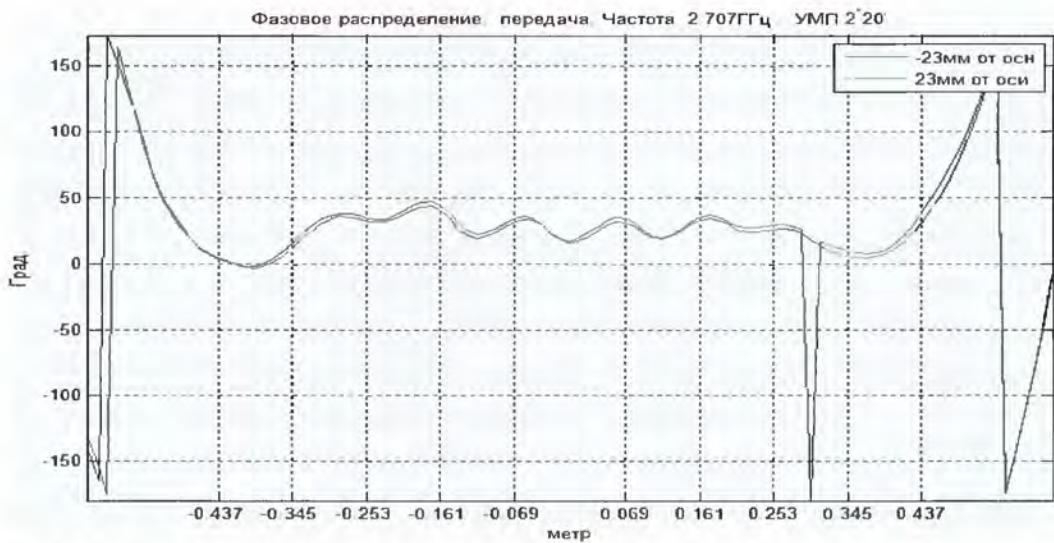


Рис. 42. Фазовое распределение на передачу

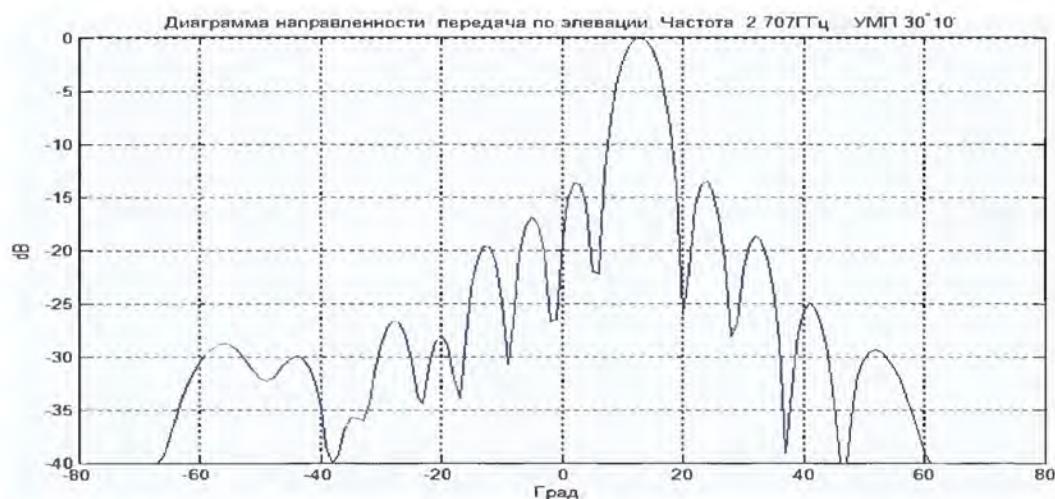


Рис. 43. Сечение ДН по элевации, $\varphi = 0$

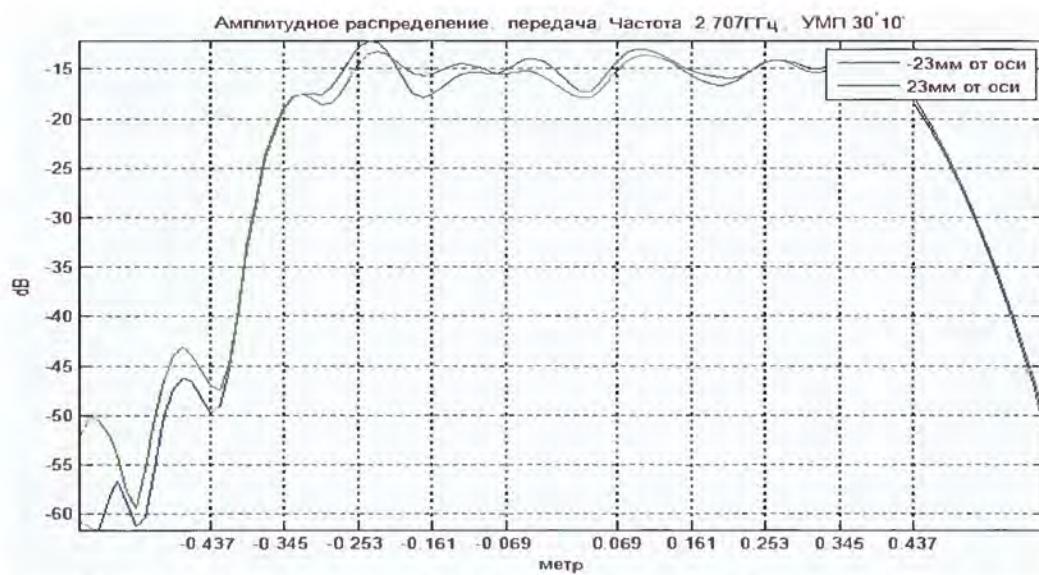


Рис. 44. Амплитудное распределение на передачу

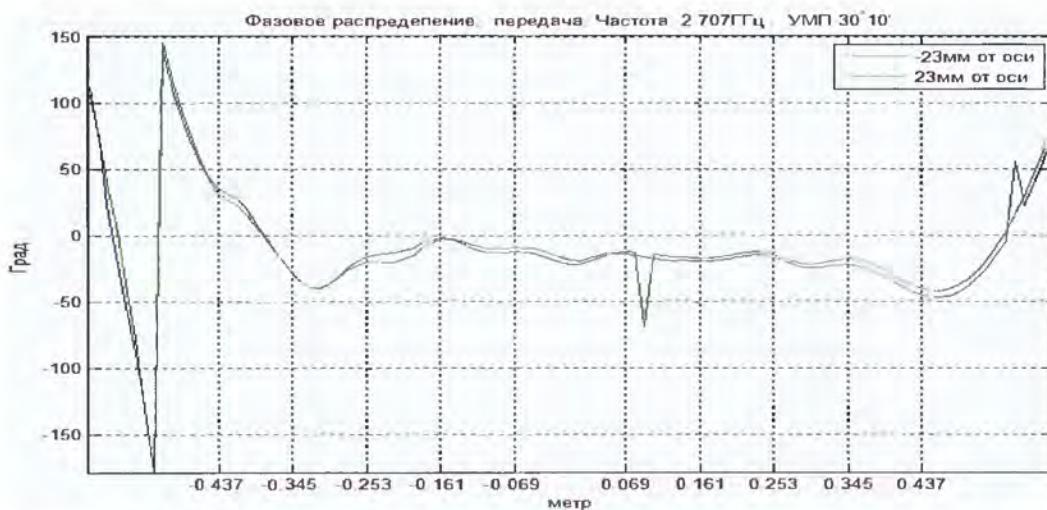


Рис. 45. Фазовое распределение на передачу



Рис. 46. Фазовое распределение на передачу



Рис. 47. Сечение ДН по элевации, φ = 0

В угломестной плоскости (плоскости элевации) раскрыв АФАР составляет 870 мм. Из рисунка (37) следует, что при выбранном удалении референсной плоскости на λ спадание поля до уровня минус 30 дБ происходит на длине 2×460 мм. При отклонении луча на 14 градусов (рис. 44) это расстояние увеличивается на 2×23 мм, а при отклонении на 51 градус – на 2×92 мм. При удалении референсной плоскости на рекомендованные 3λ требуемый размер увеличивается на 2×600 мм.

Полезной информацией о частотной зависимости юстировки локатора может быть сравнение фазовых распределений и ДН при малом отклонении луча (на 140) при смене частоты. На (рис. 46) видно появление линейной составляющей в фазовом распределении и росту нелинейных составляющих, что приводит к малозаметному смещению главного максимума, но к перекосу боковых лепестков на 1 дБ (рис. 47).

Выводы

На основании приведенных данных можно сделать следующие выводы:

1. При восстановлении ДН по измерениям полей на референсной плоскости для уменьшения требуемых ее размеров целесообразно проводить измерения близко от излучающего раскрыва (0.2 , 0.4λ), с шагом перемещения не более $\lambda/8$.
2. При восстановлении ДН в пределах главного лепестка ДН с динамикой минус 15.20 дБ можно пользоваться только одним электрическим, магнитным или комплексным зондом с дальнейшим преобразованием поля в дальнюю зону в виде Фурье образа.
3. При восстановлении ДН в большем секторе углов или в большем динамическом диапазоне необходимо проводить измерения как электрическим, так и магнитным зондами с дальнейшим преобразованием полей в дальнюю зону с помощью интеграла Кирхгофа.
4. Критерием «гладкости» поля может служить оценка волнового сопротивления поля на поверхности интегрирования. При приближении волнового сопротивления к значению 120π шаг перемещения зонда может быть увеличен до $\lambda/2$.
5. Измерения локатора в безэховой камере позволяют провести юстировку каналов локатора с погрешностью в первом боковом лепестке не более 0.2 дБ и выявить фазовые ошибки внутренней фазировки, не учитывающей электродинамические эффекты излучения АФАР в реальных условиях.

Литература

1. Локтин В.И. Фазовый синтез антенных решеток с пониженным уровнем боковых лепестков ДН в условиях влияния фазовых ошибок. // Межведомственный республиканский научно-технический сборник «Радиотехника», Харьков: Вища школа, 1980, вып. 60, стр. 53–59.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНТЕННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС БЛИЖНЕГО ПОЛЯ

Ривкин М.И., Калашников В.С., Платонов О.Ю.

История создания измерительных стендов в АО «ВНИИРА»

Антенный измерительный комплекс был создан во ВНИИРА одновременно с созданием института в 1948 году. Тогда это были стены дальнего поля, размещавшиеся на открытых полигонах и лабораторных залах. Использовались также облетные методы измерений с привлечением средств собственного летно-испытательного отряда.

В 1970–1980 годах во ВНИИРА появился стенд ближнего поля с плоской поверхностью сканирования, при помощи которого выполнялась настройка и измерение параметров антенных решеток и ФАР.

Дальнейшее развитие антенной тематики во ВНИИРА в направлении создания наземных и бортовых антенных систем на базе пассивных и активных антенных решеток, а также слабонаправленных и всенаправленных АФС, потребовало создание автоматизированных измерительных стендов ближнего поля на основе новейших достижений в области автоматики и вычислительной техники. Для решения этой задачи в течении 2003–2013 гг. в ОАО «ВНИИРА» был сформирован автоматизированный антенный измерительный комплекс (АИК) стендов ближнего поля.

Автоматизированный антенный измерительный комплекс (АИК) стендов ближнего поля состоит:

Ст. АФС-01 с плоской поверхностью сканирования размером 10700×2400 мм, размещенный в экранированной безэховой камере;

Ст. АФС-02 с плоской поверхностью сканирования размером 20000×8900 мм, размещенный в частично безэховом помещении;

Ст. АФС-03 со сферической поверхностью сканирования, реализующий кинематическую схему «крен над азимутом», расположенный в полностью экранированной безэховой камере.

Задачи которые были решены при разработке и изготовлении АИК

- выбраны и реализованы оригинальные кинематические схемы перемещения зондов;
- отлажены и внедрены специальные программы управления движения колонн и кареток стендов;
- отлажены и внедрены специальные программы сбора экспериментальных данных;
- отлажены и внедрены специальные программы обработки результатов измерения.

Задачи решаемые с помощью АИК

Наличие автоматизированных измерительных стендов с плоской поверхностью сканирования позволяет осуществлять настройку и измерение параметров остронаправленных зеркальных антенн, а также отдельных диаграммообразующих элементов остронаправленных ФАР и АФАР и самих решеток в целом.

Наличие автоматизированного стендса сферической поверхностью сканирования позволяет решать те же задачи для антенн с широкой ДН (бортовых и наземных).

Кроме того, стенды позволяют осуществлять дефектоскопию излучающих элементов антенных решеток.

Автоматизированный измерительный стенд с плоской поверхностью сканирования

Стенды с плоской поверхностью сканирования являются унифицированными и отличаются только размерами зоны сканирования, что привело к небольшим конструктивным различиям.

Рассмотрим автоматизированный измерительный стенд **Ст. АФС-01**.

Назначение: Стенд Ст. АФС-01 является измерительным комплексом, предназначенным для автоматизированного определения основных радиотехнических характеристик антенн по результатам измерения амплитудно-фазового распределения поля, возбуждаемого этими антеннами на поверхности сканирования – плоскости, расположенной в области раскрыва исследуемой антенны, ориентированной параллельно раскрыву.

Технические характеристики:

Диапазон перемещений измерительного зонда:

по горизонтальной оси – (0...10700) мм;

по вертикальной оси – (0...2400) мм;

в направлении нормали к плоскости сканирования – (0...500) мм.

Погрешность линейного позиционирования зонда в движении и при остановке (3σ): 1мм.

Грузоподъемность опорного устройства (ОУ) – 1500 кг.

Диапазон рабочих частот – 0,7 ГГц ...13,5 ГГц.

Измеряемые параметры:

модуль комплексного коэффициента передачи (ККП) системы «испытуемая антенна – измерительный зонд», определяемый при различном расположении исследуемой антенны и измерительного зонда относительно друг друга;

аргумент (фаза) комплексного коэффициента передачи (ККП) системы «испытуемая антенна – измерительный зонд», определяемый при различном расположении исследуемой антенны и измерительного зонда относительно друг друга;

декартовы координаты местоположения измерительного зонда.

Динамический диапазон измерения модуля ККП векторным анализатором цепей PNA-L от 0 до – 90 дБ.

Динамический диапазон измерения фазы ККП векторным анализатором цепей PNA-L ± 500 градусов.

Относительная погрешность измерения модуля ККП векторным анализатором цепей PNA-L:

± 0.1 дБ в диапазоне изменения модуля ККП от 0 дБ до – 30 дБ;

± 1 дБ в диапазоне изменения модуля ККП от – 30 дБ до – 90 дБ.

Абсолютная погрешность измерения фазы ККП векторным анализатором цепей PNA-L:

± 1.5 град. в диапазоне изменения модуля ККП от 0 до – 50 дБ;

± 5 град. в диапазоне изменения модуля ККП от – 50 до – 90 дБ.

Рассчитываемые по результатам измерений радиотехнические характеристики исследуемых антенн:

амплитудные и фазовые диаграммы направленности (ДН) исследуемой антенны и их числовые характеристики (ширина главного лепестка амплитудной ДН, уровень ближних и дальних боковых лепестков амплитудной ДН и т. д.);

амплитудное и фазовое распределение поля в раскрыве исследуемой антенны (для аппертурных антенн больших размеров и антенных решеток).

коэффициент усиления исследуемой антенны.

Способы представления рассчитываемых радиотехнических характеристик антенн: графические и табличные.

Графические:

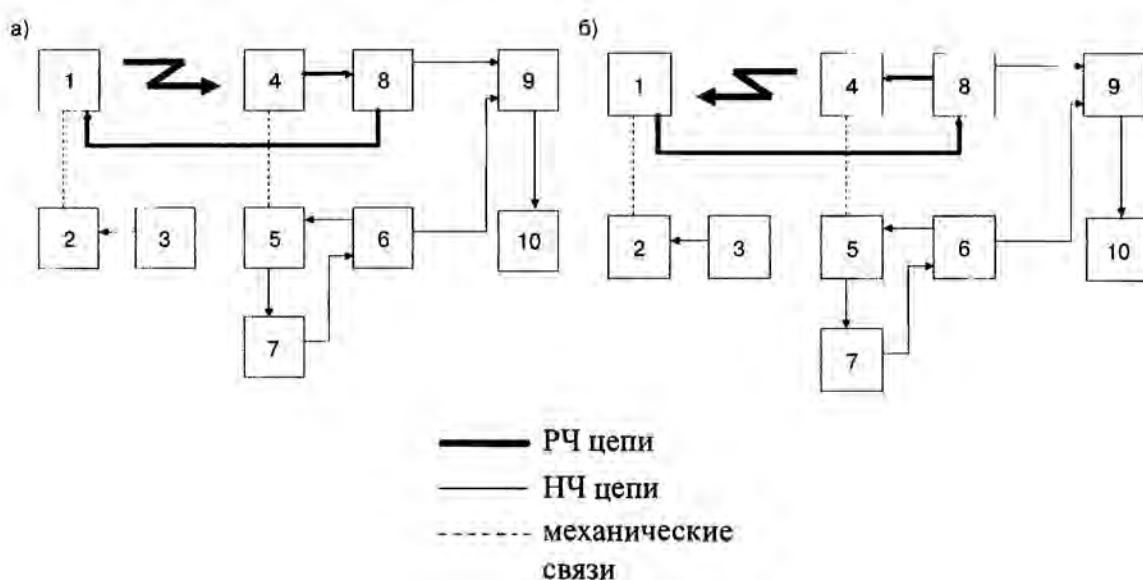
двумерные ДН в требуемых сечениях в декартовой или полярной системах координат в линейном или в логарифмическом масштабах;

трехмерные объемные ДН в декартовой или сферической системах координат в линейном или логарифмическом масштабах;

распределения амплитуды поля в заданных направлениях вдоль раскрыва исследуемой антенны;

распределения фазы поля в заданных направлениях вдоль раскрыва исследуемой антенны.

Структурная схема стенда Ст. АФС-01 (Ст. АФС-02)



а) при работе исследуемой антенны на передачу, б) при работе исследуемой антенны на прием.

1 – исследуемая антенна; 2 – опорное устройства (ОУ); 3 – механизм перемещения ОУ; 4 – измерительный зонд; 5 – координатное устройство (КУ-1); 6 – ПК1 управления стендом; 7 – контрольно-измерительное устройство (КИУ-1); 8 – векторный анализатор цепей; 9 – ПК2 сбора и первичной обработки экспериментальных данных; 10 – ПК3 окончательной обработки результатов измерения и выдачи протокола.

Автоматизированный измерительный стенд Ст. АФС-02

Конструктивное отличие от стенда Ст.АФС-01 заключается в наличии верхнего привода. А также диапазон перемещений измерительного зонда:

по горизонтальной оси – (0...20000) мм;

по вертикальной оси – (0...8900) мм;

в направлении нормали к плоскости сканирования – (0...1000) мм.

Грузоподъемность ОПУ – 5000 кг.

Структурно стены Ст. АФС-01 и Ст. АФС-02 идентичны.

Автоматизированный измерительный стенд Ст. АФС-03

Назначение

Стенд Ст.АФС-03 является измерительным комплексом, предназначенным для автоматизированного определения основных радиотехнических характеристик антенн по результатам измерения амплитудно-фазового распределения поля, возбуждаемого этими антеннами на поверхности сканирования – сфере, окружающей исследуемую антенну.

Технические характеристики:

диапазон поворота углов по крену – 0...360 градусов;

диапазон поворота углов по азимуту – 0...180 градусов;

максимальный диаметр сферы, в которую должна вписаться исследуемая антenna – 3 м;

среднеквадратическое отклонение поверхности сканирования от сферы заданного диаметра – 0,15 мм;

грузоподъемность опорно-поворотного устройства (ОПУ) – 450 кг;

диапазон рабочих частот: от 0,1 ГГц до 13,5 ГГц.

Измеряемые параметры:

модуль комплексного коэффициента передачи (ККП) системы «испытуемая антenna – измерительный зонд», определяемый при различном расположении исследуемой антены и измерительного зонда относительно друг друга;

аргумент (фаза) комплексного коэффициента передачи (ККП) системы «испытуемая антenna – измерительный зонд», определяемый при различном расположении исследуемой антены и измерительного зонда относительно друг друга;

координаты точек на поверхности сферы, в которой производилось измерение модуля и фазы ККП;

модуль комплексного коэффициента отражения (ККО) испытуемой антенны.

Динамический диапазон измерения модуля ККП: от 0 дБ до минус 90 дБ.

Относительная погрешность измерения модулей ККП и ККО векторным анализатором цепей PNA-L:

± 0.1 дБ в диапазоне изменения модуля ККП от 0 дБ до – 30 дБ;

± 1 дБ в диапазоне изменения модуля ККП от – 30 дБ до – 90 дБ.

Динамический диапазон измерения фазы ККП векторным анализатором цепей PNA-L: ± 500 градусов.

Абсолютная погрешность измерения фазы ККП векторным анализатором цепей PNA-L:

± 1.5 град. в диапазоне изменения модуля ККП от 0 дБ до – 50 дБ;

± 5 град. в диапазоне изменения модуля ККП от – 50 дБ до – 90 дБ.

Суммарная относительная погрешность измерения модуля ККП с помощью стенда:

± 0.7 дБ в диапазоне изменения модуля ККП от 0 дБ до – 30 дБ;

± 1.7 дБ в диапазоне изменения модуля ККП от – 30 дБ до – 90 дБ.

Суммарная абсолютная погрешность измерения фазы ККП с помощью стенда:

± 5 град. в диапазоне изменения модуля ККП от 0 дБ до – 50 дБ;

± 7 град. в диапазоне изменения модуля ККП от – 50 дБ до – 90 дБ.

Рассчитываемые по результатам измерений радиотехнические характеристики исследуемых антенн:

амплитудные и фазовые диаграммы направленности (ДН) исследуемой антенны и их числовые характеристики (ширина главного лепестка амплитудной ДН, уровень ближних и дальних боковых лепестков амплитудной ДН и т. д.);

коэффициент усиления исследуемой антенны.

Способы представления рассчитываемых радиотехнических характеристик антенн: графические и табличные.

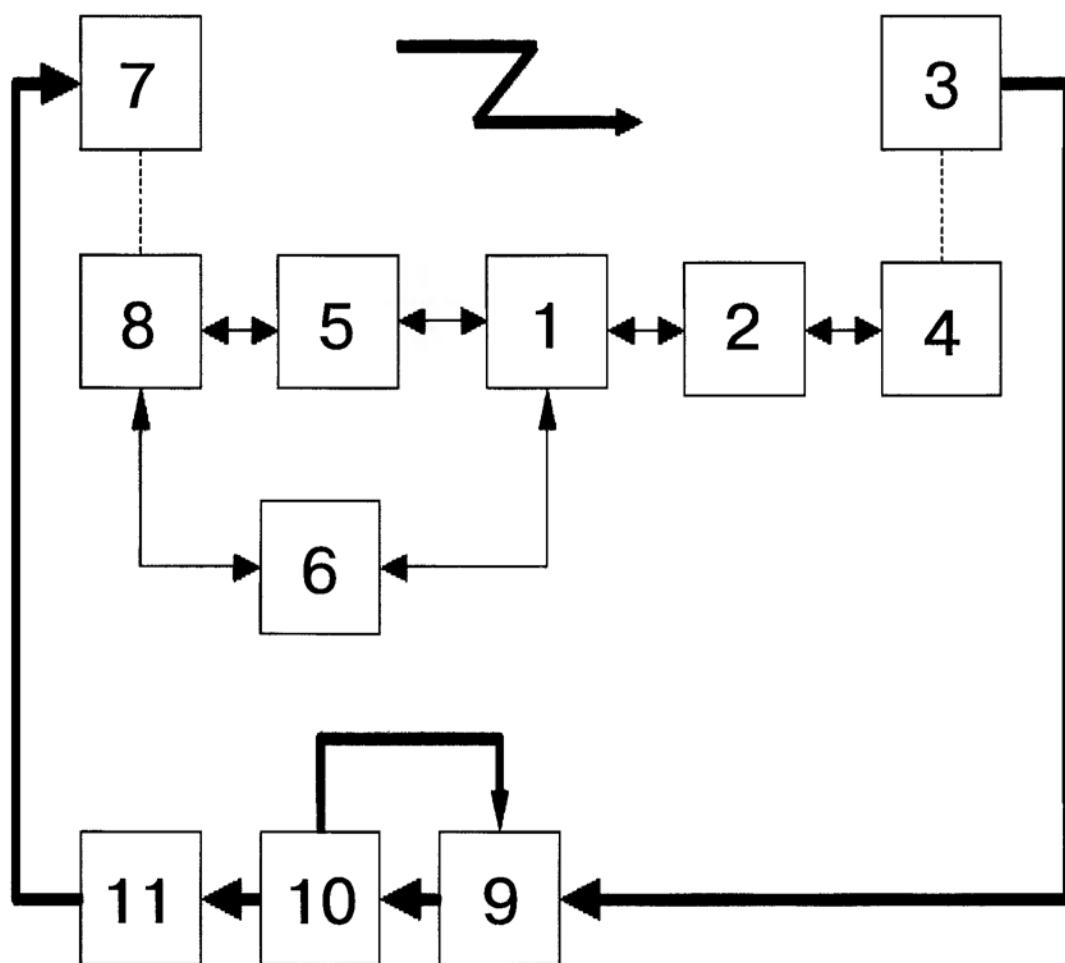
Графические:

двумерные ДН в требуемых сечениях в декартовой или полярной системах координат в линейном или в логарифмическом масштабах;

трехмерные объемные ДН в декартовой или сферической системах координат в линейном или логарифмическом масштабах;

частотная зависимость максимального коэффициента усиления исследуемой антенны.

**Структурная схема стенда АФС-03
(при работе исследуемой антенны на передачу)**



— РЧ цепи

— НЧ цепи

— механические связи

1 – сервер контроллеров положения

2 – контроллер положения зонда

3 – зонд

4 – ОПУ зонда

5 – контроллер положения антенны по азимуту

6 – контроллер положения антенны по крену

7 – исследуемая антenna

8 – ОПУ антенны

9 – векторный анализатор цепей

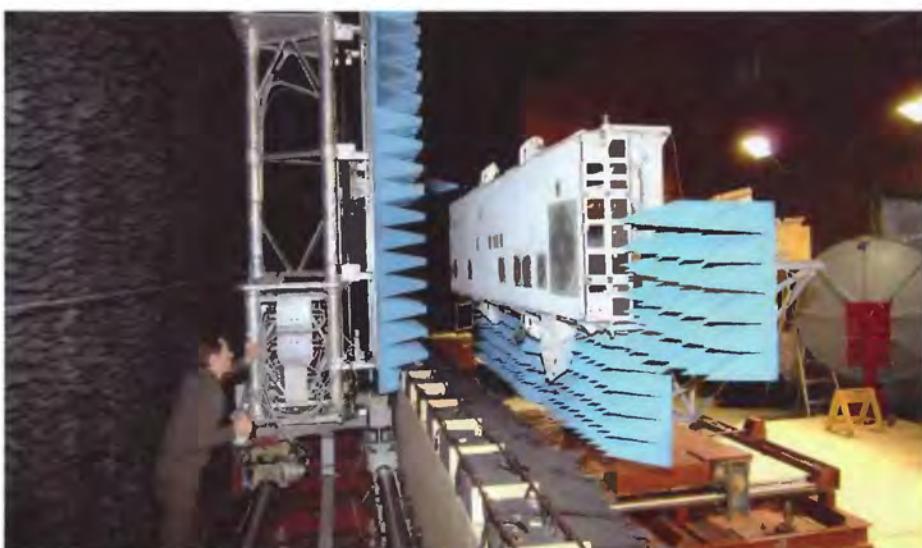
10 – направленный ответвитель

11 – усилитель

**Основные параметры автоматизированных
антенных измерительных стендов, входящих в состав
АИК АО «ВНИИРА»**

Наименование стенда	Ст. АФС-01	Ст. АФС-02	Ст. АФС-03
Форма поверхности сканирования	плоскость	плоскость	сфера (реализуется с помощью кинематической схемы «крен над азимутом»)
Диапазон перемещения зонда: – по горизонтали – по вертикали – в направлении нормали к поверхности сканирования	0...10700 мм 0...2400 мм 0...500 мм	0...20000 мм 0...8900 мм 0...1000 мм	Диапазон изменения углов поворота исследуемой антенны: – по азимуту 0...180 градусов; – по крену 0...360 градусов
Грузоподъемность ОПУ	до 1500 кг	до 5000 кг	до 450 кг
Диапазон рабочих частот	0,7...13,5 ГГц	0,7...13,5 ГГц	0,1...13,5 ГГц
Экспериментально определяемые параметры	– модуль комплексного коэффициента передачи (ККП) во множестве точек на поверхности сканирования; – аргумент (фаза) ККП во множестве точек на поверхности сканирования; – координаты точек измерения на поверхности сканирования		
Рассчитываемые по массивам экспериментальных данных параметры	– объемные амплитудные ДН; – амплитудные ДН в требуемых сечениях; – распределение амплитуды поля на заданных поверхностях вблизи раскрытия исследуемой антенны и непосредственно в раскрытии; – распределение фазы поля на заданных поверхностях вблизи раскрытия исследуемой антенны и непосредственно в раскрытии		

Стенды Ст. АФС-01 и Ст. АФС-02

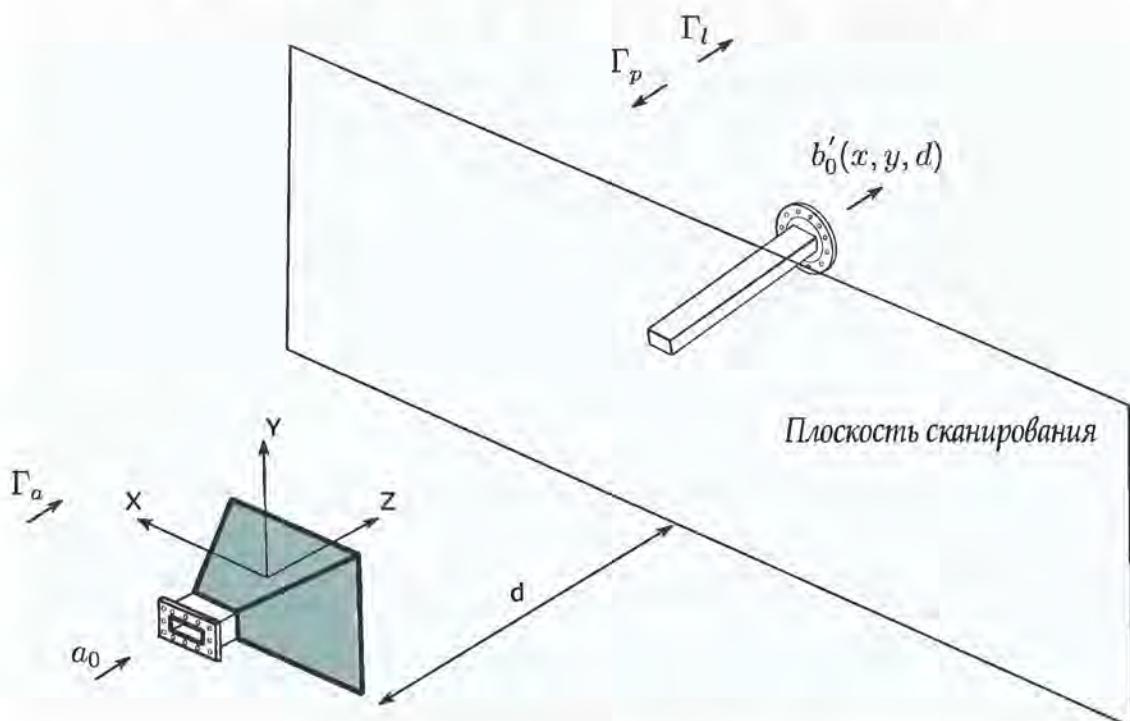


Стенд Ст. АФС-03

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КУ НА СТЕНДАХ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ С ПЛОСКОЙ И СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЯМИ СКАНИРОВАНИЯ

Пономарев М.Ю, Шубников В.В, Платонов О.Ю

Геометрия измерений на стенде с плоской поверхностью сканирования



Основные формулы

$$b'_0(x, y, d) = \gamma' a_0 \int \int \vec{A}_{10}(k_x, k_y) \cdot \vec{S}'_{02}(k'_x, k'_y) e^{-ik_z d} e^{-ik_x x - ik_y y} dk_x dk_y$$

$$b''_0(x, y, d) = \gamma'' a_0 \int \int \vec{A}_{10}(k_x, k_y) \cdot \vec{S}''_{02}(k''_x, k''_y) e^{-ik_z d} e^{-ik_x x - ik_y y} dk_x dk_y$$

$$D'(k_x, k_y) = \vec{A}_{10}(k_x, k_y) \cdot \vec{S}'_{02}(k'_x, k'_y)$$

$$\gamma' = \frac{1}{1 - \Gamma_l \Gamma'_p} \quad , \quad \gamma'' = \frac{1}{1 - \Gamma_l \Gamma''_p} \quad D''(k_x, k_y) = \vec{A}_{10}(k_x, k_y) \cdot \vec{S}''_{02}(k''_x, k''_y)$$

$$D'(k_x, k_y) = \frac{e^{ik_z d}}{4\pi^2 \gamma' a_{0n}'} \int_{x_{min}}^{x_{max}} \int_{y_{min}}^{y_{max}} B_0'(x, y) e^{ik_x x + ik_y y} dx dy$$

$$D''(k_x, k_y) = \frac{e^{ik_z d}}{4\pi^2 \gamma'' a_{0n}''} \int_{x_{min}}^{x_{max}} \int_{y_{min}}^{y_{max}} B_0''(x, y) e^{ik_x x + ik_y y} dx dy$$

$$B_0'(x, y) = \frac{b_0'(x, y)}{b_0'(x_0, y_0)}, \quad a_{0n}' = \frac{a_0}{b_0'(x_0, y_0)},$$

$$B_0''(x, y) = \frac{b_0''(x, y)}{b_0''(x_0, y_0)} \quad a_{0n}'' = \frac{a_0}{b_0''(x_0, y_0)}$$

$$G_a(k_{x0}, k_{y0}) = \frac{M}{G_p(k_{x0}, k_{y0})} \left| \frac{4\pi}{\lambda^2} \Delta x \Delta y \sum_{x_m, y_n} \frac{B_0'(x_m, y_n)}{|c_n'|^2} e^{ik_{x0}x_m + ik_{y0}y_n} \right|^2,$$

$$M = \frac{|1 - \Gamma_g \Gamma_a|^2}{|1 - \Gamma_g \Gamma_l|^2} \frac{|1 - \Gamma_l \Gamma_p'|^2}{(1 - |\Gamma_a|^2)(1 - |\Gamma_p'|^2)} \quad G = \frac{4\pi r^2 \Re\{\frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{H}^*\}}{P_0}$$

$$G_r = G(1 - |\Gamma|^2)$$

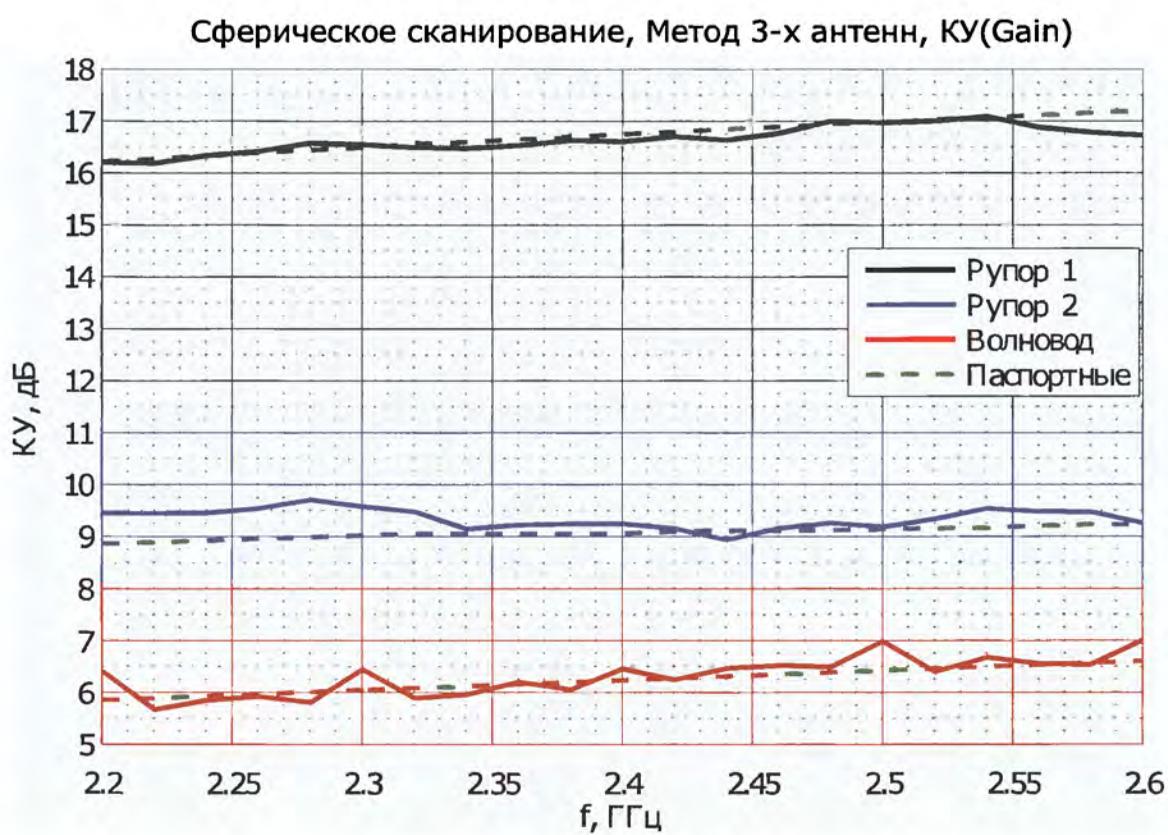
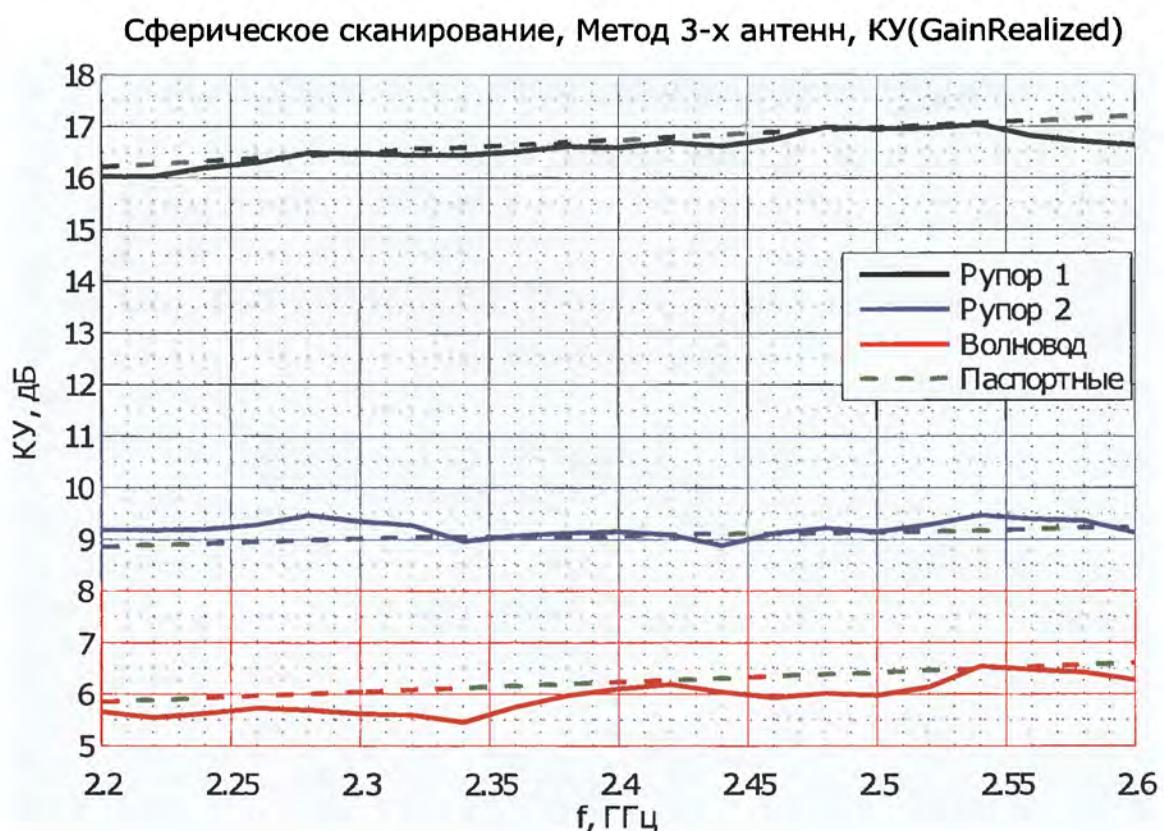
Основные методы определения КУ на стенах ближнего поля

1. Прямой метод определения КУ
2. Метод сравнения с эталонной антенной
3. Метод 3-х антенн

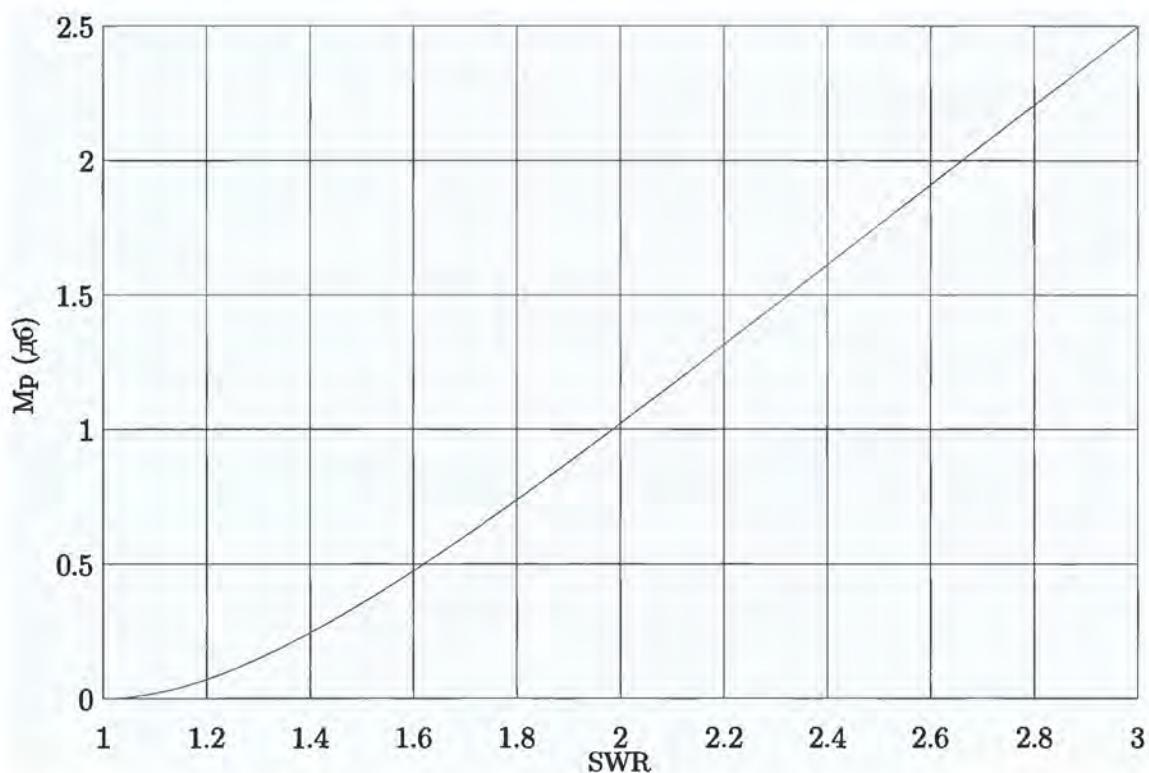
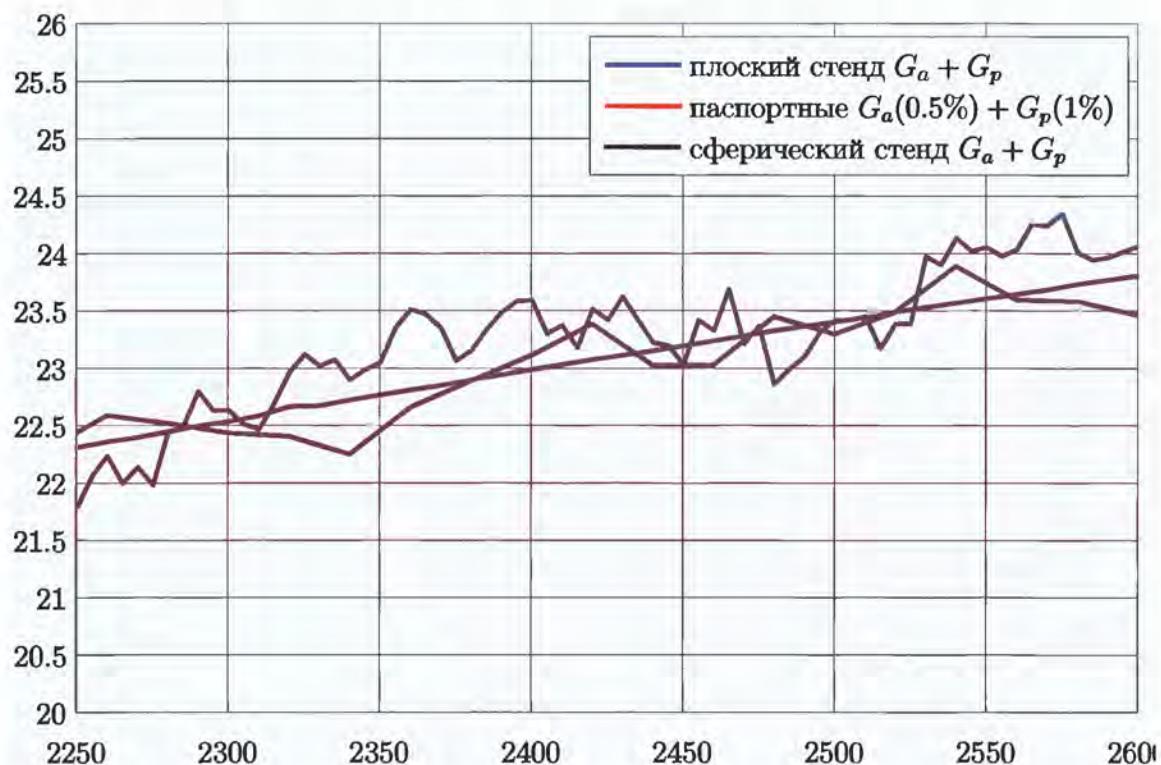
$$G_{rA1} G_{rA2} = \frac{P_{A12}}{P_{TX}} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad G_{rA1} = \sqrt{\frac{G_{rA1} G_{rA2} \cdot G_{rA1} G_{rA3}}{G_{rA2} G_{rA3}}}$$

$$G_{rA1} G_{rA3} = \frac{P_{A13}}{P_{TX}} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad G_{rA2} = \sqrt{\frac{G_{rA1} G_{rA2} \cdot G_{rA2} G_{rA3}}{G_{rA1} G_{rA3}}}$$

$$G_{rA2} G_{rA3} = \frac{P_{A23}}{P_{TX}} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad G_{rA3} = \sqrt{\frac{G_{rA3} G_{rA2} \cdot G_{rA1} G_{rA3}}{G_{rA2} G_{rA1}}}$$



**Сравнение результатов измерения КУ на плоском
и сферическом стендах прямым методом
(без учета коэффициента рассогласования М)**



**ДВА МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ АФР ПОЛЯ
В РАСКРЫВЕ АНТЕННЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
СФЕРИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ
В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ**

Шубников В. В.

**Связь напряженности поля и спектра плоских волн
в дальней зоне**

$$\vec{E}(\vec{r}) = i \frac{2\pi}{r} k_z \vec{A}(\vec{k}) e^{-ikr}$$

$$A_x = \frac{E_x}{i \frac{2\pi}{r} k_z e^{-ikr}}$$

$$A_y = \frac{E_y}{i \frac{2\pi}{r} k_z e^{-ikr}}$$

$$A_x = \frac{\cos \theta \cos \varphi E_\theta - \sin \varphi E_\varphi}{i \frac{2\pi}{r} k_z e^{-ikr}}$$

$$A_y = \frac{\cos \theta \sin \varphi E_\theta + \cos \varphi E_\varphi}{i \frac{2\pi}{r} k_z e^{-ikr}}$$

В выражение для напряженности входит функция Ханкеля

$$E_\theta = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\sqrt{r} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(kr)) b_{nm} \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^m(\cos \theta) + \right. \\ \left. + \frac{\mu \omega}{r} \sqrt{r} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(kr) a_{nm} \frac{m}{\sin \theta} P_n^m(\cos \theta) \right) e^{im\varphi}$$

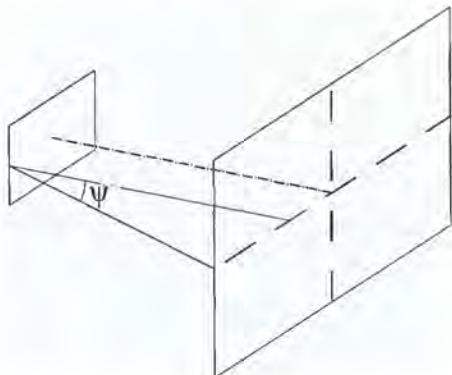
Асимптотика функции Ханкеля и выражений ее включающих

$$H_{\nu}^{(2)}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \exp[-i(x - \frac{\pi}{2}\nu - \frac{\pi}{4})] + O(x^{-\frac{3}{2}})$$

$$\frac{\frac{1}{\sqrt{r}} H_{n+1/2}^{(2)}(kr)}{i \frac{2\pi}{r} k_z e^{-ikr}} \approx \sqrt{\frac{2}{\pi k}} \frac{e^{i(n+1)\frac{\pi}{2}}}{2\pi i k_z}$$

$$\frac{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\sqrt{r} H_{n+1/2}^{(2)}(kr))}{i \frac{2\pi}{r} k_z e^{-ikr}} \approx \sqrt{\frac{2k}{\pi}} \frac{1}{2\pi i k_z} e^{in\frac{\pi}{2}}$$

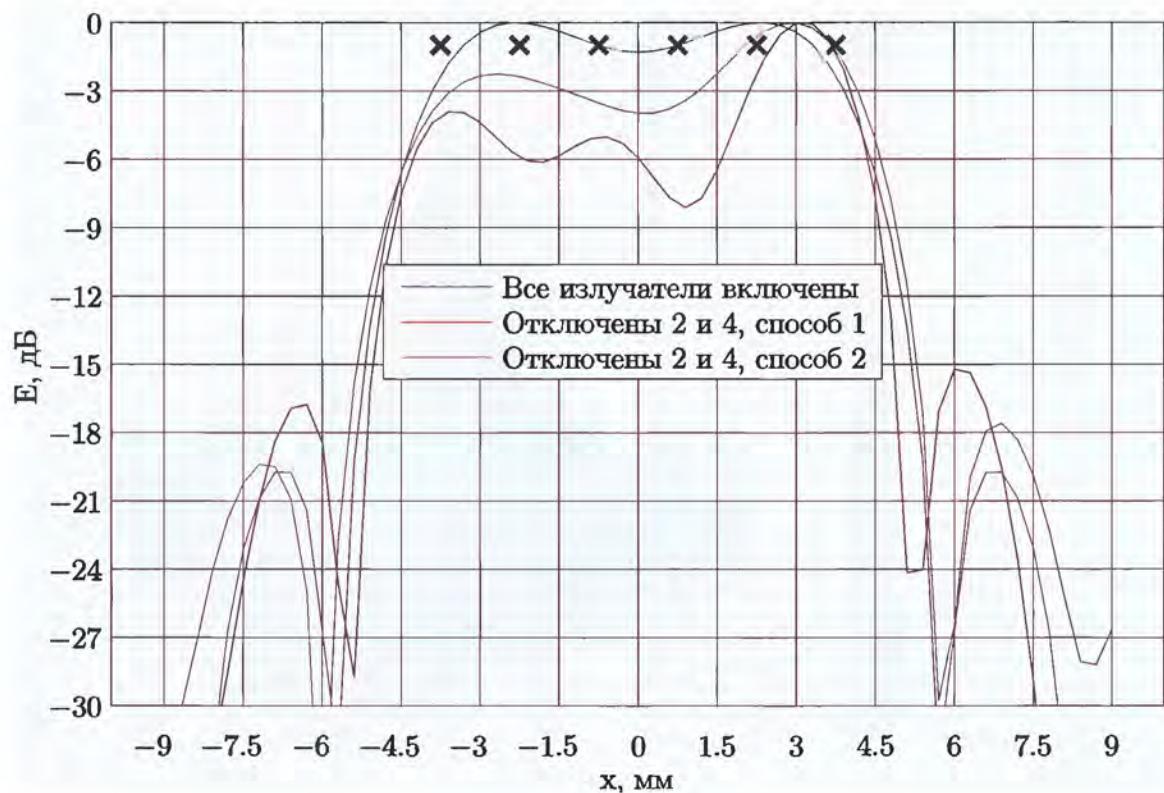
Использование промежуточной плоскости



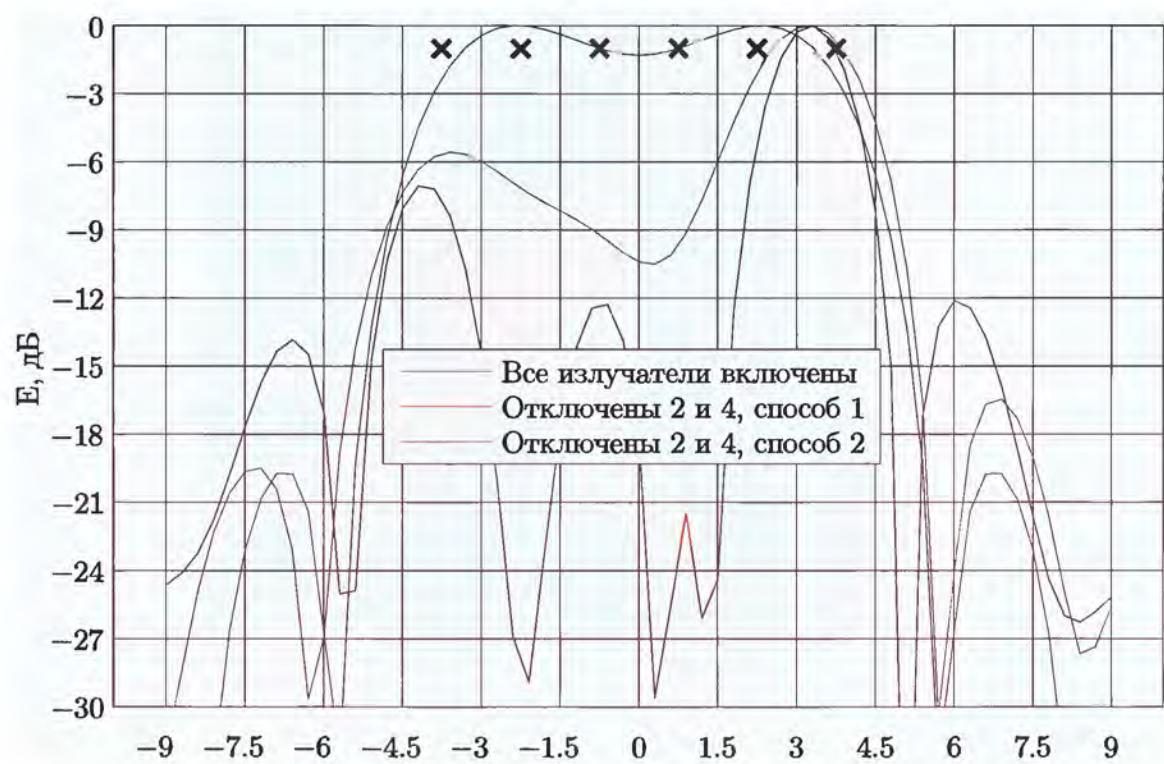
Рупор R&S HF907



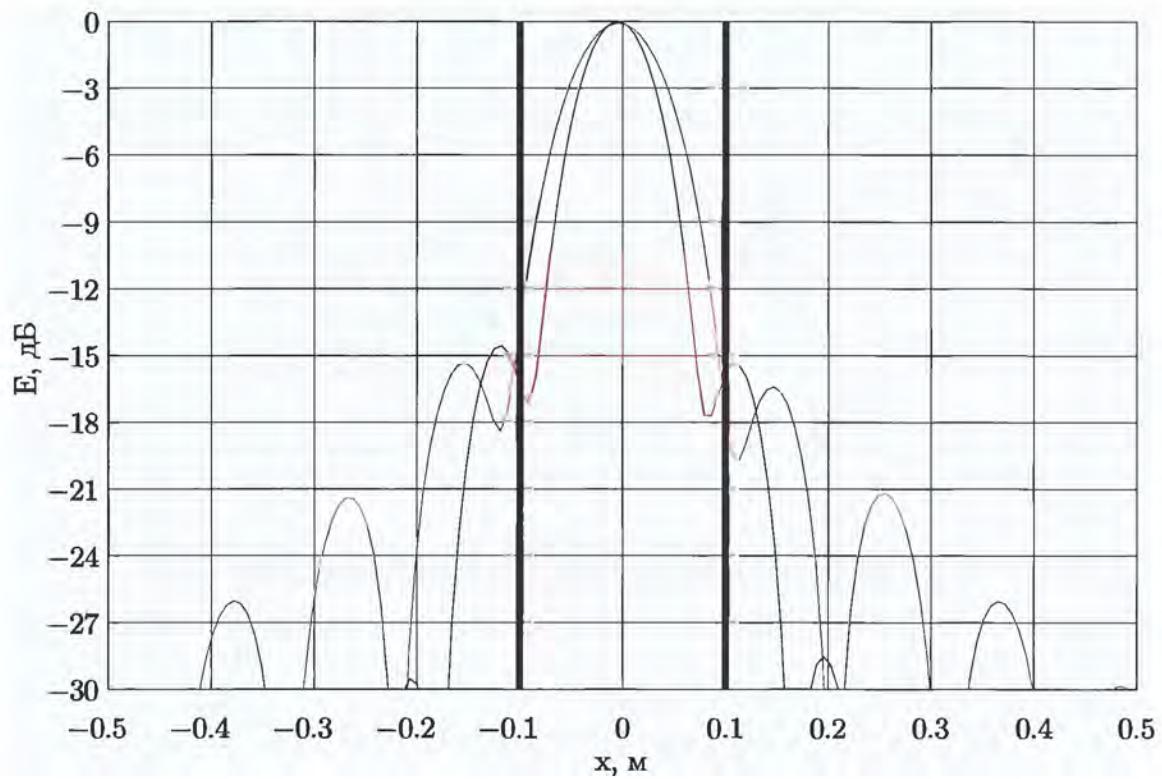
Излучатели 2 и 4 работают на половинной амплитуде



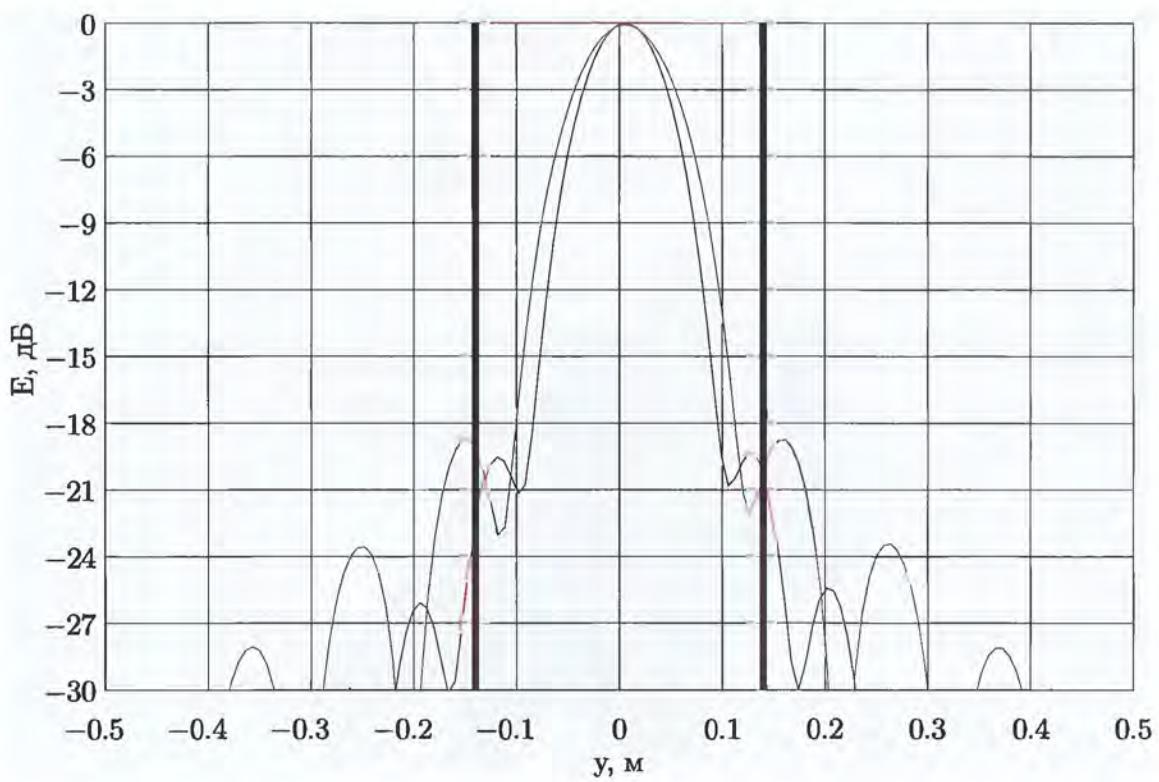
Излучатели 2 и 4 отключены



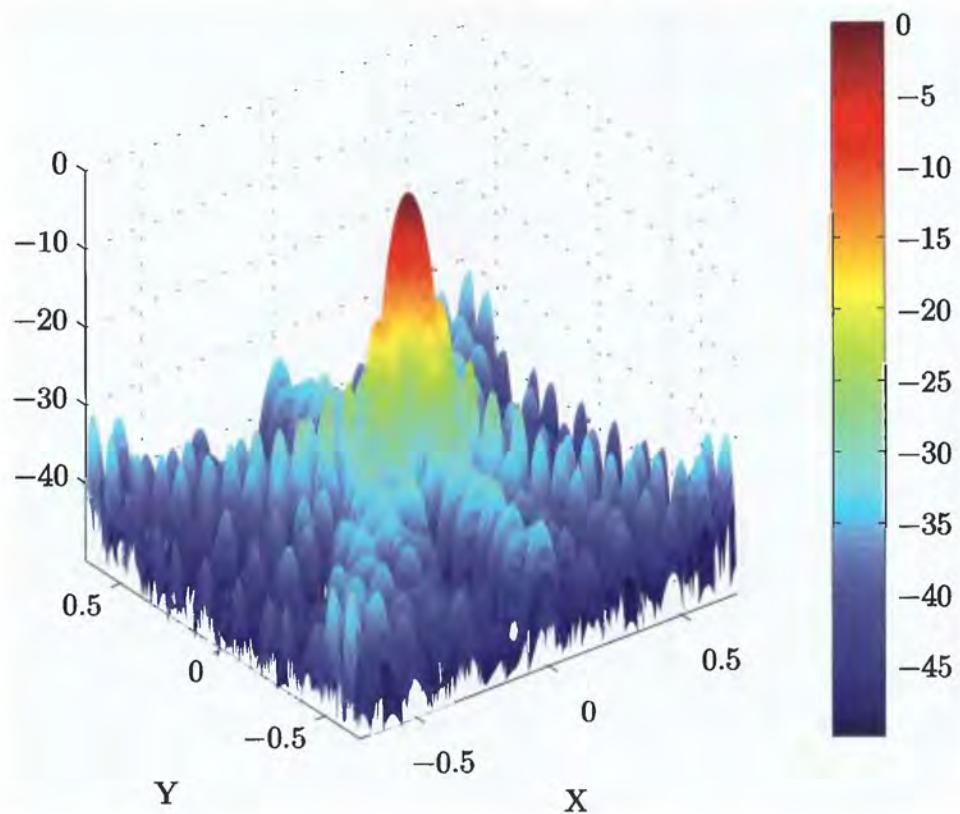
Е-плоскость, 2.2 ГГц



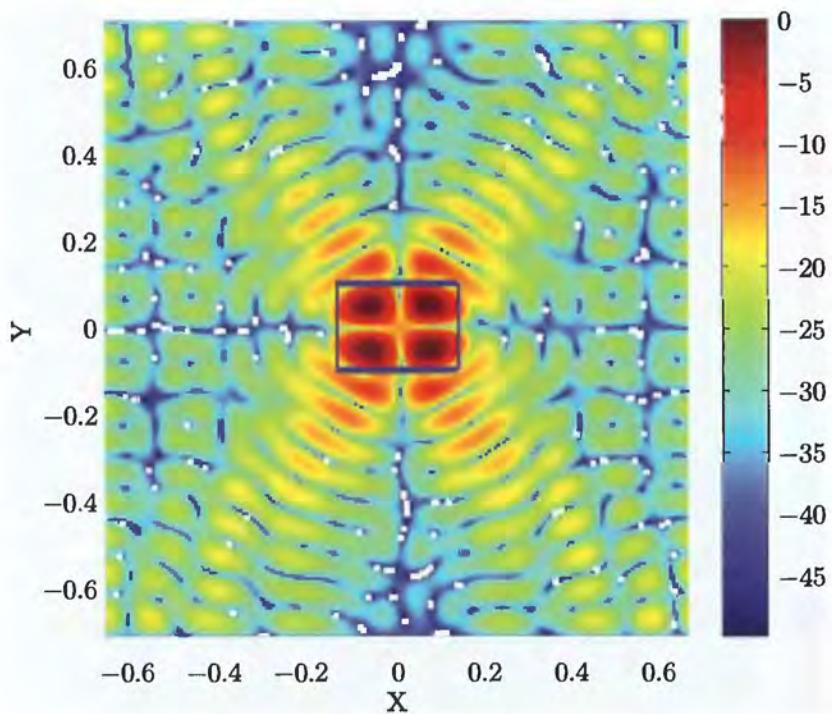
Н-плоскость, 2.2 ГГц

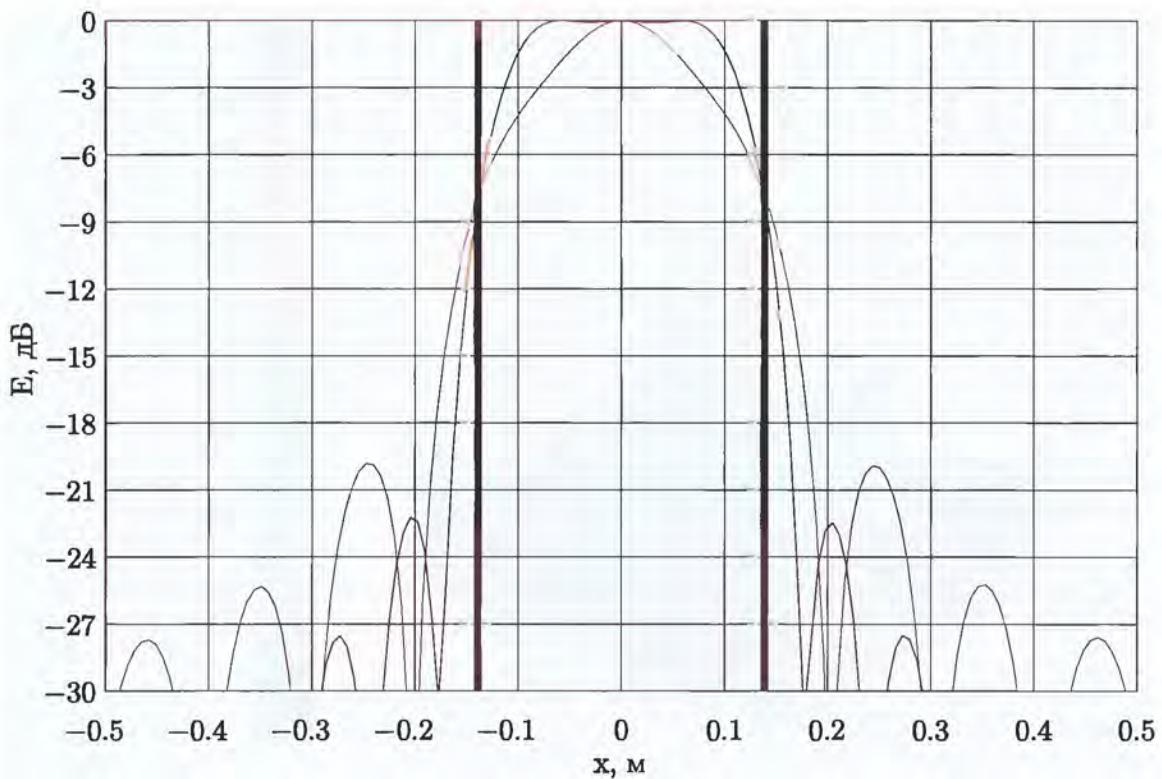
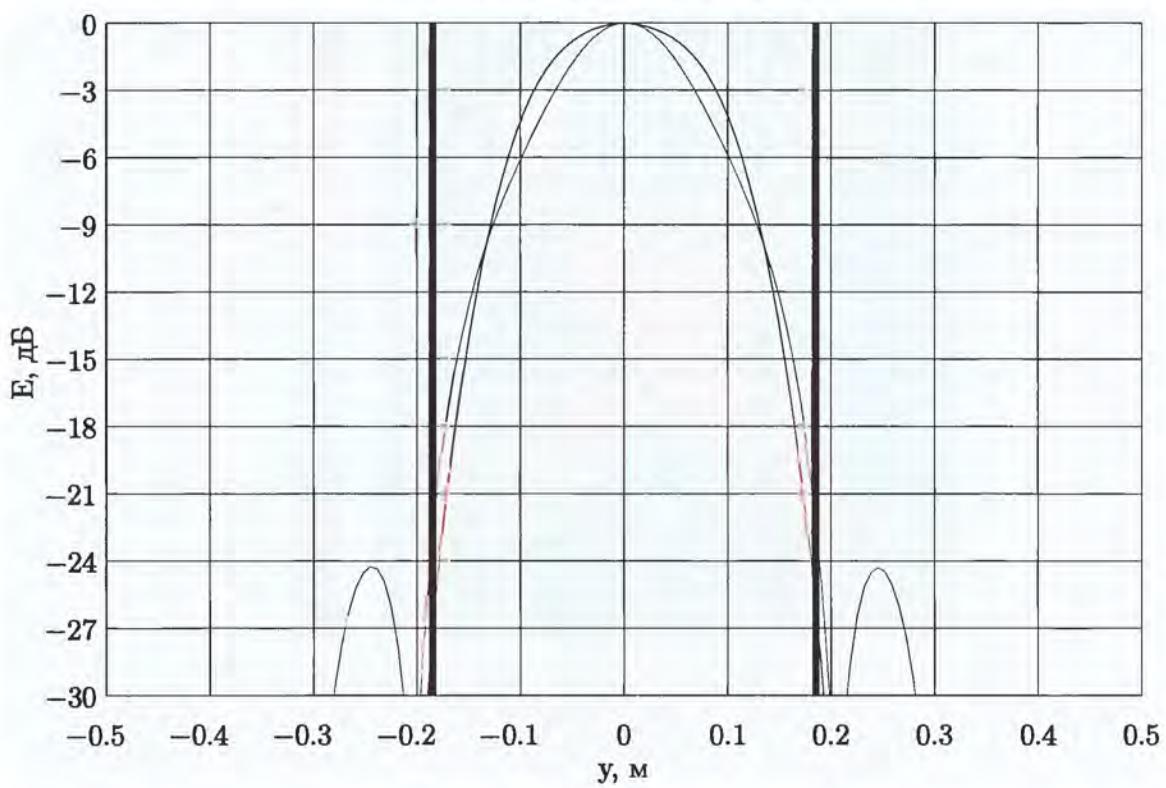


Основная поляризация

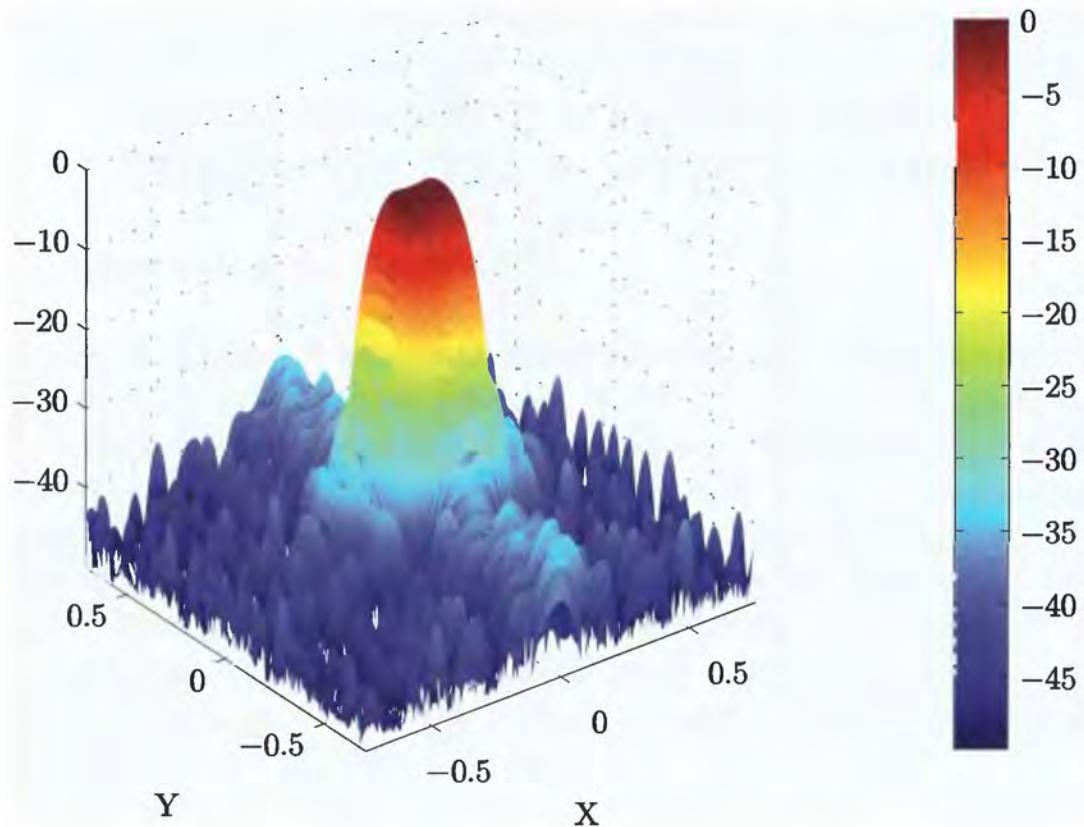


Кросс поляризация

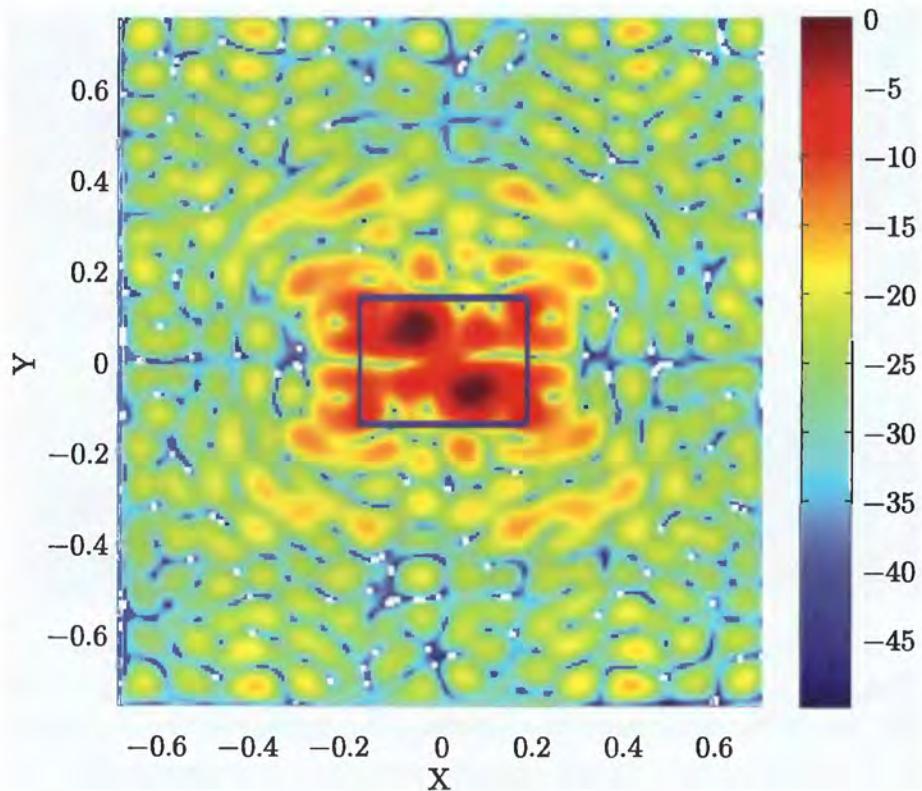


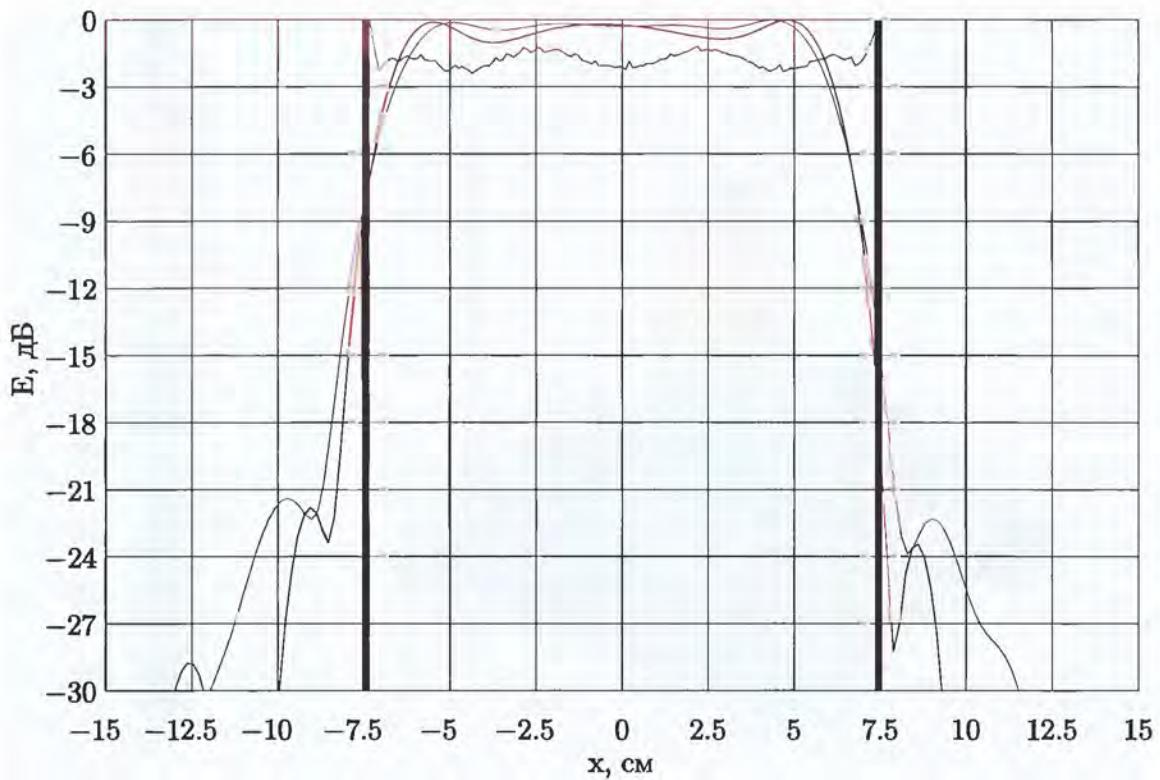
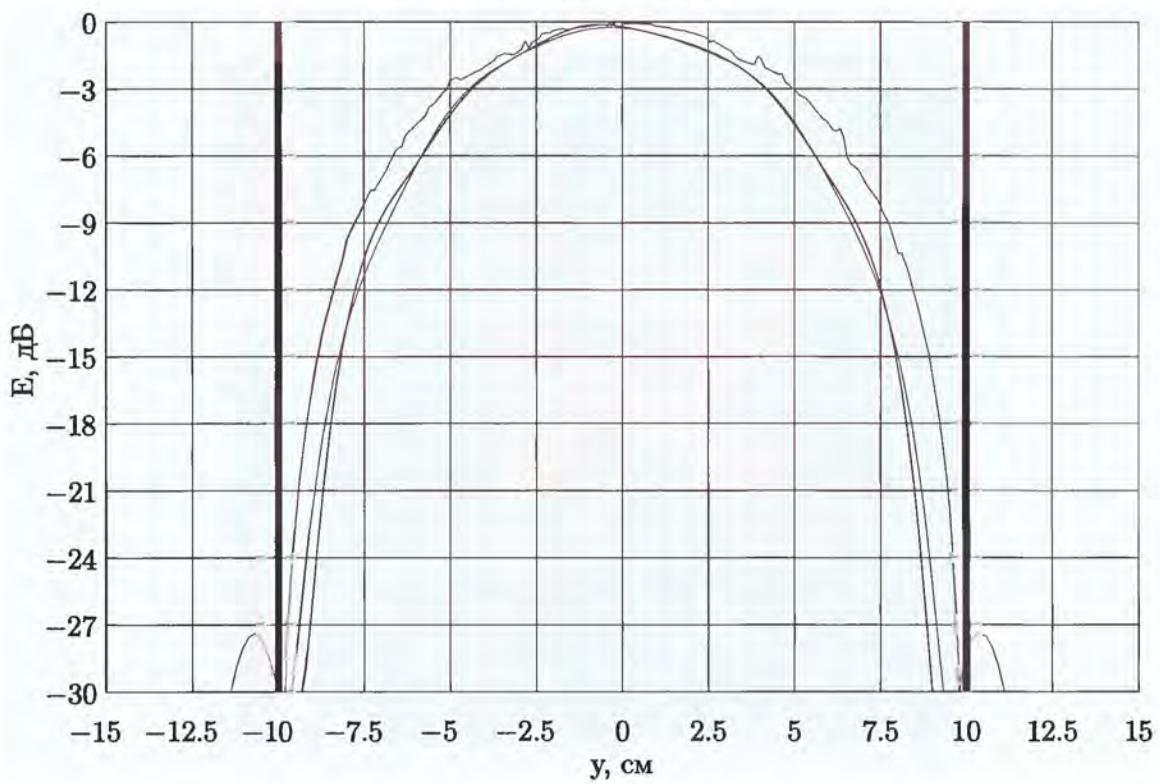
Е-плоскость, 2.2 ГГц**Н-плоскость, 2.2 ГГц**

Основная поляризация



Кросс поляризация



Е-плоскость, 8.4 ГГц**Н-плоскость, 8.4 ГГц**

ОПЫТ И ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ФАЗИРОВАНИЯ РЛС СРЕДНИХ И БОЛЬШИХ ВЫСОТ С АФАР В ХОДЕ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Бомиштейн А.Д., Францев М.Е.

За последнее десятилетие ННИИРТ освоил и довел до серийного производства технологию создания РЛС средних и больших высот метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн с активными фазированными антенными решетками. К особенностям таких РЛС можно отнести достаточно большую площадь апертуры антенной решетки и, соответственно, большое количество приемно-передающих элементов, требующих фазирования.

Типичным представителем применения всех перечисленных АФАР является мобильный многодиапазонный комплекс 55Ж6М, выпускаемый в настоящее время серийно (рис. 1).

РЛК 55Ж6М



Rис. 1

Комплекс включает в себя радиолокационные модули (РЛМ) метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов волн, а также кабину

управления со встроенным НРЗ. Так, представленный на рисунке 2 РЛМ метрового диапазона волн имеет площадь антенной решетки 208 м^2 при количестве элементов 154, конструктивно выполненных в виде одноканальных приемно-передающих модулей (рис. 3).

**РЛМ-М
РЛК 55Ж6М**



Рис. 2

Приемно-передающие модули РЛМ-М

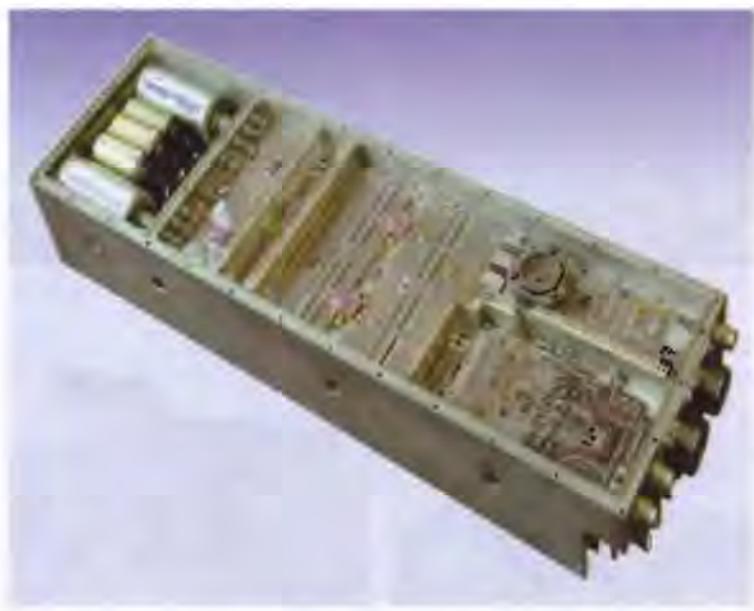


Рис. 3

Представленный на рис. 4 РЛМ дециметрового диапазона имеет площадь антенной решетки 18 м^2 на которой размещены 1824 элемента, конструктивно объединенные в четырехканальные приемные и приемно-передающие модули (рис. 5).

**РЛМ-Д
РЛК 55Ж6М**



Рис. 4

**Приемно-передающие
и приемные модули РЛМ-Д**

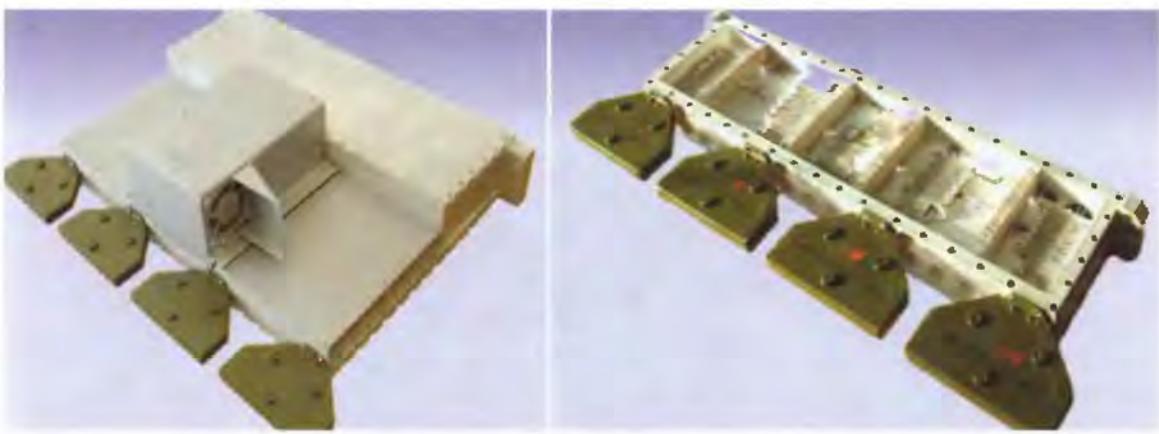


Рис. 5

Представленный на рисунке 6 РЛМ сантиметрового диапазона имеет приемную и передающую антенные решетки.

РЛМ-С
РЛК 55Ж6М



Рис. 6

Площадь приемной антенной решетки составляет 12 м^2 при количестве элементов 4608, конструктивно объединенных в шестиканальные модули, площадь передающей решетки – 4 м^2 , при числе элементов – 1536, конструктивно объединенных в восьмиканальные модули. Передающий и приемный модули РЛМ-С показаны на рисунке 7.

Передающие и приемные модули РЛМ-С



Рис. 7

В процессе проведения ОКР и освоения серийного производства на предприятии были опробованы и отработаны различные подходы амплитудной и фазовой настройки и калибровки приемных и передающих каналов АФАР с учетом особенностей частотных диапазонов РЛС. К их числу можно отнести следующие методы.

Внутреннее фазирование – введение пилот-сигнала, подаваемого по кабельной системе разводки, в приемно-передающие модули антенной решетки (АР) через направленные ответвители. Сигнал подается в выделенном временном стробе за рабочей дистанцией РЛС. Преимуществом данного метода является возможность регулярного проведения фазовой подстройки вне зависимости от внешних помеховых условий и проведение фазирования АР в процессе штатной работы РЛС.

Недостатком является снижение точности фазирования, вызванное производственным разбросом длин кабелей.

В РЛС метрового диапазона длин волн, где небольшие неточности в геометрических длинах кабелей не столь критично влияют на изменение фазы сигнала, не оказывая существенного влияния на характеристики результирующей ДН, данный способ фазирования является достаточно эффективным.

На рисунках 8 и 9 приведены графики амплитудного и фазового распределений (АФР) сигналов приемных каналов РЛМ–М, полученные до проведения фазово-амплитудной подстройки АФАР и после подстройки, соответственно.

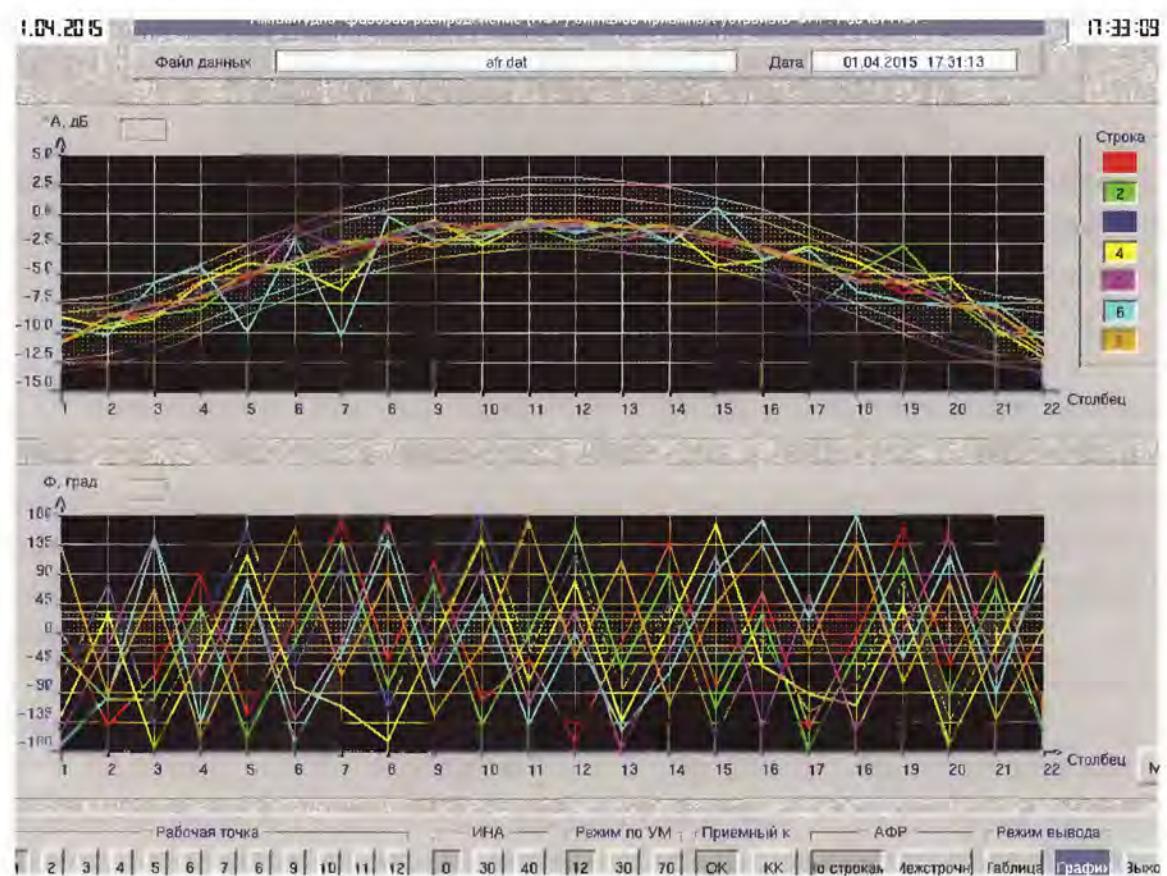


Рис. 8

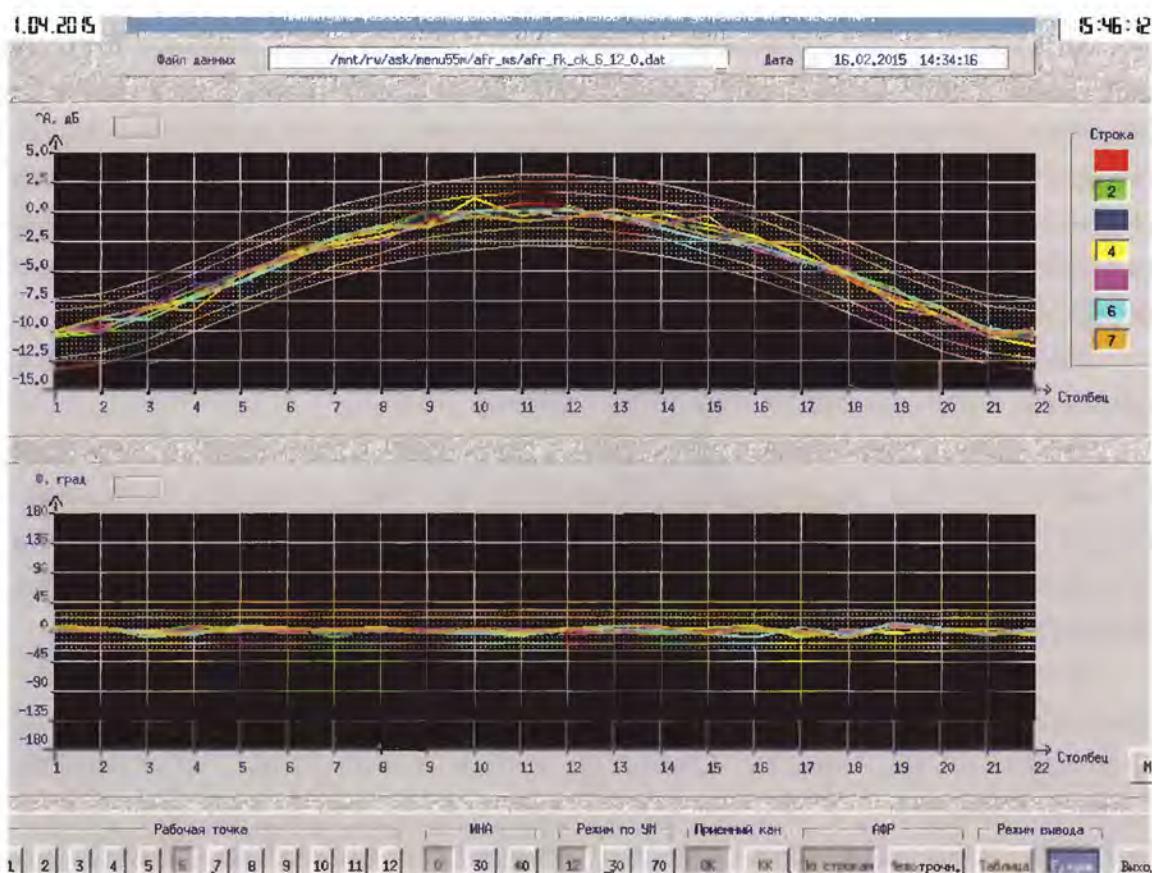


Рис. 9

На рис. 10 приведены результирующие азимутальные диаграммы направленности (ДН) АФАР РЛМ-М, соответствующие полученным АФР, а также расчетная ДН АР.

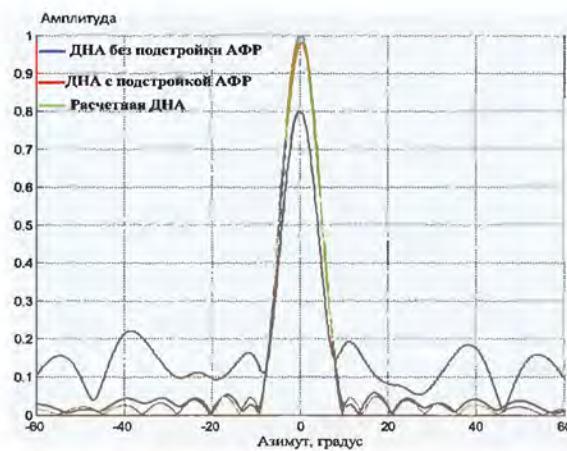


Рис. 10

В коротковолновых диапазонах гораздо сложнее выполнить требования по синфазной разводке пилот-сигнала на большой апертуре решетки. На рис. 11 представлена тыльная сторона антенной решетки РЛМ-Д.

**АФАР РЛМ-Д
РЛК 55Ж6М**

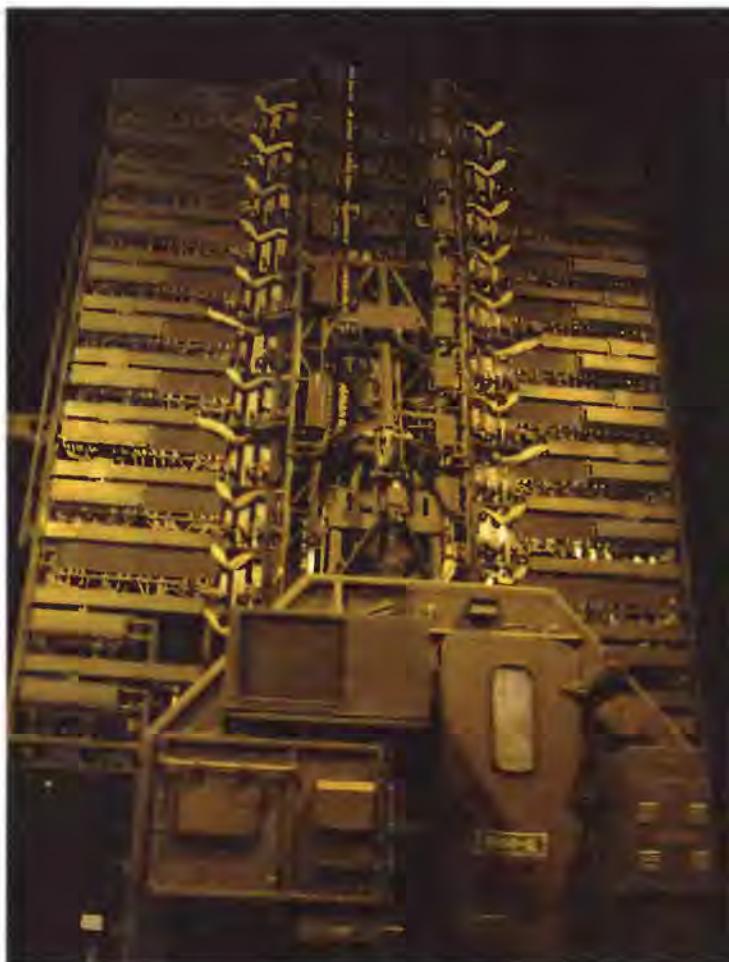


Рис. 11

Невозможно достичь требуемой точности изготовления аппаратуры ввиду сильно разветвленной, многокаскадной системы разводки пилот-сигнала (появляются дополнительные каскады делителей, усилителей, размещаемые на АР, многометровые кабельные тракты, имеющие особенность искажать фазу передаваемого сигнала при изгибах и петлях, образуемых во время электромонтажа).

Кроме того, внутреннее фазирование не охватывает излучающие элементы антенной решетки.

Поэтому в РЛС коротковолновых диапазонов были предприняты попытки внешнего фазирования по выносным контрольным излучателям, закрепленным как на неподвижной части конструкции изделия, так и на специальных складных консолях непосредственно на краях АР. На рис. 12 показана двухдиапазонная РЛС 55Ж6УМ с закрепленной на полуприцепе выносной мачтой.

РЛС 55Ж6УМ*Puc. 12*

На мачте размещены два контрольных излучателя, соответствующих диапазонов волн (рис. 13).

Контрольные излучатели РЛС 55Ж6УМ*Puc. 13*

Существенными недостатками такого подхода оказались внешние промышленные помехи, действующие в момент фазирования. А также практически не преодолимые сложности по установке с высокой точностью выносных излучателей относительно плоскости решетки от замера к замеру.

Хороший практический результат с точки зрения точности фазирования был получен при непосредственной поочередной подаче пилот-сигнала на излучающие элементы с контрольного диполя, который устанавливался вручную на расстоянии λ с помощью фиксирующей рамки напротив каждого диполя АР. Такой подход позволяет получить высокие точности юстировки (фазовой подстройки) антенной решетки, но обладает существенными недостатками:

- длительное время проведения работ по фазированию (около 10–12 рабочих смен для АР РЛМ-Д), особенно критичное при массовом серийном производстве;
- отсутствие возможности точной установки контрольного излучателя при наличии РПУ на антенной решетке.

Кроме того, необходимо было решать задачу фазирования на запрещенных частотах военного времени, составляющих от 80 до 95 % рабочего диапазона частот РЛС.

Учитывая полученный на предприятии опыт работы с АФАР, было принято решение по разработке и изготовлению автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса (АИВК), позволяющего проводить юстирование и контроль характеристик АР РЛС во всем рабочем диапазоне частот (с учетом двух плоскостей поляризации) методом ближней зоны. Такой комплекс был создан в 2012 г. совместно с ООО «НПП «Трим СШП Измерительные системы» в процессе проведения ОКР «Эталон», являющейся составной частью ОКР «Триумфатор». Для размещения аппаратуры комплекса и проведению работ на частотах военного времени на предприятии было построено здание с безэховой камерой (рис. 14).

Автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс (АИВК) для фазирования АФАР



Rис. 14

На тот момент безэховая камера и сканер не имели аналогов в России по своим размерам (рис. 15).

АИВК В БЭК



Рис. 15

В процессе проведения ОКР «Эталон» были разработаны и реализованы аппаратные и программные средства сопряжения АИВК с изделием.

С помощью АИВК осуществляется:

- измерение амплитудно-фазового распределения поля на апертуре антенной решетки путем трех координатного перемещения измерительного зонда сканера параллельно плоскости АР (погрешность позиционирования – 0,5 мм в пределах рабочей зоны $13 \times 11 \times 3$ м (X, Y, Z), погрешность позиционирования осей поляризации и элевации зонда сканера $0,5^\circ$);
- программно-временное сопряжение со штатной аппаратурой изделия, запись и обработка измеренных данных;
- формирование юстировочных констант и запись их в исполнительные устройства изделия;
- вычисление объемной комплексной ДН и произвольных ее сечений с последующим выводом характеристик АФАР;
- автоматическая проверка характеристик изделия на соответствие требованиям ТУ.

На рис. 16 показан процесс фазовой подстройки АФАР РЛМ-Д одного из серийных изделий 55Ж6М с применением автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса.

Фазирование АФР РЛМ-Д



Рис. 16

Таким образом, АИВК позволяет провести настройку, проверку, комплексные испытания и сдачу параметров изделия с минимальными временными затратами в условиях предприятия-изготовителя.

Обобщенная комплексная задача фазирования многоэлементных АФАР сводится к получению максимально высоких точностей их настройки и юстировки при изготовлении и сохранению и поддержанию полученных результатов в процессе эксплуатации изделия.

На первом этапе проводится фазирование изделия с высокой точностью на АИВК в БЭК во всем рабочем диапазоне частот, формирование юстировочных констант и запись их в исполнительные устройства изделия. После чего производится подача пилот-сигнала по внутренней разводке и снятие АФР на прием и передачу, которое является базовым для последующего фазирования и контроля в процессе эксплуатации изделия.

В дальнейшем, в процессе эксплуатации изделия, например после замены ППМ из состава ЗИП, фазирование проводится по пилот-сигналу внутренней разводки с учетом базового АФР, полученного после юстировки на АИВК. При этом по стационарной выносной мачте производится контроль амплитудного распределения, позволяющего оценить работоспособность таких элементов антенной решетки, как диполи, кабели от диполей до модулей, а также работоспособность входных ключей модулей.

Таким образом, был разработан и внедрен комплекс алгоритмов, программ и аппаратных средств для фазирования антенных решеток, позволяющий скомпенсировать неидентичность отдельных приемо-передающих модулей по усилению и по фазе, учесть температурные уходы, старение элементов, зависимость их характеристик от рабочей частоты. Это позволило обеспечить высокие стабильные характеристики активной ФАР в процессе ее производства и эксплуатации.

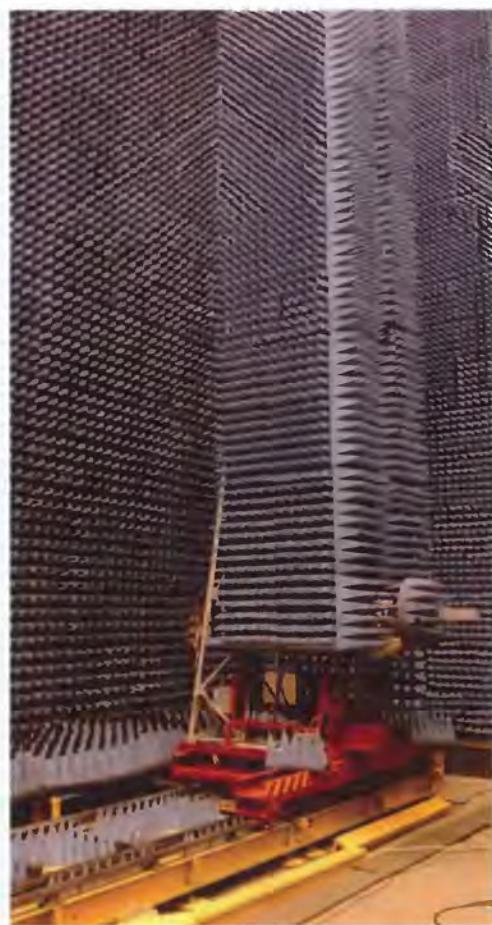
АНТЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СКАНЕРОВ НА НПО «ЛЭМЗ»

Степанов Е. С., Логачев П. В., Фастович С. В., Климов К. Н.

Специализированные измерительные комплексы

АИВК ТМСА 1.0-40.0 Б056

АИВК «ВЕКТОР»



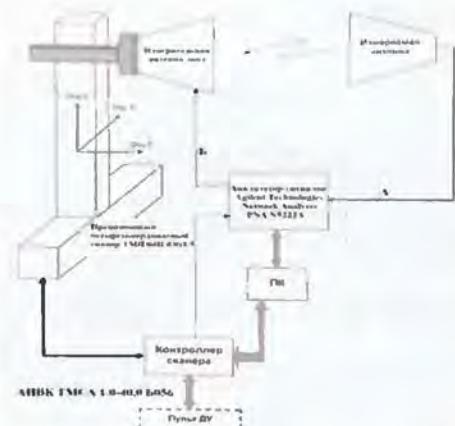
Технические характеристики АИВК

Наименование параметра	АИВК ТМСА 1.0–40.0 Б056	АИВК «ВЕКТОР»
Диапазон рабочих частот	1,0–26,0 ГГц	1,0–12,0 ГГц
Размер рабочей зоны сканера	4 x 1,5 м	8,5 x 9,4 м
Точность позиционирования координат сканера в рабочей зоне:		
По координатам X, Y, Z, не хуже	0,15 мм (СКО)	0,35 мм (СКО)
По координате Р, не хуже	±0,05 град.	—
Суммарное СКО ошибки измерений амплитуды в диапазоне:		
0–20 дБ, не более	0,3 дБ	0,6 дБ
0–40 дБ, не более	0,6 дБ	
Суммарное СКО ошибки измерений фазы в диапазоне:		
0–20 дБ, не более	3 град.	4 град.
0–40 дБ, не более	6 град.	
Погрешность измерений коэффициента усиления	±0,35 дБ	±1,5 дБ

АИВК «ТМСА 1.0–40.0 Б056»



- Располагается в БЭК размером 14x5,5x3 м
- Используется для измерения электрически малых антенн и фрагментов ФАР



Состав АИВК ТМСА 1.0 – 40.0 Б056

- Прецизионный четырехкоординатный (X,Y,Z,P) Т-сканер ТМП 04П4.0 x 1.5
- Контроллер сканера
- Пульт дистанционного управления (ДУ)
- Комплект фазостабильных кабелей
- Анализатор сигналов Agilent PNA N5222A
- Комплект измерительных зондов фирмы TRIM
- Персональный компьютер (ПК)
- Источники бесперебойного питания



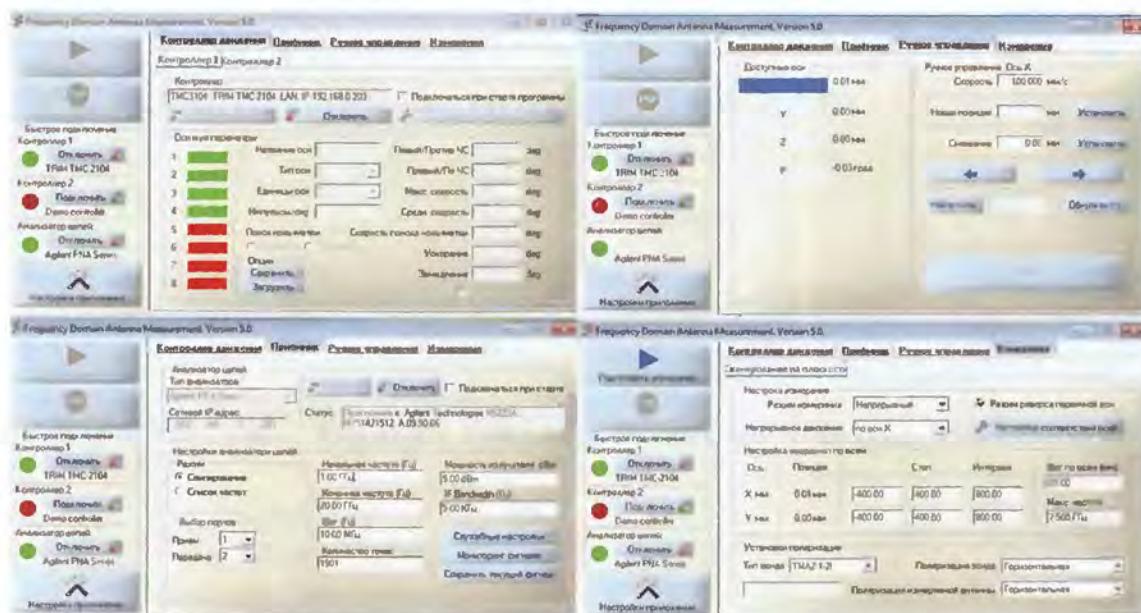
Внешний вид антennы-зонда
TMAZ 1-4I
диапазона частот 1 – 4 ГГц

Внешний вид антennы-зонда
TMAZ 4-12I
диапазона частот 4 – 12 ГГц

Внешний вид антennы-зонда
TMAZ 8-18I
диапазона частот 8 – 18 ГГц

Внешний вид антennы-зонда
TMAZ 18-40I
диапазона частот 18 – 40 ГГц

Программное обеспечение для АИВК ТМСА 1.0-40.0 Б056



АИВК «ВЕКТОР»



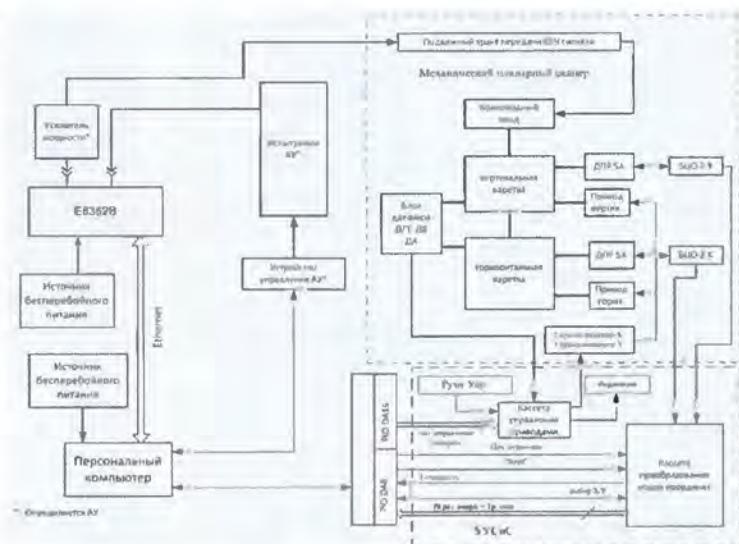
- Располагается в БЭК размером 20×18×16 м.
- Используется для ПСИ антенн систем большого размера

Опорно-поворотное устройство для установки антенных устройств



Состав АИВК «ВЕКТОР»

- Механический планарный сканер УСКИб.3-3
- Анализатор цепей Agilent E8362B
- Усилитель СВЧ сигналов Agilent
- Устройство управления сканером и сопряжения с ПК (УУСиС)
- Блок цифрового отчета БЦО-2
- Комплект измерительных зондов
- ПК (управление)
- ПК (обработка)
- Стапель (ОПУ) для размещения АУ
- Видеокамеры и ПК видеокамер
- Устройство громкоговорящей связи
- Система обеспечения температурного режима камеры



Структурная схема АИВК «ВЕКТОР»

Волноводные антенны-зонды



диапазон частот 1 – 1,45 ГГц

диапазон частот 1,45 – 2,20 ГГц

диапазон частот 2,20 – 3,30 ГГц

диапазон частот 3,30 – 4,90 ГГц

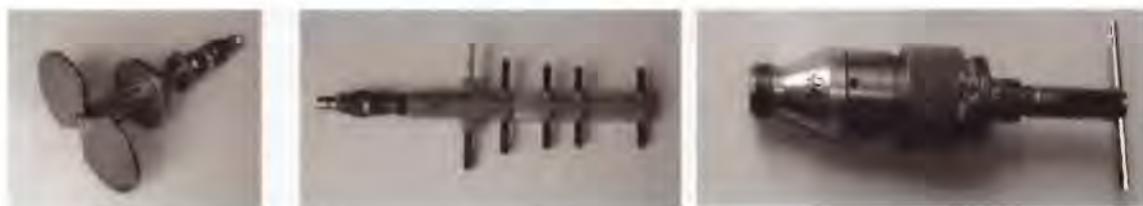
диапазон частот 4,90 – 7,05 ГГц

диапазон частот 7,05 – 10,0 ГГц

диапазона частот 10,0 – 15,0 ГГц

диапазона частот 15,0 – 22,0 ГГц

Антенны-зонды вибраторного типа



Операторская АИВК «ВЕКТОР»

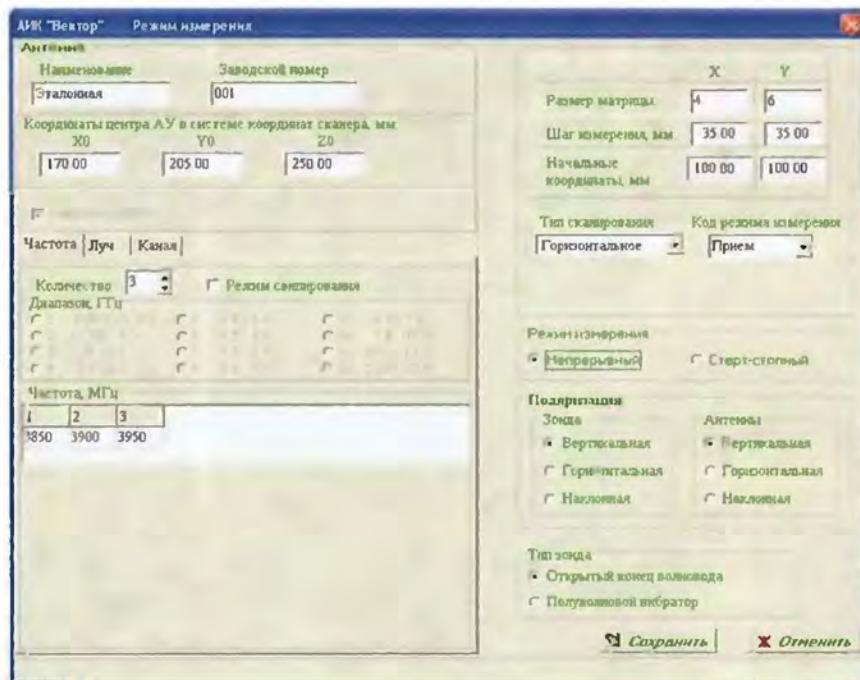


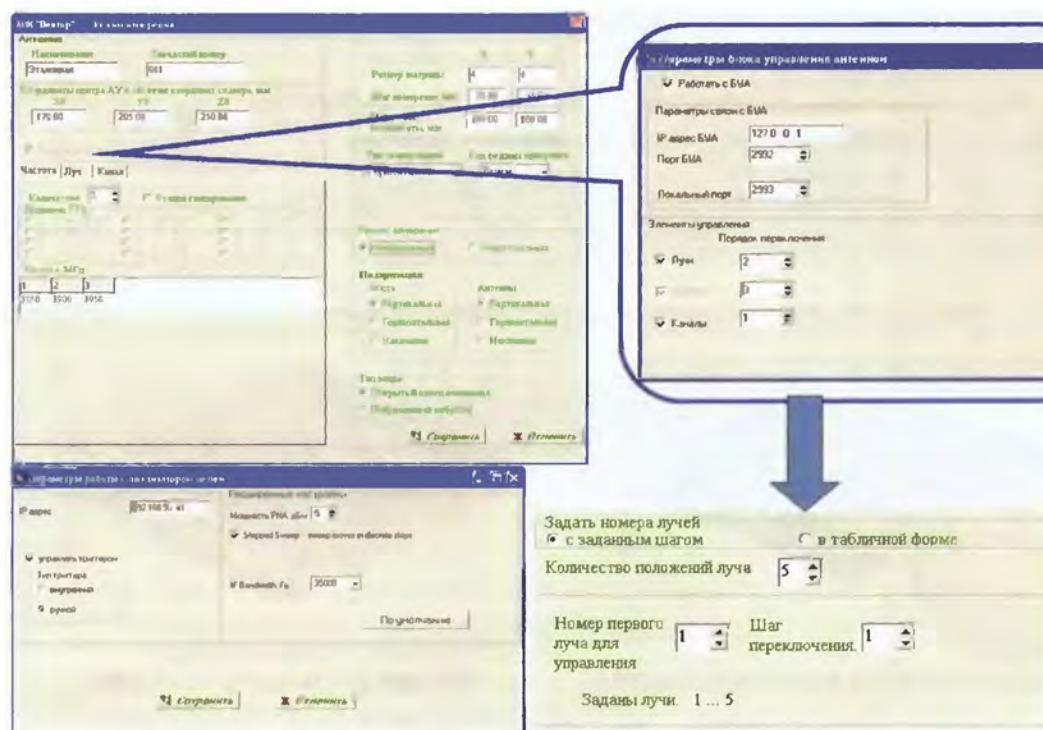
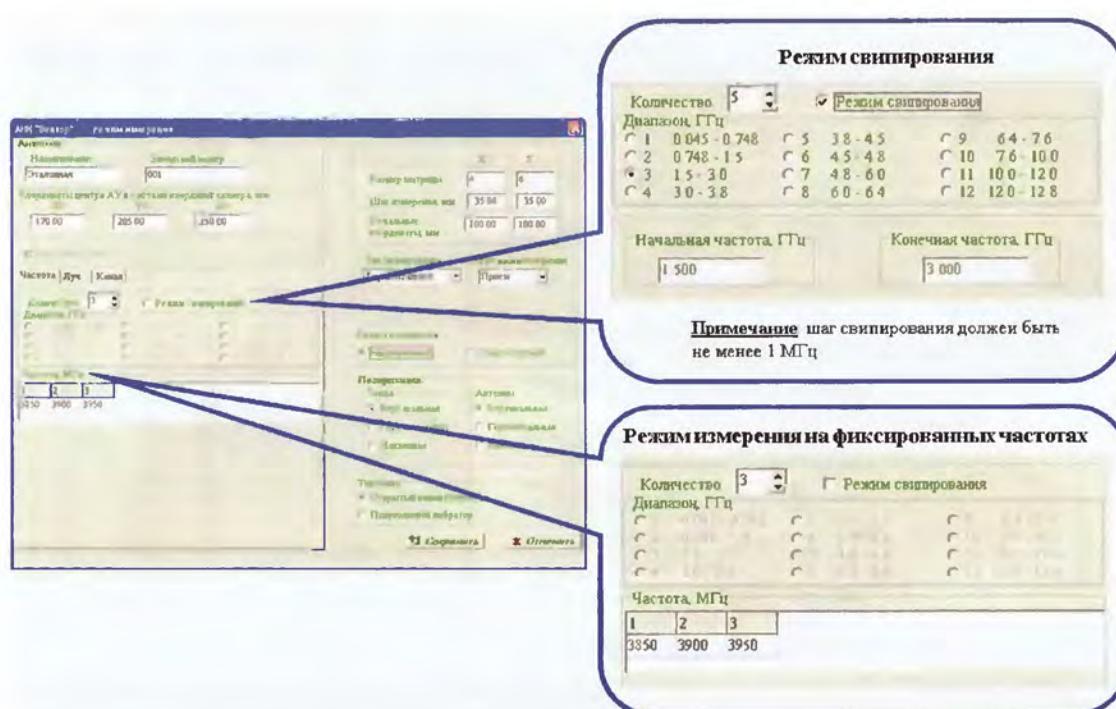
**Стойка с измерительной
аппаратурой**

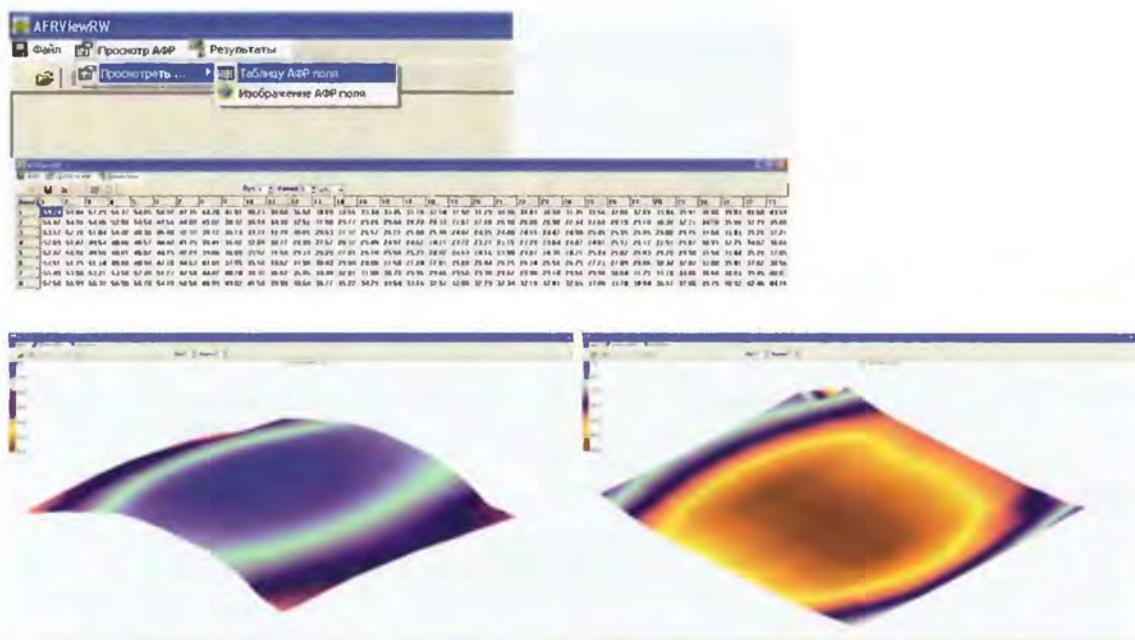
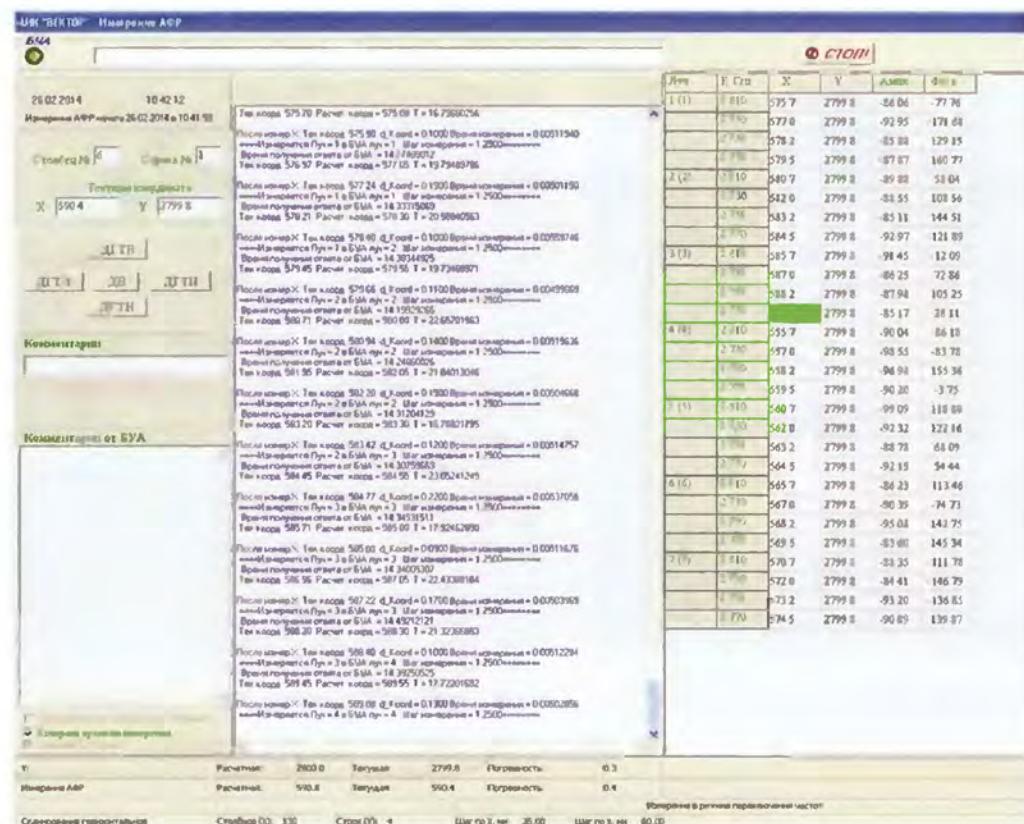


Рабочее место оператора

Программное обеспечение АИВК «ВЕКТОР»

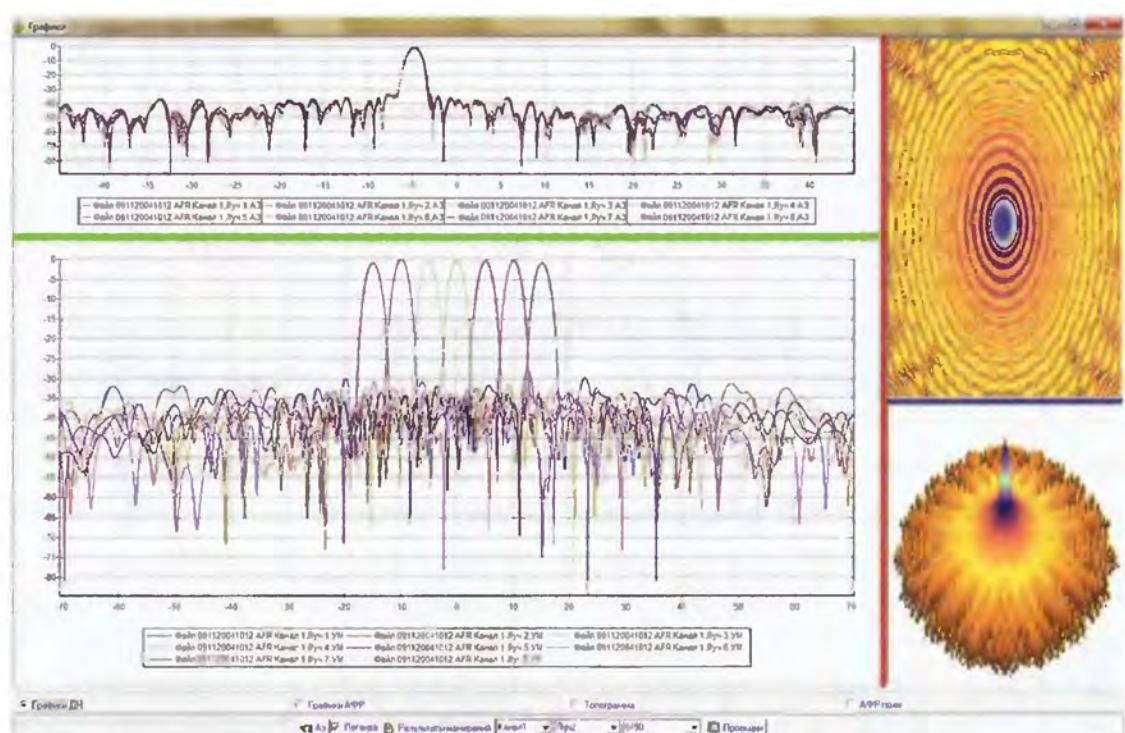
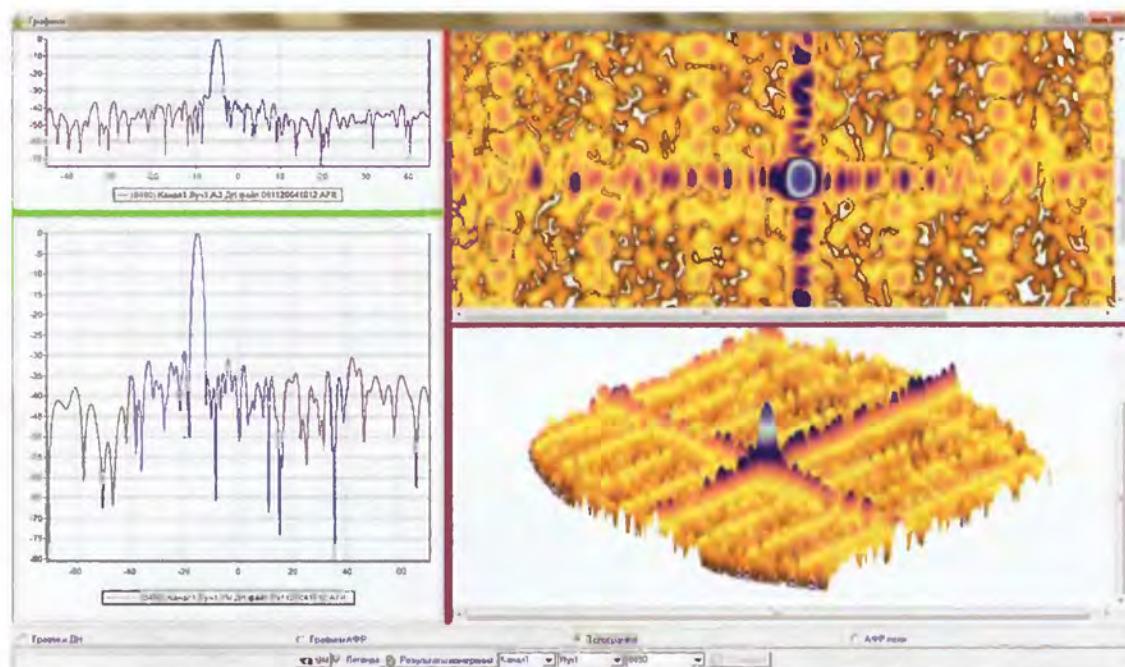


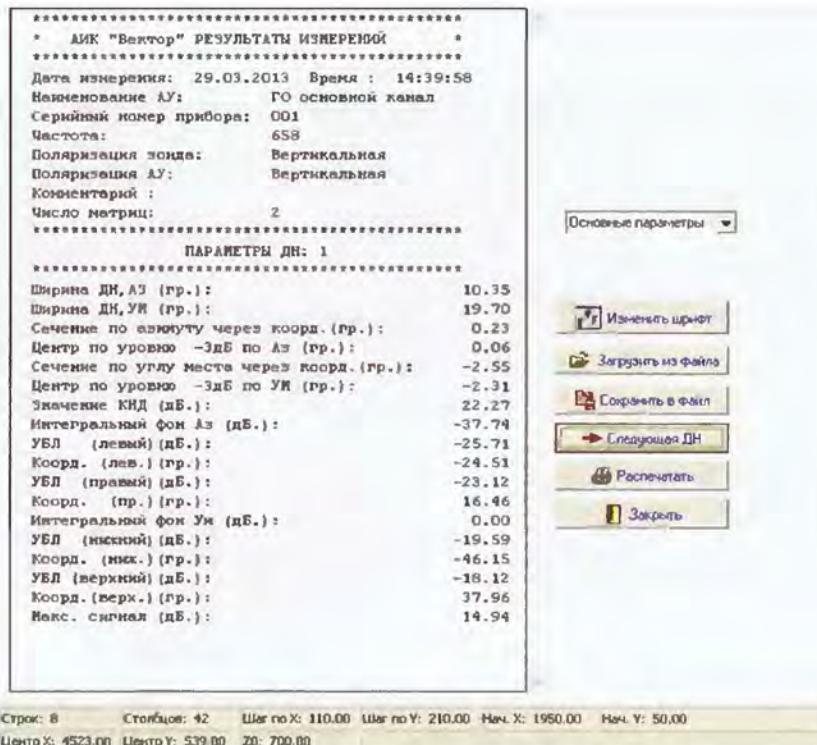




Амплитудное распределение

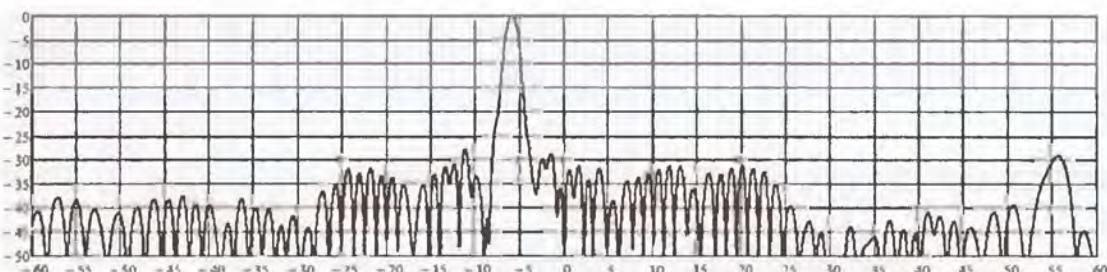
Фазовое распределение



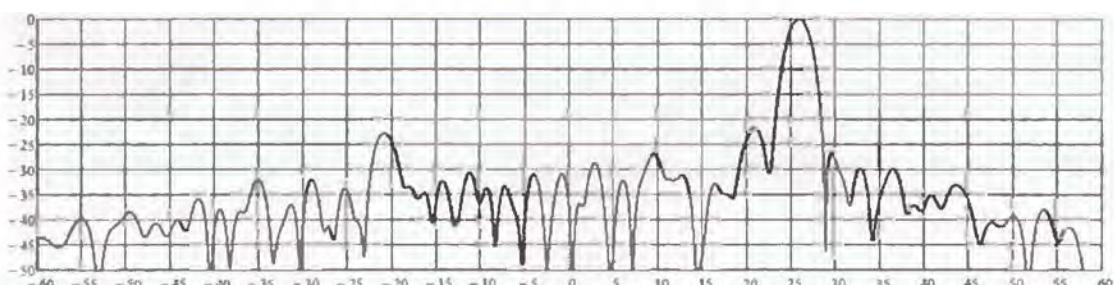


Диаграммы направленности, восстановленные по измеренному амплитудно-фазовому распределению антенной решетки ТРЛК «СОПКА» на АИВК «ВЕКТОР»

ДН в горизонтальной плоскости



ДН в вертикальной плоскости

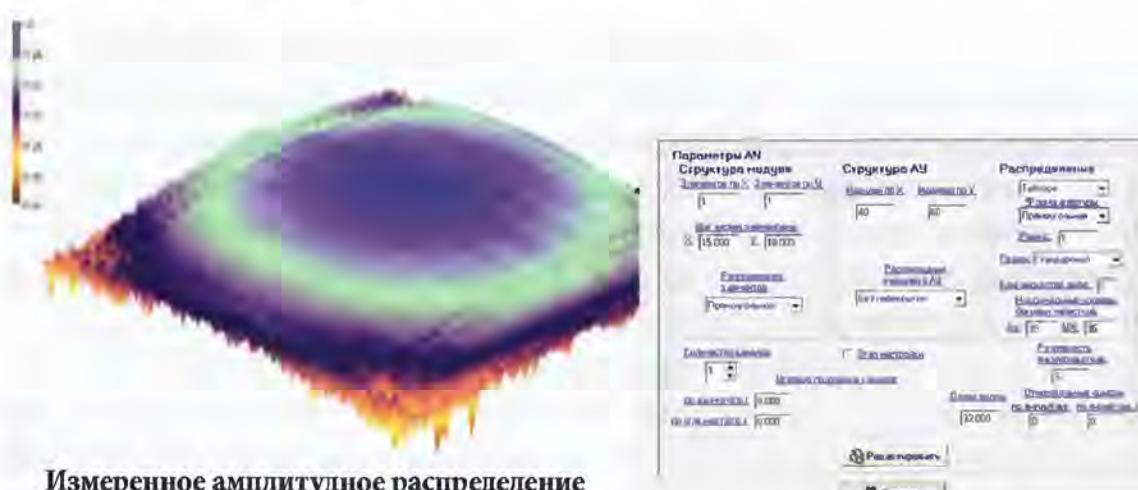


Пересчет АФР на апертуру

Для проведения пересчета измеренного АФР на апертуру необходимо задать:

В опции *Параметры антенны*:

- количество элементов;
- шаг между элементами;
- количество разрядов фазовращателя.
- В диалоговом окне **Режим измерения** – шаги измерения равные шагу между излучающими элементами.



Измеренное амплитудное распределение в раскрыте антennой решетки ТРЛК «СОПКА»

Основные направления развития и проблемы

Доработка АИВК «ТМСА 1.0–40.0 Б056» для реализации измерений на цилиндрической поверхности.

Разработка методик для проведения бесфазовых измерений характеристик направленности антенн с использованием скалярных приборов.

Отсутствие современной нормативной базы:
**АНТЕННЫ ОСТРОНАПРАВЛЕННЫЕ
 МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
 ПАРАМЕТРОВ ПО ПОЛЮ В РАСКРЫВЕ
 ГОСТ 8.309–78**

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ДИАГНОСТИКИ ОТКАЗОВ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОЗИЦИОНЕРОВ

Ненартович Н. Э., Балагуровский В. А., Маничев А. О.

Фазированные антенные решетки (ФАР) представляют собой сложные технические устройства, которые в отличие от многих других антенн могут существенно изменять форму и направление главного луча диаграммы направленности (ДН). В связи с этим, объем измерений для достаточно полной оценки характеристик ФАР, как правило, заметно превышает набор данных, требуемых для антенн с неизменной формой ДН. Соответственно, измерение параметров и диагностика ФАР требуют проведения измерений большого числа характеристик с весьма высокой точностью и скоростью.

При этом большой практический интерес представляет измерение параметров фазированных антенных решеток (ФАР) в ближней зоне, так как это позволяет выполнять работы на компактных антенных полигонах (закрытых от негативного влияния таких факторов окружающей среды, как температура, осадки, ветер), а также заметно облегчает решение задачи электромагнитной совместимости при выполнении измерений.

Для измерений в ближней зоне нередко используются методы, основанные на использовании теоремы эквивалентности и включающие измерение параметров поля вблизи испытуемой антенны на некоторой поверхности. Такие измерения обычно включают механическое перемещение испытуемой и/или вспомогательной антенны друг относительно друга. Для позиционирования испытуемой антенны обычно используется опорно-поворотное устройство (ОПУ), а для вспомогательной антенны – механический позиционер (сканер), перемещающий ее вдоль одной или двух ортогональных осей. Однако реализация измерений с использованием механических позиционирующих устройств сопряжена с рядом технических трудностей:

- 1) Вносятся неизбежные погрешности позиционирования (вызванные, например, выносом фазового центра антенны перед точкой пересечения осей ОПУ, отклонениями от ортогональности координатных осей ОПУ или сканера и т. п.).

- 2) Измерения выполняются с довольно низкой скоростью (что связано с необходимостью выполнения прецизионного механического перемещения антенн).

3) Необходимо обеспечивать высокую стабильность амплитуды и фазы коэффициента передачи в СВЧ тракте между входами измерительной техники и антеннами при их различных положениях.

4) Возникают паразитные отражения от конструкции сканера, позиционирующего зонд.

Кроме того, заметно усложняется процесс испытаний активных ФАР (АФАР) в передающем режиме, т. к. для применения данных методов измерения, строго говоря, необходимо, чтобы все элементы ФАР излучали мощность одновременно. Это ставит серьезные проблемы по защите персонала и техники от воздействия электромагнитного излучения большой мощности.

Вместе с тем особенности ФАР позволяют измерять многие важные параметры без механического перемещения. Данный доклад посвящен таким методам.

1. Коммутационные методы измерения параметров ФАР

Широкий спектр применения имеют коммутационные методы измерения параметров ФАР, активно развивающиеся на протяжении последних пяти десятилетий [1, 2, 3, 4]. Они требуют для реализации, как правило, лишь наличия небольшого зонда, неподвижно расположенного в ближней зоне ФАР, анализатора цепей и стендового компьютера (типичная измерительная установка представлена на рис. 1). Можно выделить следующие основные операции этих методов:

- 1) Измерение суммарного сигнала от всех элементов ФАР.
- 2) Изменение состояния одного или нескольких фазовращателей ФАР.
- 3) Повторение операций (1) и (2) при различных состояниях фазовращателей ФАР.
- 4) Определение комплексных значений возбуждения каждого элемента при помощи математической обработки результатов измерений.

Рассмотрим теперь возможности, которые предоставляет данный подход к измерению параметров ФАР.

1.1. Измерение ДН ФАР при помощи коммутационных методов

Можно с достаточно высокой для практики точностью определять ДН ФАР в произвольных направлениях при помощи следующей мате-

матической модели ФАР [3]. Как известно, ДН плоской ФАР $\hat{f}(\theta, \varphi)$ в направлении, задаваемом углами (θ, φ) , может быть определена следующим образом [5]:

$$\hat{f}(\theta, \varphi) = \hat{f}_{el}(\theta, \varphi) \sum_{n=1}^N A_n e^{j(kx_n \sin \theta \cos \varphi + ky_n \sin \theta \sin \varphi + \psi_n)}, \quad (1)$$

где $\hat{f}_{el}(\theta, \varphi)$ – ДН элемента в составе ФАР, A_n и ψ_n – соответственно, амплитуда и фаза возбуждения n -го элемента, x_n и y_n – его координаты, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, а N – число элементов в ФАР.

Из (1) видно, что для определения ДН ФАР достаточно знать значения ДН элемента в составе ФАР и амплитудно-фазовое распределение (АФР) в ее апертуре. ДН элемента можно получить один раз в отдельном эксперименте, например, со сравнительно небольшим фрагментом апертуры ФАР. Что касается АФР, то для его измерения можно применить коммутационный метод измерений с коррекцией результатов, учитывающей разность хода сигнала от разных элементов до вспомогательной антенны и разброс амплитуд, вызванный различной взаимной ориентацией разных излучателей ФАР относительно вспомогательной антенны.

При этом следует отметить, что использование в качестве вспомогательной антенны коллиматора позволяет избавиться от необходимости коррекции амплитуд и фаз, что значительно облегчает задачу определения ДН ФАР [6].

1.2. Измерение характеристик возбуждений элементов ФАР

Для управления ФАР (реализации требуемого АФР) необходимо знать, какое комплексное значение возбуждения имеет каждый элемент при каждом значении кода (управляющего воздействия). Задача определения таких характеристик может решаться путем помещения согласованного зонда поочередно на каждый из элементов ФАР. Однако, учитывая достаточно большое число дискретов фазирования и количество элементов в крупных ФАР, этот процесс является очень трудоемким и затратным по времени.

Применяя коммутационный метод измерений [3] характеристики возбуждений элементов ФАР могут быть измерены в автоматическом режиме с высокой скоростью.

При этом следует отметить, что обычно характеристики элементов надо знать для каждой рабочей частоты. Следовательно, объем измерений растет пропорционально числу используемых частот, что приводит

к значительному увеличению времени измерений. Так как у современной измерительной техники удельная скорость измерений на одной частоте в режиме качания частоты заметно больше, чем в режиме непрерывной генерации, то измерения характеристик предпочтительнее выполнять в режиме качания частоты. Это можно реализовать при соответствующем планировании эксперимента и модификации метода обработки измеренных данных [7, 8].

1.3. Измерение параметров взаимных связей элементов

Традиционные методы измерения коэффициентов взаимных связей (взаимных сопротивлений или проводимостей) подразумевают подключение источника СВЧ сигнала и измерительного прибора напрямую к исследуемым элементам. Как правило, в реальной ФАР для этого требуется существенное изменение распределительной системы, т. е. такие измерения обычно удается проводить лишь на макетах фрагментов ФАР. Так как разработка и изготовление макетов требует существенных затрат времени и средств, то большой практический интерес представляют методы исследования взаимных связей элементов ФАР со штатной распределительной системой.

Применение таких средств цифровой обработки, как преобразования Уолша-Адамара и Фурье позволяет выделять значения возбуждений отдельных элементов, и они могут эффективно использоваться для решения данной задачи [9, 10].

Кроме того, применение методов цифровой обработки, описанных в [3], к спиральным неэквидистантным ФАР показало, что эффекты взаимных связей хорошо описываются с помощью аппарата статистической теории антенн, и параметры законов распределений случайных искажений с достаточной для практических целей точностью могут быть получены путем цифровой обработки результатов измерений [11, 12]. Например, исследование реальной антенны показало, что амплитудные и фазовые искажения АФР хорошо описываются нормальным законом распределения (см. рис. 2).

1.4. Диагностика отказов управляемых устройств элементов ФАР

Наличие в ФАР большого числа устройств с электронным управлением (от нескольких сотен до десятков тысяч) требует применения быстрых и точных методов диагностики их неисправностей. Так как напрямую подключить контрольно-измерительную аппаратуру к каждому элементу в условиях эксплуатации ФАР весьма затрудни-

тельно, то большой практический интерес представляет диагностика отказов элементов ФАР при помощи коммутационных методов измерения [4], которая не требует демонтажа распределительной системы и/или радиопрозрачного укрытия и может реализовываться с помощью штатных средств радиотехнической системы [13] (что особенно важно в полевых условиях).

В случаях, когда ФАР находится в труднодоступных местах (например на башенно-мачтовой конструкции корабля либо на космическом аппарате), размещение вспомогательной антенны перед апертурой ФАР представляет технические трудности. В этой связи для диагностики можно использовать подход во многом похожий на коммутационный метод измерения, когда измеряются сигналы, отраженные от переходов излучатель-свободное пространство [14], а паразитные составляющие, вызванные наличием взаимных связей между элементами ФАР фильтруются при помощи специализированной многоуровневой обработки измеренных данных на основе преобразования Уолша-Адамара [15–17].

На рис. 3 представлена ФАР L-диапазона со спадающим амплитудным распределением, состоящая из четырех линеек по 16 излучателей, выполненных в форме электрических вибраторов специальной формы. На рис. 4 представлен график отношения амплитуд элементов ФАР, измеренных при наличии отказов (обрыв тракта СВЧ у четырех элементов (с 53 по 56) и внесение затухания величиной 10 дБ в СВЧ тракты элементов 29...32), к тем же амплитудам, измеренным в исправном состоянии. Как видно из представленных данных, отказы уверенно диагностируются.

2. Измерение ДН путем электронного сканирования

Одним из вариантов работы в ближней зоне является использование коллиматора – устройства (как правило, параболической антенны), создающего в области испытуемой антенны поле с равномерным амплитудным и фазовым распределением. Благодаря встроенной способности ФАР управлять фазовым распределением возможно измерение ее ДН путем электрического сканирования. Рассмотрим данный метод. Для его реализации в апертуре ФАР создается при помощи ее фазовращателей специальное фазовое распределение вида:

$$\psi_n = -kx_n \sin \theta \cos \varphi - ky_n \sin \theta \sin \varphi + kx_n \sin \theta' \cos \varphi' + ky_n \sin \theta' \sin \varphi' + \psi_n^0, \quad (2)$$

где (θ, φ) – углы, характеризующие физическую ориентацию ФАР, ψ_n^0 – фазовое распределение, при котором необходимо измерить ДН,

а углы (θ', φ') – некоторые виртуальные углы, в направлении которых требуется измерить ДН.

Подставив (2) в (1), получаем:

$$f(\theta, \varphi) = \hat{f}_{el}(\theta, \varphi) \sum_{n=1}^N A_n e^{j(kx_n \sin \theta' \cos \varphi' + ky_n \sin \theta' \sin \varphi' + \psi_n^0)}. \quad (3)$$

Таким образом, если положение ФАР остается неизменным, то, изменяя углы (θ', φ') , используемые для формирования фазового распределения ФАР, можно измерять множитель решетки ФАР.

Данный метод имеет ряд важных практических преимуществ:

- 1) Так как отклонение луча ФАР занимает весьма малое время, то измерения ДН выполняются с высокой скоростью.
- 2) Измеренная ДН косвенно демонстрирует значение фонового уровня ДН, вызванного случайными искажениями АФР ФАР.
- 3) Появляется возможность измерять ДН в произвольных сечениях либо строить трехмерные ДН.

Следует отметить, что если вместо коллиматора использовать рупор и создавать фокусирующее фазовое распределение, то можно быстро проверять работоспособность ФАР в полевых условиях [18].

В качестве иллюстрации на рис. 6 и 7 представлены экспериментальные и расчетные ДН реальной антенны (рис. 5). Из представленных данных видно, что измерение при помощи электронного сканирования позволяет измерить ДН с высокой точностью. Различия ДН объясняются, видимо, наличием фазовых искажений, вызванных дискретом фазирования и неточностью реализации заданных фазовых сдвигов.

Заключение

Постоянно растущие требования к рабочим и эксплуатационным характеристикам ФАР ставят задачу повышения скорости и точности измерений ее параметров. В данном докладе рассмотрены методы, представляющие практический интерес по основным направлениям измерений и диагностики параметров ФАР.

Опыт авторов показывает, что эффективность решения данных задач в большинстве практически важных случаев существенно повышается путем применения методов цифровой обработки измеряемых данных. В некоторых случаях использование таких методов является единственным возможным практически реализуемым способом получить необходимую информацию.



Рис. 1. Внешний вид измерительной установки

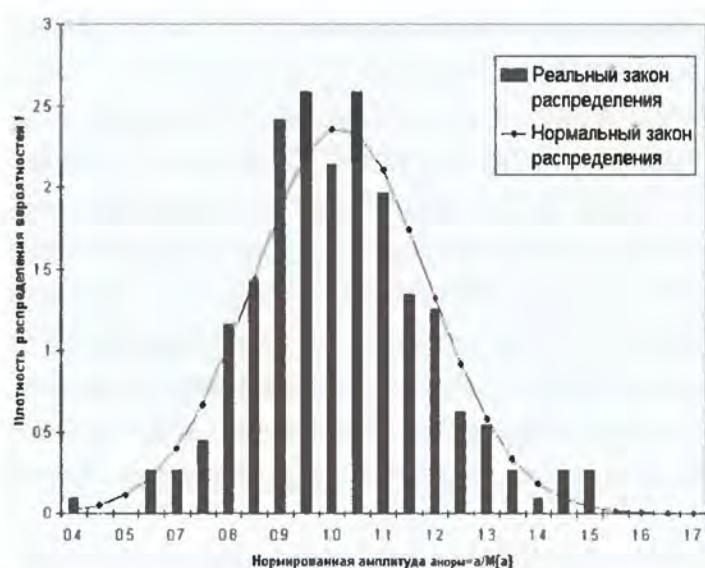


Рис. 2. Плотность распределения относительных амплитудных искажений для ФАР со спадающим амплитудным распределением, $\chi^2=7.71$, $r=10$, $p=0.66$



Рис. 3. Внешний вид испытуемой ФАР

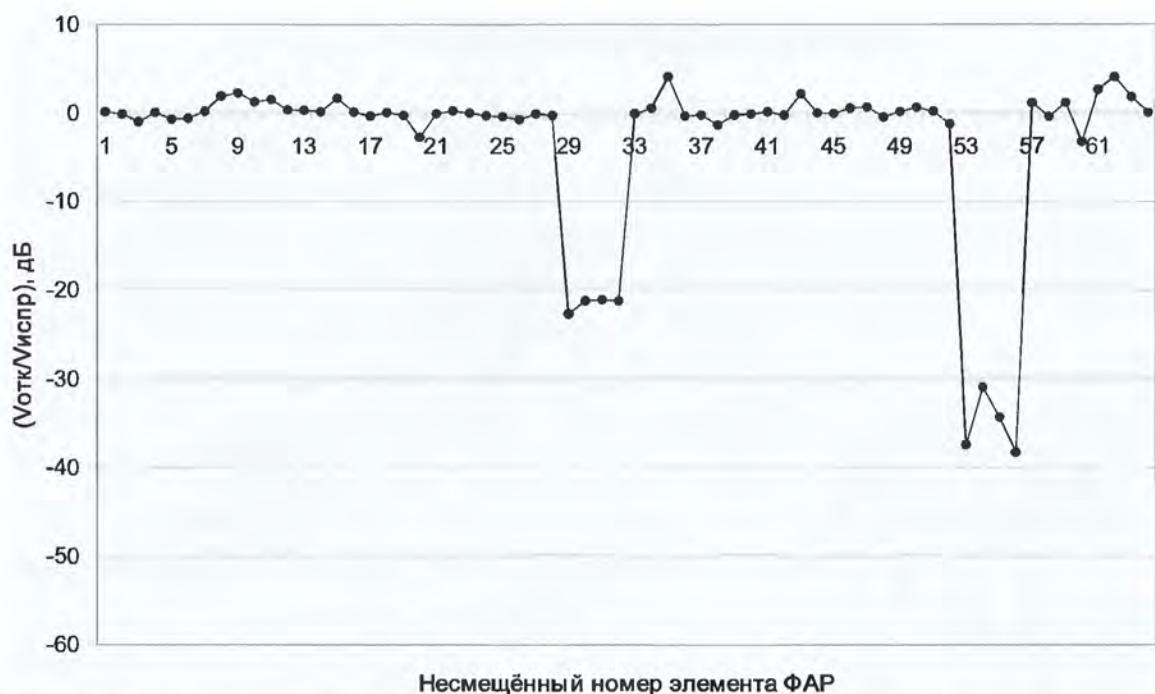


Рис. 4. Зависимость отношения амплитуд отраженных сигналов элементов, измеренных при отказах, к амплитудам, измеренным в исправном состоянии



Рис. 5. Внешний вид испытуемой АФАР

ДН БП по характеристикам, измеренным в БЭК с применением коммутационного метода

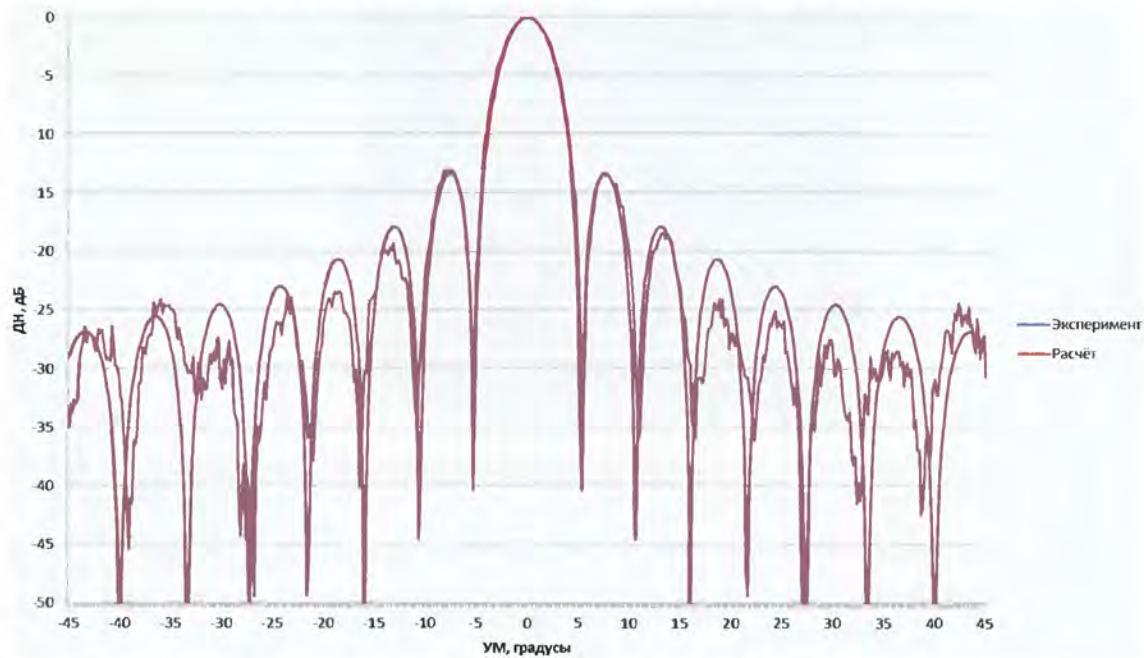


Рис. 6. Расчетная и экспериментальная ДН АФАР

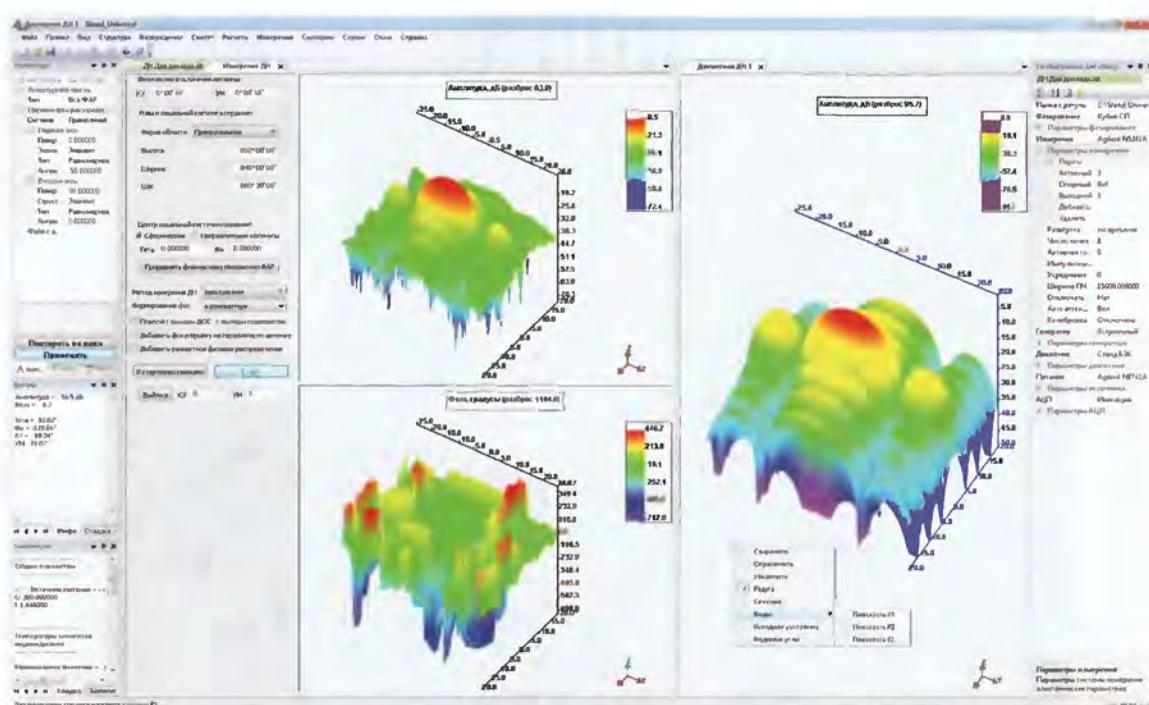


Рис. 7. Снимок ПО, выполнившего измерение и расчет трехмерной ДН АФАР

Список литературы

1. Lowenschuss O. Patent US3378846 “Method and apparatus for testing phased array antennas”, published Apr. 16, 1968, p. 8.
2. Леманский А. А., Рабинович В. С., Соколов В. Г. Восстановление распределения поля в раскрыте решетки модуляционным способом // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21. № 3. С. 616–620.
3. Коммутационный метод измерения характеристик ФАР / Г. Г. Бубнов, С. М. Никулин, Ю. Н. Серяков, С. А. Фурсов. М.: Радио и связь, 1988. 120 с.
4. Воронин Е. Н., Нечаев Е. Е., Шашенков В. Ф. Реконструктивные антенные измерения. М.: Наука. Физматлит, 1995. 352 с.
5. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
6. Балагуровский В. А., Кодратьев А. С., Сергеев Е. А., Маничев А. О. Способ определения диаграммы направленности фазированной антенной решетки: Пат. № 2,343,495 Российская Федерация. опубл. 10.01.09 г.
7. Маничев А. О., Захаров А. А. Метод многочастотного измерения параметров возбуждения элементов фазированной антенной решетки // Антенны, 2009, № 8 (147). – С. 23–32.
8. Маничев А. О., Захаров А. А. Многочастотный метод измерения амплитудно-фазового распределения фазированной антенной решетки // доклад на XX научно-технической конференции ОАО «НИИП им. Тихомирова», г. Жуковский, 10–12 марта 2010 г. Текст доклада опубликован на стр. 677–684 в книге «Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2010–2012 / под ред. Ю. И. Белого. М.: Радиотехника, 2011. – 920 с.
9. Шифрин Я. С., Лиепинь У. Р., Головин Г. А. Экспериментальная оценка и использование матрицы взаимных связей излучателей в ФАР // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 7. С. 3–9.
10. Лиепинь У. Р., Свитенко Н. И. Метод измерения диаграмм направленности излучателей в составе ФАР // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 7. С. 10–13.
11. Балагуровский В. А., Кондратьев А. С., Маничев А. О., Полищук Н. П. Расчет статистических характеристик погрешностей амплитудно-фазового распределения в многоэлементной фазированной антенной решетке // Антенны, 2008, № 2 (129). – С. 20–26.

12. Балагуровский В. А., Кондратьев А. С., Маничев А. О., Полищук Н. П. Экспериментальный метод решения внутренней прямой задачи статистической теории антенн (применительно к задаче повышения помехозащищенности антенных систем) // Юбилейная научно-техническая конференция «Морские комплексы и системы», ОАО «МНИИРЭ «Альтаир», Москва, 15–16 октября 2008 г. – С. 42–43.
13. Зайцев Н. А., Наумов С. В., Волков С. А., Кислицын В. Ю., Ивашко А. М., Киреев И. С. Оценка комплексных амплитуд возбуждения каналов фазированной антенной решетки // III научно-техническая конференция ОАО «НИЭМИ», Москва, 18–20 ноября 2008 г. – С. 13.
14. Балагуровский В. А., Маничев А. О., Кондратьев А. С., Захаров А. А. Патент РФ № 2,413,345 «Способ диагностики состояния элементов фазированной антенной решетки», опубл. 27.02.11, Бюл. № 6.
15. Manichev A.O., Balagurovskii V.A. Design of Experiments and Data Processing for Diagnostics of Phased Array Antenna Elements with the Use of Reflected Signals // Международный симпозиум “Progress in Electromagnetics Research Symposium”, Москва, 19–23 августа 2012 г.
16. Маничев А. О., Балагуровский В. А. Методы диагностики фазированной антенной решетки со взаимными связями по сигналам, отраженным от излучателей // VI Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» 19–22 ноября 2012, г. Москва, сборник докладов издан ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, С. 194–198.
17. Маничев А. О., Балагуровский В. А. Методы диагностики элементов фазированной антенной решетки по сигналам, отраженным от переходов излучатель – свободное пространство, при наличии взаимных связей элементов // Радиотехника и электроника. 2013. Том 58. № 4. С. 348–359.
18. Scharfman W.E., August G. Pattern Measurements of Phased Arrayed Antennas by Focussing into the Near Zone // “Phased Array Antennas,” Artech House, Norwood, Mass., 1972, pp. 344–349.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ АНТЕНН В БЛИЖНЕЙ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ И ДАЛЬНЕЙ ЗОНАХ

*Денисенко В. В., Елизаров С. В., Смирнов Д. С., Сусеров Ю. А.,
Тоболев А. К., Шишлов А. В.*

Введение

В ПАО «Радиофизика» на базе большой безэховой камеры (БЭК) размером 80м×30м×20м (рис. 1) реализованы рабочие места для проведения антенных измерений в дальней зоне, в зоне Френеля [1] и в ближней зоне с использованием планарного сканера (рис. 2). Измерения автоматизированы и управляются оператором из аппаратной (рис. 3). Каждый из трех методов имеет свои преимущества и свои недостатки. Наличие соответствующего измерительного оборудования и большой объем камеры позволяют, в зависимости от измеряемого объекта, выбирать тот или иной метод измерений.

В антенных измерениях, как и в любых других, вопрос точности измерений – один из главных, от которого, в конечном итоге, зависит достоверность полученных результатов.

Современные измерительные приборы позволяют свести к минимуму аппаратурные погрешности. Однако, при измерениях существует ряд факторов, приводящих к искажению результатов измерений, в частности это могут быть методические погрешности, ограничивающие точность того или иного метода.

В работах [2–3] исследованы границы применимости и погрешности метода восстановления диаграмм направленности (ДН) апертурных антенн по измерениям в зоне Френеля. Показано, что методическая погрешность измерений до уровней минус 20 дБ не превышает 0,1 дБ. Большой опыт измерений антенн в условиях БЭК подтвердил хорошую точность измерений как методом дальней зоны, так и методом зоны Френеля [3].

С появлением сканера появилась возможность определения антенных характеристик по измерениям ближнего поля. Этот метод не прямой, а экспериментально-расчетный, и на повестку дня встал вопрос оценки точности измерений данным методом [4].

Большое значение для верификации метода имеет сравнение результатов измерений одних и тех же характеристик, полученных разными методами. Такие эксперименты были проведены в ПАО «Радиофизика» при измерении ДН апертурных антенн методами дальней зоны, зоны Френеля и ближней зоны.



Рис. 1. Большая безэховая камера в ПАО «Радиофизика»



Рис. 2. Измерения в ближней зоне



Рис. 3. В аппаратной БЭК

Сравнение измерений ДН в ближней зоне с измерениями в дальней и промежуточной зоне

Измерения в ближней зоне

Имеющееся оборудование:

- планарный сканер с контроллером осей, рабочая зона 9м×6м, СКО позиционирования не более 0,15 мм (производство компании «*Orbit-FR*»);
- зонды и эталонные антенны (производство компании «*Satimo*»);
- векторный анализатор компании «*Agilent Technologies*»;
- программное обеспечение компании «Трим»;
- беспроводная камера.

Измерения в дальней зоне и в промежуточной зоне

Имеющееся оборудование:

- 4-координатное опорно-поворотное устройство: три угловые координаты с погрешностью не более 1 угл. минуты, вертикальная нагрузка до 200 кг, высота башни 6 м;
- контроллер (производство ПАО «Радиофизика»);
- эталонные антенны (производство компании «*MI Technologies*»);
- измерительная система *Agilent 85301B* на базе векторного приемника *8530A* с выносными смесителями и блоком коммутации и усиления *85309*;
- программное обеспечение (производство ПАО «Радиофизика»);
- беспроводная камера с длиной трассы до 80 м.

1. Сравнение результатов восстановления ДН по ближнему полю и по измерениям в дальней зоне.

Измеряемый объект – оффсетная зеркальная антenna *Ки*-диапазона с размером апертуры 20 длин волн, расстояние дальней зоны – 25м, поляризация линейная.

Были определены азимутальное и угломестное сечения ДН по основной поляризации и по кросс-поляризации на частоте 11 ГГц двумя методами: по измерениям ближнего поля с помощью сканера (рис. 4) и по прямым измерениям дальнего поля на расстоянии 75 м (рис. 5). Результаты сравнения представлены на рисунках 6–9.

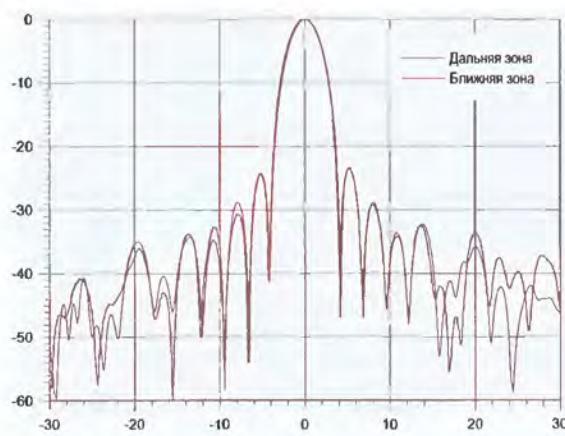


Рис. 4. Измерения в ближней зоне

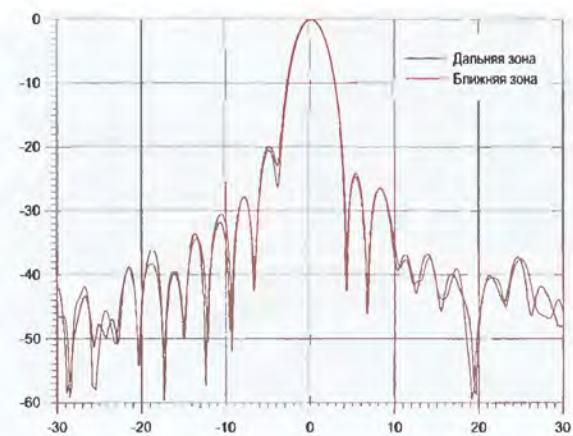


Рис. 5. Измерения в дальней зоне

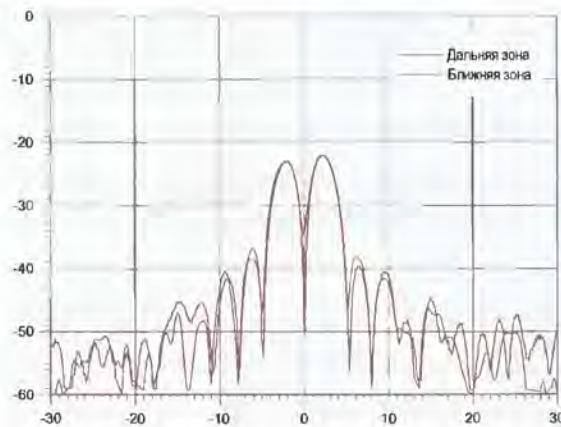
Сравнение показывает, что главный луч и ближние боковые лепестки совпадают с хорошей точностью. То же самое можно сказать и об уровнях кроссполяризации вблизи осевого направления. Различие в уровнях и структуре дальних боковых лепестков может быть связано с несколькими причинами:



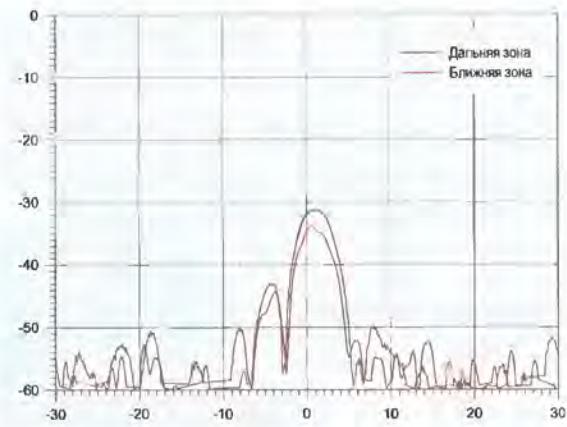
*Рис. 6. ДН по основной
поляризации, азимут*



*Рис. 7. ДН по осн. поляризации,
угол места*



*Рис. 8. ДН по кроссполяризации,
азимут*



*Рис. 9. ДН по кроссполяризации,
угол места*

- 1) Методическая погрешность при восстановлении ДН по измерениям ближнего поля.
- 2) Влияние паразитных отражений от стенок камеры при измерениях дальнего поля.
- 3) Не вполне корректный учет направленности зонда на больших углах отклонения от нормали при измерениях ближнего поля, а также реакция зонда.
- 4) Несовпадение измеряемых сечений ДН из-за погрешности установки углового положения антенны.

Последний из перечисленных факторов становится понятен при анализе структуры дальнего бокового излучения (рис. 10–11) – она имеет быстроосциллирующий характер не только в радиальных направлениях, но и в кольцевых.

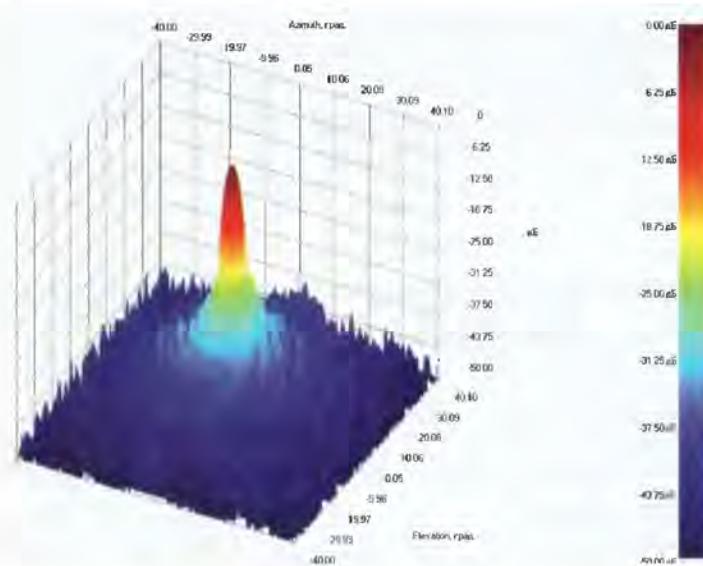


Рис. 10. Восстановленная ДН по основной поляризации

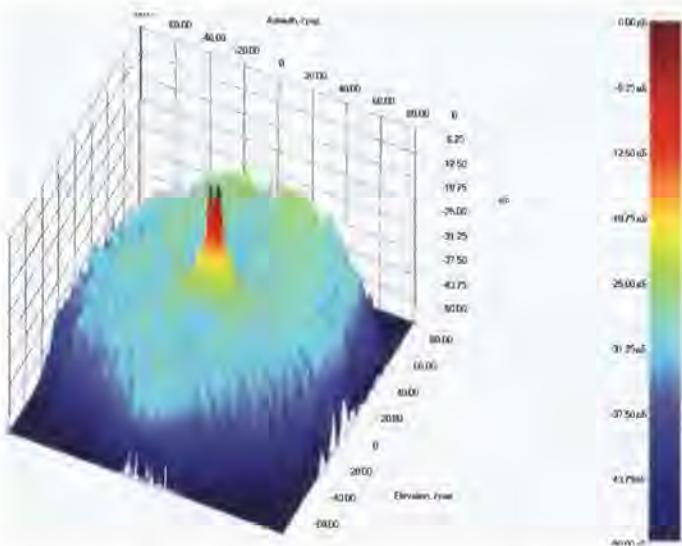


Рис. 11. Восстановленная ДН по кроссполяризации

Вопрос о том, какой из факторов вносит больший вклад в погрешность измерений, требует более детальных экспериментов. В любом случае погрешность определения ДН антенны не должна превышать величины различия результатов двух методов. Оценки погрешности определения ДН в зависимости от уровня и от сектора углов наблюдения даны в таблице 1. Полученные значения соответствуют оценкам, приведенным в [3].

Таблица 1 – Погрешность определения ДН в зависимости от уровня и от сектора углов (сравнение результатов восстановления ДН по полю в БЗ и по измерениям в дальней зоне)

Уровень ДН	Сектор углов	Погрешность
- 30 дБ	$\pm 15^\circ$	< 0,5 дБ
- 40 дБ	$\pm 30^\circ$	< 2 дБ
- 50 дБ	$\pm 60^\circ$	< 5 дБ

2. Сравнение результатов восстановления ДН по ближнему полю и по полю в зоне Френеля.

Измеряемый объект – оффсетная зеркальная антenna Ки-диапазона с размером апертуры 85 длин волн, расстояние дальней зоны – 300 м, поляризация линейная.

Были определены азимутальное и угломестное сечения ДН по основной поляризации и по кросс-поляризации на частоте 14 ГГц двумя методами: по измерениям ближнего поля с помощью сканера (рис. 126)

и по измерениям 3 азимутальных сечений промежуточного поля на расстоянии 75 м (рис. 12а).

Сравнение восстановленных сечений ДН показано на рис. 13. Оценки погрешности определения ДН в зависимости от уровня и от сектора углов наблюдения для этого случая приведены в таблице 2.

Таблица 2. Погрешность определения ДН в зависимости от уровня и от сектора углов (сравнение результатов восстановления ДН по полю в ближней зоне и в зоне Френеля)

Уровень ДН	Сектор углов	Погрешность
-35 дБ	$\pm 5^\circ$	< 1 дБ
-50 дБ	$\pm 15^\circ$	< 3 дБ
-60 дБ	$\pm 25^\circ$	< 5 дБ

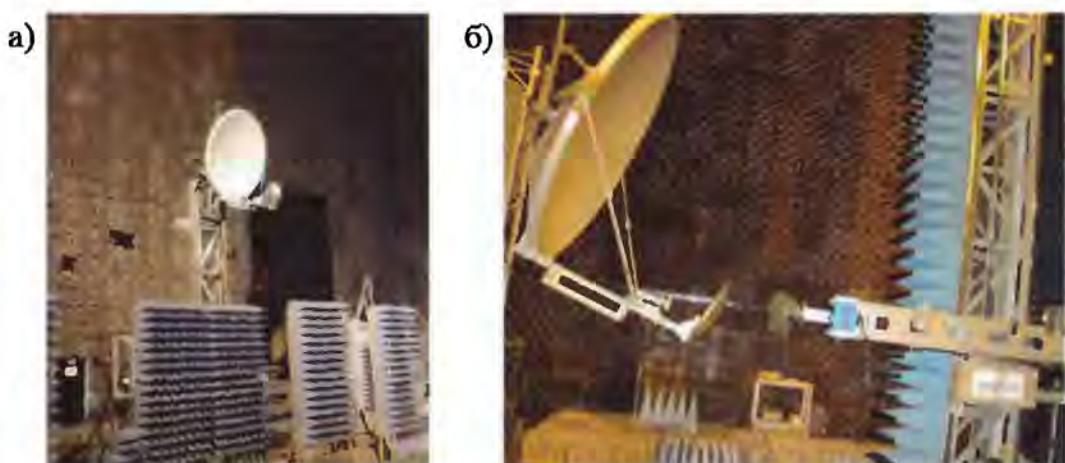


Рис. 12. Испытуемая антенна, установленная на ОПУ для измерений ДН в зоне Френеля (а), и на вертикальной опоре для измерений в ближней зоне (б).

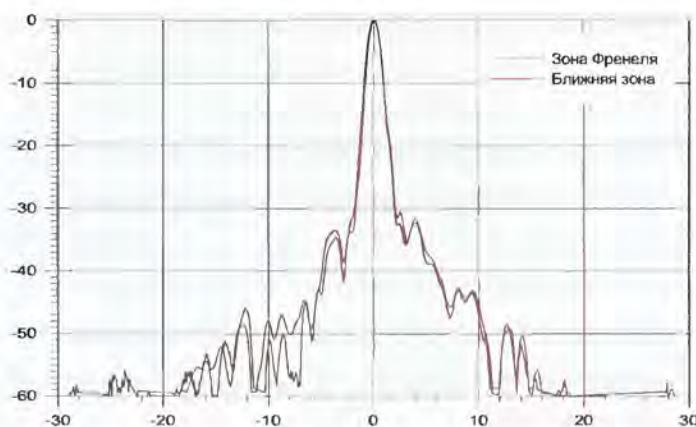


Рис. 13. Сравнение восстановленных ДН по измерениям в ближней зоне и в зоне Френеля в азимутальной плоскости

Выбор метода измерений ДН антенны

Приведенное выше сравнение результатов измерения характеристик антенн различными методами позволяют заключить, что любой из трех методов дает приемлемую для практики точность и выбор метода зависит не столько от погрешностей, сколько от удобства использования в том или ином случае.

Измерение небольших по размеру и весу антенн, для которых выполняется условие дальней зоны (менее 80 м в случае камеры в ПАО «Радиофизика») проводятся, как правило, методом дальней зоны, в этом случае объем измерений минимален и требуются только скалярные измерения.

Для измерения крупноапертурных антенн, которые можно установить на имеющихся поворотных устройствах, целесообразно использовать методику измерений в зоне Френеля как более продуктивную по временным затратам по сравнению с измерениями ближнего поля. Таким способом проводились измерения зеркальных антенн с диаметром апертуры до 5 м (рис. 14).



*Рис. 14. Измерение антенны
С-диапазона размером 5 м
методом зоны Френеля*



*Рис. 15. Измерение решетки
Ки-диапазона размером
14 м в БЭК методом
зоны Френеля*

В качестве экзотического примера можно привести измерение волноводно-щелевой антенны Ки-диапазона размером $14\text{m} \times 0,4\text{m}$, имеющей расстояние дальней зоны около 15 км! Такую antennу удалось измерить по методике измерений в зоне Френеля на трассе длиной 75 м (рис. 15). В этом случае не подходит ни прямой метод измерений дальнего поля, ни измерения с имеющимся сканером $9\text{m} \times 6\text{m}$.

Измерения крупноапертурных ФАР, имеющих большую массу, целесообразно проводить в ближней зоне с использованием сканера (рис. 2), поскольку в этом случае массивная измеряемая антenna неподвижна, а перемещается только зонд сканера. Такой тип объектов при имеющихся ОПУ невозможно измерить ни методом дальней зоны, ни методом зоны Френеля.

Измерения в ближней и промежуточной зонах, включающие измерения фазы, позволяют не только измерять характеристики, но и диагностировать неисправности каналов ФАР и деформации зеркальных антенн.

К недостаткам измерений с помощью планарного сканера следует отнести ограничения при измерениях слабонаправленных антенн, а также увеличение погрешности измерений дальних боковых лепестков ДН (более 60 градусов от оси) в случае направленных апертурных антенн.

Заключение

Приведены результаты сравнения измерений ДН одних и тех же антенн в условиях большой безэховой камеры тремя методами: 1) измерение поля в дальней зоне; 2) восстановление по измерениям в зоне Френеля; 3) восстановление по измерениям в ближней зоне.

Сравнение результатов измерений разными методами позволило оценить погрешность определения ДН при разных уровнях сигнала и секторе углов наблюдения, исходя из предположения, что погрешность не должна превышать разницы результатов.

Получено приемлемое для практики совпадение результатов, что говорит о возможности использования любого из трех методов. В зависимости от специфики измеряемого объекта каждый раз должен быть сделан осознанный выбор оптимального метода. Крупноапертурные ФАР, имеющие большую массу, в условиях БЭК могут быть испытаны только с помощью сканера.

Даны примеры предпочтительного использования каждого из трех методов для различных объектов, измеренных в безэховой камере ПАО «Радиофизика» в последние годы.

Литература

1. Виленко И. Л., Медухин А. А., Сусеров Ю. А., Тоболев А. К., Шишлов А. В. Восстановление диаграммы направленности антенны по измерениям в зоне Френеля на стенде для измерений в дальней зоне. – М.: Антенны, 2005, № 1 (92), С. 46–52.
2. Кривошеев Ю. В., Шишлов А. В. Развитие метода восстановления диаграмм направленности антенн по измерениям на разреженной сетке углов в зоне Френеля. Радиотехника. – 2012. – № 11. – С. 47–53.
3. Шишлов А. В., Виленко И. Л., Кривошеев Ю. В., Сусеров Ю. А., Тоболев А. К. Измерение характеристик антенн в зоне Френеля на разреженной сетке углов. – IX Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике», 17–19 июня 2014 г.
4. Денисенко В. В., Елизаров С. В., Тоболев А. К., Шабанов Р. И. Метрологическое обеспечение измерений антенно-фидерных устройств в ОАО «Радиофизика». – IX Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике», 17–19 июня 2014 г.

ИНЖЕНЕРНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФАР ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Еникеев В. М.

Несмотря на достаточную теоретическую проработку вопросов синтезирования диаграмм направленности (ДН) ФАР по результатам измерений амплитудно-фазового распределения электромагнитного поля в ближней зоне, практическая реализация такого подхода наталкивается на ряд инженерных проблем, связанных с конкретным техническим исполнением и интерпретацией получаемых результатов.

В АО «ЗРТО» был разработан и создан антенный измерительный стенд для синтезирования ДН больших антенных устройств, в состав которого входят:



- планарный сканер с рабочей зоной 10×10 м с набором зондов и эталонных антенн на диапазон от 0,5 до 12 ГГц;
- подъемно-поворотное устройство с устанавливаемыми на него ФАР и облучателем;
- подсистема высокоточных геометрических измерений на основе лазерной дальномерной станции;
- программное обеспечение сбора и обработки данных, визуализации и каталогизации результатов измерений по основным параметрам исследуемой антенны (параметры ДН, коэффициент усиления, поляризационные характеристики);
- экран с радиопоглощающим покрытием;

Общая идея измерений состоит в том, что в плоскости, параллельной раскрыву ФАР, по сетке с постоянным шагом по вертикали и горизонтали измеряется амплитудно-фазовое распределение поля. При исследовании симметричных систем ФАР измерение амплитудно-фазового распределения может производиться как при работе ФАР на прием (излучателем радиосигнала является зонд сканера), так и при подаче радиосигнала на входы ФАР и облучателя. В случае, когда излучателем является зонд сканера, возможно измерение амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве ФАР от шести фланцев облучателя за один проход сканера. По совокупности результатов измерений строится ДН в трехмерном виде и ее сечения, а также рассчитываются поляризационные характеристики и коэффициент усиления исследуемой антенной системы.

При этом основными инженерными проблемами стали:

- высокоточные геометрические измерения взаимного расположения плоскостей сканера и ФАР, оси складывания ФАР;
- выставление ФАР в нужное положение и на нужной высоте;
- разработка программного обеспечения для обеспечения получения расчетных характеристик: уровень фона, углы расположения дифракционных лепестков, крутизна и нелинейность пеленгационной характеристики;
- разработка методик измерения параметров ФАР, обеспечивающих единство результатов измерений, корректировка технических условий;
- сравнение с результатами, полученными ранее путем измерений ДН в дальней зоне.

В 2014 году в АО «ЗРТО» произведены предварительные измерения параметров устройства ВА11. Сравнительный анализ показал, что в основном все характеристики, измеренные на стенде, соответствуют техническим условиям и для этапа освоения незначительно отличаются от параметров устройства, измеренных методом дальней зоны. Так, например, в среднем коэффициент усиления отличается не более чем на 10 %, ширина ДН – не более чем на 7 %, коэффициент эллиптичности – менее чем на 20 %, уровень боковых лепестков – не более чем на 4 дБ.

Совместно с ГСКБ «Алмаз-Антей» проработана методика установки антенных устройств перед сканером, разработан универсальный стенд управления фазированием антенных устройств ФА и НА.

В настоящее время работы сдерживаются проблемой обеспечения производства антенн блоками 112Н.

РЕКОНСТРУКТИВНЫЕ (БЛИЖНЕПОЛЬНЫЕ) АНТЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ФИЛИАЛЕ № 1 ОАО «КОНЦЕРН ПВО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»

Исаков М.А., Лисинский В.П.

Рассмотрен автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс (АИВК) для антенных измерений ТСМА 0,15–12,0 Б3 083, создаваемый Концерном в Филиале № 1 (г. Нижний Новгород). Приведены его технические и метрологические характеристики, проанализированы достоинства и недостатки в сравнении с аналогичными стендами. Обсуждены перспективы ближнепольных измерений как основного метода при проведении приемо-сдаточных испытаний антенных систем радиоэлектронных средств воздушно-космической обороны.

Ключевые слова: антенные измерения, ближняя зона, амплифазометрический метод, планарный сканер.

1. Внешняя задача теории антенн: измерения в дальнем и ближнем поле

Аналогично различию между волновым и геометрическим описаниям электромагнитных волн в оптическом диапазоне спектра в антенных измерениях пространство вне источника излучения принято делить на ближнюю (Френеля) и дальнюю (Фраунгофера) зоны. В дальней зоне вектор Пойtingа направлен радиально, угловое распределение поля по причине независимости от расстояния характеризуемо диаграммами направленности. По ряду причин традиционные методы антенных измерений в дальнем поле в последнее время вытесняются из мировой практики реконструктивными измерениями, базирующимися на возможности вычисления поля в дальней зоне по полю, измеренному в ближней зоне (*NF2FF Transformation*) [1,2]. Измерения в ближней зоне обычно выполняются методами плоского, цилиндрического или сферического сканирования, что обусловлено как простотой реализации соответствующих кинематических схем сканирования, так и разработанностью методов восстановления поля в дальней зоне по измерениям геометрии поля в ближней зоне на этих поверхностях. При измерениях на плоскости составляющие поля антенны в дальней зоне E_α и E_β (α – азимутальный угол, β – угол места) при этом представимы в виде линейной комбинации преобразований Фурье от амплитуд и фазы компонент E_x , E_y тангенциальной

составляющей вектора E на этой плоскости, что требует высокостабильного опорного сигнала и фазостабильных СВЧ либо оптических трактов передачи сигналов. ГОСТ 8.309–78 «Методика выполнения измерений для определения параметров антенн по полю в раскрыве» демонстрирует, что в России идея ближнепольных измерений не получила должного развития, поскольку более новых отечественных стандартов в этой области не появлялось (авторам известны лишь ОСТы 4Г0.209.204–77 и 4Г0.209.213–84), в то время как международные стандарты в этой области постоянно обновляются (напр., *IEEE1720:2012 «IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements»*).

Поскольку тактико-технические характеристики радиоэлектронных средств воздушно-космической обороны в значительной мере определяются характеристиками их антенных систем, вопросы технической реализации и метрологической корректности организации измерения характеристик антенн в ближней зоне приобрели фундаментальное значение для Концерна. При измерениях в ближней зоне появляется ряд технических преимуществ. Например, гарантируется выполнение требований ТЗИ и ПД ИТР, измерение диаграмм направленности реализуется не только в главных сечениях, повышается метрологическая достоверность измерений, качественно возрастают возможности для настройки активных фазированных решеток и дефектоскопии их приемо-передающих модулей, за счет возможности характеризации локальных особенностей в структуре излучаемого электромагнитного поля, причины которых невозможно определить по интегральным результатам измерений в дальней зоне. Потенциально представляются более значимыми фундаментальные преимущества, выражющиеся в том, что хотя измерения в дальней зоне позволяют решать большинство представляющих практический интерес задач, некоторую информацию получить из измерений в дальней зоне нельзя принципиально: поскольку в дальней зоне поле не имеет радиальных компонент, часть информации об источнике излучения оказывается утраченной, что может стать критически важным для работ с перспективными изделиями в ближайшие десятилетия.

АИВК необходим для настройки и испытаний на соответствие требованиям технических условий различных антенных систем: как радиолокаторов обнаружения, так и многофункциональных РЛС сопровождения и наведения, реализованных на основе как пассивных, так и активных антенных решеток. В мире существует ограниченное количество компаний, способных решить столь сложную задачу. Наиболее заметными вне России являются *Nearfield Systems, Inc.* (США), *Microwave Instruments Technologies* (США) и группа компаний *Microwave Vision Group*

(*MVG*), в состав которой входят, в частности, *ORBIT/FR* (США/Израиль), *SATIMO* (Франция), и др. В бывшем СССР эти технологии также развивались, как неотъемлемая часть антенной тематики. Так, десятки АИВК поставили заказчикам ВНИИРИ (Армения) или НИИ «Квант» (Украина); ряд предприятий разрабатывали и разрабатывают аналогичные АИВК для собственного пользования своими силами (например: ОАО «НПО «ЛЭМЗ», или ФГУП «ФНПЦ НИИС им. Ю. Е. Седакова»), однако к настоящему моменту в России существует только одна компания, специализирующаяся единственно на тематике ближнепольных антенных измерений, и являющаяся монополистом на рынке АИВК на современном техническом уровне: это ООО «НПП «ТРИМ СПП Измерительные системы» (г. Санкт-Петербург).

2. Геометрия АИВК

АИВК базируется на фундаментной плите размерами $42900 \times 34000 \times 500$ мм³, отрезанной от строительных конструкций корпуса. В фундаментной плите выполнен «приямок» размерами $9000 \times 2000 \times 800$ мм³ для размещения системы лифт-пол, необходимой для функционирования автоматизированных экранированных ворот. АИВК состоит из безэховой электромагнитной камеры (БЭК) и прецизионной ближнепольной измерительной системы.

2.1. Безэховая электромагнитная камера

БЭК реализована на основе заземленной экранированной камеры (в комплекте с системами освещения, пожарной сигнализации, видеонаблюдения, и др.) с эффективностью экранирования в диапазоне частот 0,1–37,5 ГГц в соответствии с классом 1 по ГОСТ Р 50414–92 (для ввода цепей электропитания и сигнальных цепей, а также организации системы вентиляции, использованы специализированные помехоподавляющие фильтры). Экранированная камера сборная, каркасного типа, производства компании *Will Technology Co., Ltd.* (Республика Корея); несущий каркас внешними размерами $42900 \times 34000 \times 16900$ (высота) мм³ выполнен из стальных профилей. В качестве материала для экранирующей оболочки используются стальные сплошные щиты из оцинкованной стали толщиной 2 мм, имеющие двойную кромку с четырех сторон; они скрепляются между собой болтовыми соединениями с помощью сетки с мелкой ячейкой из стальной проволоки с медным покрытием, чтобы обеспечить электрический контакт и оптимальные радиочастотные характеристики уплотнения

(герметичность стыков контролируется индукционным методом поверхностных токов). Внешние размеры камеры по экранирующей оболочке: $41700 \times 32800 \times 16400$ (высота) мм³. Предусмотрены мероприятия по антикоррозийной защите конструкций экранированного помещения. В БЭК предусмотрены сдвижные (вверх) экранированные ворота. Размеры экранированных ворот 7000×6000 (высота) мм². Радиогерметичность обеспечивается контактным механизмом (встроенным по периметру в раму ворот), изготовленным из оцинкованной стали и содержащим комплект контактных бериллиево-медных ригелей. Экранированные ворота размещаются на системе лифт-пол, обеспечивающей автоматизацию их открытия/закрытия и поджима, и рассчитаны на установку на их внутреннюю поверхность радиопоглощающего материала. В непосредственной близости создана операторская размерами $4000 \times 3000 \times 3000$ (высота) мм³. На основе экранированной камеры в составе АИВК реализуется БЭК. Путем установки несъемных панелей радиопоглощающего материала на стены, автоматизированные ворота, потолок организуется полубезэховая камера, но также предусмотрена оперативная установка вручную поглотителей электромагнитного излучения на полу, что позволит превращать камеру в полностью безэховую, моделирующую свободное (удовлетворяющее принципу излучения) пространство, соответствующее по своим характеристикам испытательной площадке на открытом воздухе. Используется радиопоглощающий материал (РПМ) *Eccosorb™* фирмы *Emerson Anechoic Chambers* (Бельгия), в частности типов *VHP-26-NRL*, *VHP-36-NRL*, *VHP-18-NRL*, *HHP-60-NRL*, *FS-100-NRL* (РПМ на стене за сканером будет более высокого уровня поглощения, чем на остальной поверхности). Следует заметить, что характеристики в спецификациях от *Emerson Anechoic Chambers* заявлены как типичные значения, а не как гарантированные, и это является стандартным трюком зарубежных производителей. Гарантийные значения заметно хуже, и, кроме того, речь идет об идеализированной ситуации нормального падения электромагнитного излучения на РПМ, при отклонении же от нормали характеристики не нормируются (известно, что быстро ухудшаются).

Размеры безэховой зоны достаточны для испытаний антенных систем изделий. Уровень и величина зоны радиобезэховости будут подтверждаться при сдаче АИВК в эксплуатацию. Исходя из свойств РПМ максимальная средняя плотность потока мощности при измерениях ограничена величиной 1,5 кВт/м². Оборудование, размещенное в АИВК, также будет укрываться щитами с РПМ для уменьшения отражений. Система кондиционирования БЭК обеспечивает при проведении всех видов испытаний температурный режим: $22 \pm 2,5$ °С, кратность воздухообмена может достигать шести обменов в час, для чего предусмотрены

тридцать приточных вентиляционных отверстий $600 \times 600 \text{ мм}^2$ ячеистого типа на потолке камеры и тридцать вытяжных вентиляционных отверстий $600 \times 600 \text{ мм}^2$ ячеистого типа на стенах камеры.

Также в БЭК предусмотрены системы основного и аварийного освещения с использованием светодиодных светильников на потолке, системы сигнализации о возгорании, пожаротушения, видеонаблюдения, подвода необходимых питающих напряжений; операторская обеспечена телефоном, локальной сетью.

2.2. Прецизионная ближнепольная измерительная система

Создаваемая прецизионная ближнепольная измерительная система рассчитана на реализацию измерений как в режиме передачи, так и в режиме приема (слабонаправленная антenna-зонд, механически перемещаемая сканером вблизи апертуры испытуемой антенны является в первом случае приемником, во втором передатчиком). При измерениях пассивных ФАР возможно работать в любом режиме (благодаря принципу взаимности). В настоящее время доминирующее положение в перспективных изделиях получают активные ФАР, являющиеся антennами с невзаимными элементами, для которых необходимо проводить измерения раздельно.

Благодаря заменам непрерывных функций распределений компонент электромагнитного поля матрицами отсчетов в конечном числе узлов координатной сетки (по умолчанию эквидистантной) и двумерного интегрального преобразования Фурье двумерным дискретным преобразованием Фурье, проводится реконструкция геометрии поля в дальнюю зону, и вычисляются радиотехнические характеристики испытуемой антенны (диаграммы направленности по амплитуде и по мощности, их произвольные сечения, коэффициенты усиления, и др.).

Плоские сканеры обычно создаются вертикальными либо (реже) горизонтальными. Примером сопоставимого по масштабам вертикального планарного сканера ближнего поля является сканер *NSI-400V* с областью сканирования $33000 \times 16000 \text{ мм}^2$ разработки *Nearfield Systems, Inc.* Качественным отличием 5-координатного прецизионного сканера *AL-4954-1-32m-13m* (изготовлен в сотрудничестве с предприятием компании *Orbit/FR* в Израиле) АИВК Филиала № 1 от традиционных Т-образных планарных сканеров является возможность динамического наклона плоскости сканирования (Рис. 1) – такая не имеющая аналогов в мире на установках сопоставимого масштаба схема была предложена ТРИМ с учетом требований ТЗ в целях наилучшего согласия техниче-

ской и экономической целесообразностей. Масса сканера составляет около 50 тонн, частотный диапазон 0,3–12,0 ГГц, размеры области сканирования составляют до 32000×13000 мм².

Для восстановления поля в дальней зоне с приемлемой погрешностью, для плоской поверхности сканирования необходимо выполнение условия [3]:

$$L \geq D + 2 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \Theta + o(\sqrt{\lambda H}), \quad (3)$$

где L – минимально необходимый размер плоскости сканирования, D – максимальный размер испытуемой антенны (в том же измерении), H – расстояние между антенной и плоскостью сканирования, λ – длина волны излучения, Θ – величина границы углового сектора $[-\Theta, +\Theta]$, в котором необходимо восстановить поле в дальней зоне. В случае одного из изделий облучатели расположены на выносных конструкциях длиной более 5 метров, что не позволяет приблизить плоскость антенны к плоскости сканирования ближе величины $H \approx 6$ м, что и обусловило размеры рабочей области сканера.

Сканер AL-4954-1-32м-13м обеспечивает для сменных СШП антенн-зондов не менее 5 степеней свободы, а именно:

- линейное перемещение антены-зонда по трем взаимно ортогональным направлениям: горизонтали (ось X), вертикали (ось Y), и по нормали к плоскости сканирования (ось Z). Запас хода сканера по координате Z согласован на уровне ± 250 мм;
- изменение угла наклона оси Y в диапазоне 0 … 32 угловых градуса относительно вертикали, с точностью ± 3 угловых минуты;
- угловое перемещение антены-зонда по поляризации в диапазоне не менее ± 90 угловых градусов с погрешностью не более ± 3 угловых минут;

Погрешности позиционирования зонда по координатам X , Y , Z (согласно ТЗ) не должны превышать (СКО) следующих величин:

- в полной рабочей зоне при вертикальной оси Y : по оси X – 2,0 мм, по оси Y – 0,6 мм, по оси Z – 0,12 мм;
- в полной рабочей зоне при наклоне оси Y 32° : по оси X – 4,0 мм, по оси Y – 1,2 мм, по оси Z – 0,12 мм;
- в рабочей зоне 6×6 м², при вертикальной оси Y : по оси X – 0,25 мм, по оси Y – 0,25 мм, по оси Z – 0,12 мм;
- в рабочей зоне 6×6 м², при наклоне оси Y 32° : по оси X – 0,3 мм, по оси Y – 0,25 мм, по оси Z – 0,12 мм.

Допустимая инструментальная погрешность измерений положения зонда по осям X , Y , Z не должна превышать $\pm 0,15$ мм.

Плоскость, под которой подразумевается допустимое среднее квадратичное отклонение от среднего по координате Z при осуществлении сканирования антенной-зондом в плоскости XY , не более (согласно ТЗ):

- в полной рабочей зоне при вертикальном положении оси Y : 1,2 мм;
- в полной рабочей зоне при наклоне оси Y на 32 градуса: 2,0 мм;
- в рабочей зоне $6 \times 6 \text{ м}^2$ при вертикальном положении оси Y : 0,6 мм;
- в рабочей зоне $6 \times 6 \text{ м}^2$ при наклоне оси Y на 32 градуса: 0,75 мм.

Минимальные шаги Δx и Δy между дискретными позициями зонда при сканировании ближнего поля с максимально допустимым разрешением: по X не более 1 см (разрешение не менее 100 позиций/метр), по Y – не более 1 см (разрешение не менее 100 позиций/метр). Вопрос минимально допустимого шага дискретизации обсужден в [3], обычным требованием является $\Delta x \leq \lambda/2$, на практике обычно шаг зонда делается несколько меньше (ближе к $\lambda/3$).

В связи с большими размерами плоскости сканирования и известными требованиями к плоскостности (например: согласно ОСТ 4Г0.209.204–77 систематическое и случайные отклонения зонда от измерительной плоскости должны быть в пределах $\pm 0,1\lambda$ и $\pm 0,01\lambda$ соответственно, а погрешность определения координат зонда в измерительной плоскости должна быть в пределах $\pm 0,03\lambda$) перед поставщиком был поставлен вопрос об обязательности использования лазерной системы определения истинного местоположения антены-зонда по всем трем координатам для достижения возможности предобработки данных (аппроксимации реально измеренного массива данных в узлы идеальной сетки с использованием информации об истинном положении зонда относительно идеальной поверхности, которую он должен был описать) перед подачей их на вход алгоритма трансформации из ближнего поля в дальнее. Такая система определения местоположения зонда поставляется в составе АИВК.

Необходимое программное обеспечение разработано поставщиком. Из прямых натурных измерений в ближней зоне на поверхности сканирования доступны для анализа (визуализируются, экспортируются):

- амплитудные распределения ближнего поля;
- фазовые распределения ближнего поля.

Из реконструированной геометрии поля в дальней зоне нетрудно вычислить и визуализировать радиотехнические характеристики испытуемой антенны, а именно зависимости в дальней зоне от угловых переменных сферической системы координат, в частности:

- амплитуд (амплитудные диаграммы направленности);

- фаз (фазовые диаграммы направленности),
- плотностей потока мощности (диаграммы направленности по мощности);
- поляризаций (поляризационные диаграммы направленности).

Реализуются возможности просмотра указанных диаграмм направленности при их нормировании и по напряженности поля и по мощности в полярной и в декартовой системах координат (в линейном и в логарифмическом масштабах), а также их произвольных сечений, из которых определяются:

- ширины диаграмм направленности на произвольных (задаваемых) уровнях;
- направления главных максимумов диаграмм направленности;
- уровни и направления боковых лепестков диаграмм направленности;
- координаты фазовых центров испытуемых антенных систем в случае их существования и точечности (или центров излучения, относительно которых эквифазные поверхности в заданном угловом секторе пространства менее всего отличны от сфер);
- коэффициенты направленного действия испытуемых антенных систем в произвольных направлениях (не только в направлении главного максимума амплитудных диаграмм направленности);
- коэффициенты усиления испытуемых антенных систем в произвольных направлениях (не только в направлении главного максимума амплитудных диаграмм направленности).

Важным является то, что в ТЗ реализуется требование возможности экспорта результатов измерений ближнего поля в текстовые файлы, что позволит проводить преобразования и анализ во внешних математических пакетах.

Комплект управляющего и обрабатывающего оборудования в составе АИВК включает (стойки для оборудования, принтеры, источники бесперебойного питания, промышленная мебель и другие малозначимые компоненты не перечислены):

- автоматизированное рабочее место оператора, включая персональный компьютер с специализированным программным обеспечением управления сбором и обработкой данных;
- векторный анализатор цепей R&S ZVA-24 с необходимыми опциями;
- стробоскопический осциллограф TMR8112 диапазона частот 0–12 ГГц;
- генератор сигналов R&S SMF-100A с необходимыми опциями;
- генератор импульсов TMG020020VN01;

– комплект антенн-зондов (ТМАЗ 1–2 И для диапазона частот 1–2 ГГц; ТМАЗ 2–4 И для диапазона частот 2–4 ГГц; ТМАЗ 4–8 И для диапазона частот 4–8 ГГц; ТМАЗ 8–12 И для диапазона частот 8–12 ГГц).

Метрологическая аттестация АИВК на возможность сдачи изделий Представителю Заказчика во всех режимах, прописанных в ТУ, есть самостоятельная большая научно-техническая работа. Основные источники погрешностей при реконструктивных измерениях рассмотрены в [4]. Вклад вносят погрешности ограничения (область измерения имеет конечные размеры и незамкнута); погрешности дискретизации (получаемые функции, определенные в дискретных точках, не могут не отличаться от непрерывных распределений); погрешности измерения ближнего поля (неустойчивость генератора опорного сигнала, флюктуации коэффициентов передачи в соединительных трактах, среднеквадратичное отклонение зонда по нормали от плоскости измерений, погрешности позиционирования зонда по горизонтали и вертикали). Поскольку диаграмма направленности зондовой антенны неизотропна, измерения в различных точках плоскости сканирования происходят при неэквивалентных условиях, что есть проявление общего принципа теории измерений: результат измерения есть суперпозиция (конволюция) функции объекта с передаточной функцией измерительного прибора, из-за чего необходима коррекция конволовационных артефактов (и даже после ее проведения неизбежны незначительные различия результатов реконструкции поля из измерений на плоскости, на цилиндре и на сфере для одной и той же антенны в одном режиме работы).

В соответствии с условиями договора АИВК поставляется как единое средство измерений, требующее утверждения типа (внесения в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений). Согласно ТЗ, АИВК должен обеспечивать следующие инструментальные погрешности измерений амплитудных и фазовых диаграмм направленности (АДН и ФДН), коэффициентов усиления и направленного действия (КУ и КНД):

- АДН до минус 20 дБ: $\pm 0,3$ дБ; АДН до минус 30 дБ: $\pm 0,5$ дБ; АДН до минус 60 дБ: ± 3 дБ;
- ФДН при АДН до минус 20 дБ: $\pm 2,0$ угл. град.; ФДН при АДН до минус 30 дБ: $\pm 3,0$ угл. град.; ФДН при уровнях АДН до минус 60 дБ: $\pm 11,0$ угл. град.;
- КУ: не хуже $\pm 0,5$ дБ; КНД: не хуже $\pm 0,5$ дБ.

Реальные полные предельные значения инструментальных погрешностей определяются на этапе испытаний АИВК для целей утверждения типа средства измерения и первичной поверки (силами ФГУП «ВНИИФТРИ»).

3. Ход реализации проекта, вопросы приемки АИВК Филиалом № 1

С целью перехода от прописанных в ТУ на изделия методов измерения характеристик антенн в дальней зоне к ближнепольным методам, специалистами Филиала № 1 в 2012–2013 гг. было разработано техническое задание на поставку АИВК для организации измерений характеристик антенных систем изделий в целях контроля соответствия требованиям, предъявляемых ТУ на изделия.

ОАО «Концерн ПВО «Алмаз – Антей» и ООО «ТРИМ ССП Измерительные системы» подписали договор о создании АИВК (в течение 2 лет с подписания договора) в мае 2013 г. Акт приема-передачи фундаментной плиты под монтаж АИВК был подписан в сентябре 2014 г. По состоянию на 05.2015 монтаж экранированной камеры завершен, необходимый радиопоглощающий материал, сканер ближнепольной измерительной системы, радиоизмерительное оборудование доставлены в Филиал № 1, начаты работы по монтажу.

После утверждения типа и первичной поверки средства измерения необходимо реализовать выполнение требований ПД ИТР и технической защиты информации (ТЗИ), в том числе спецпроверку и аттестацию аппаратуры из состава АИВК. Для введения АИВК в эксплуатацию, необходимо по каждому из изделий, планирующихся к испытаниям в АИВК провести большой объем работ. Необходимо согласовать с разработчиками изделий технический облик измерительного стенда, включая: устройство позиционирования испытуемой антенны относительно сканера ближнепольной измерительной системы (антенные системы изделий будут размещаться в АИВК как на специальных технологических основаниях, так и в составе изделий, при помощи роботизированных транспортеров) и интерфейс взаимодействия между испытуемой антенной и электроникой из состава АИВК (дополнительная стендовая электроника и согласующее программное обеспечение), разработать и изготовить необходимые элементы измерительного стенда, разработать методики настройки и измерений характеристик антennы, проработать вопросы оптимизации (ускорения) процесса измерения (реализацию измерений на различных частотах и в разных режимах работы антennы при одном сканировании ближнего поля, с целью минимизировать количество сканирований, необходимых для выполнения объема измерений, требуемого ТУ), отработать на практике (и уточнить на основе опыта практической реализации) разработанные методики настройки и измерения на серийных образцах изделий, провести первичную аттестацию измери-

тельного стенда в соответствии с ГОСТ Р 8.568–97, а также аттестацию методик измерений (установление пределов погрешностей измерения нормируемых характеристик) силами ФГУП «ВНИИФТРИ» или ФБУ «ГНМЦ МО РФ».

После проведения указанных работ и демонстрации поставщиком реализуемости разработанных (совместно Филиалом № 1, ООО «ТРИМ СШП Измерительные системы» и разработчиками изделий при участии ФГУП «ВНИИФТРИ») методик измерения будет подписан акт приемки АИВК, и во всю полноту встанет вопрос о внесении дополнений в ТУ разработчиками изделий, что разрешило бы использовать АИВК как средство для проведения ПСИ вместо методов дальней зоны. Для этого потребуется некоторая статистика. Так, один из разработчиков изделий в предварительных консультациях выразил готовность внести дополнения в ТУ после результатов измерений по разработанным методикам 3–4 экземпляров антенной системы.

Заключение

Ближнепольные методы измерений активно развиваются, в частности, в направлении создания теории бесфазовых (Phaseless) измерений [5], как расширения описанного амплитудно-фазометрического метода, в том числе силами ООО «ТРИМ СШП Измерительные системы» [6], поскольку по мере развития антенной техники в сторону сотен ГГц и (в перспективе) единиц ТГц трудности измерения фаз быстро возрастают. Актуальна задача восстановления поля на апертуре (для дефектоскопии элементов ФАР).

С учетом сложности удовлетворения быстро ужесточающихся требований к ТТХ перспективных изделий необходимо использовать создаваемый уникальный стенд и для исследовательских работ, в том числе привлекая гранты созданного (174-ФЗ от 16.10.2012 г.) Фонда перспективных исследований РФ. Перспективны: с фундаментальной точки зрения – совершенствование методов бесфазовых ближнепольных измерений; с технической точки зрения – разработка алгоритмов амплитудно-фазовой компенсации в реальном времени некорректно работающих фазовращателей ПФАР или приемо-передающих модулей АФАР работающими штатно.

Литература

1. Бахрах Л. Д. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Л. Д. Бахрах, С. Д. Кременецкий, А. Н. Курочкин, В. А. Усин, Я. С. Шифрин // Л.: Наука, 1985. 272 с.
2. *Parini C. Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements* / C. Parini, S. Gregson, J. McCormick, and D. Janse van Rensburg // The Institution of Engineering & Technology, London, 2015. 784 p.
3. Захарьев Л. Н. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л. Н. Захарьев, А. А. Леманский, В. И. Турчин и др.; под ред. Н. М. Цейтлина // М.: Радио и связь, 1985. 368 с.
4. *Newell A. C. Error Analysis Techniques for Planar Near-Field Measurements* // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988. V. 36, No. 6. P. 754–768.
5. *Razavi S. F. Planar Near-Field Phaseless Measurement Techniques for Antenna Characterizations and Diagnostics* // Umi Dissertation Publishing, 2011. 208 p.
6. Ю. Н. Калинин Измерение диаграмм направленности антенн в планарном сканере без измерения фазы // Антенны, 2015. № 1. С. 61–68.

**ГОСТ 8.309-78 ГСИ.
АНТЕННЫ ОСТРОНАПРАВЛЕННЫЕ.
МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ПО ПОЛЮ В РАСКРЫВЕ**

Государственная система обеспечения единства измерений

АНТЕННЫ ОСТРОНАПРАВЛЕННЫЕ

Методика выполнения измерений для определения
параметров по полю в раскрыве

State system for ensuring the uniformity of measurements. Highly
directional antennas. The technique of measurements for determining
parameters by the aperture field

Дата введения 1979-07-01

РАЗРАБОТАН Государственным комитетом стандартов Совета
Министров СССР (Госстандарт СССР)

ИСПОЛНИТЕЛИ

П. М. Геруни, Д. С. Арутюнян

ВНЕСЕН Государственным комитетом стандартов Совета Министров
СССР (Госстандарт СССР)

Член Госстандарта СССР А. И. Ивлев

УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Госу-
дарственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 29 июня
1978 г. № 1743

Настоящий стандарт распространяется на остронаправленные
антенны и устанавливает методику выполнения измерений для опреде-
ления параметров создаваемых ими полей излучения путем измерения
характеристик полей в их раскрывах.

Определяемыми настоящей методикой параметрами поля излуче-
ния являются:

- диаграмма направленности (ДН);
- положение электрической оси в пространстве;
- коэффициент поляризации (КП).

1. Методика определения параметров остронаправленных антенн по полю в их раскрыве

1.1. Настоящая методика позволяет определить параметры поля излучения остронаправленных антенн путем измерения характеристик распределения поля в их раскрывах с последующим пересчетом значений поля в раскрыве в дальнюю зону. Измерение и пересчет выполняются автоматически при помощи ЭВМ. Погрешности измерения параметров антенн, указанные в настоящем стандарте, распространяются на остронаправленные антенны с квазиравномерным распределением поля в их раскрывах.

1.2. Методика применяется для определения параметров остронаправленных антенн при их разработке, производстве и эксплуатации как в свободном пространстве, так и в закрытых безэховых помещениях.

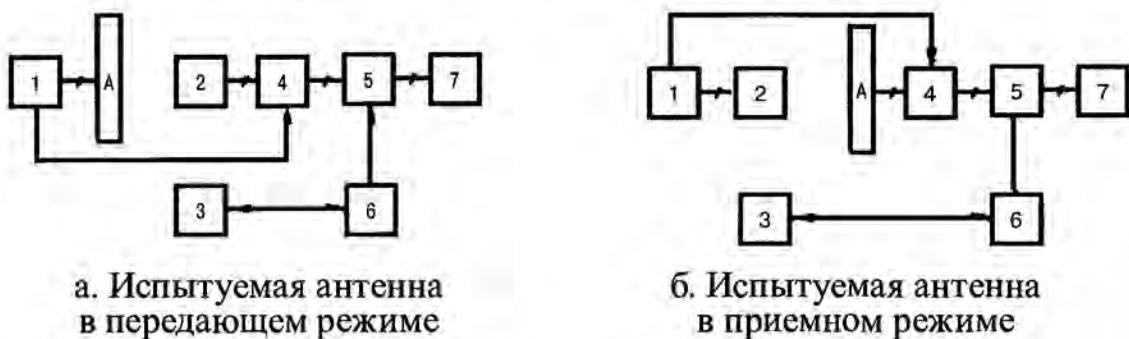
1.3. Настоящая методика не исключает выполнения измерений для определения параметров поля излучения остронаправленных антенн другими методами (по дальней зоне, коллиматорные и другие).

1.4. Методика измерения параметров конкретной остронаправленной антенны по п. 1.1 или 1.3 указывается в технической документации, утвержденной в установленном порядке.

2. Средства измерений и аппаратура

2.1. В качестве средств измерений применяют измерительные комплексы аппаратуры, позволяющие выполнять измерения характеристик амплитудно-фазового распределения поля в раскрывах остронаправленных антенн и обработку результатов измерений с целью определения

Черт. 1. Рекомендуемая блок-схема измерительного комплекса аппаратуры



1 – измерительный генератор; 2 – измерительный зонд; 3 – сканер; 4 – амплифазометр; 5 – преобразователь сигналов; 6 – устройство автоматического управления сканера; 7 – ЭВМ; А – испытуемая антенна

параметров поля излучения. Рекомендуемая блок-схема измерительного комплекса аппаратуры представлена на черт. 1. Основные метрологические характеристики устройств, входящих в измерительный комплекс, указаны в обязательном приложении 1.

2.2. Измерительные комплексы аппаратуры в зависимости от точности и возможностей применяемых в них устройств делятся на два класса:

I класс – рабочие измерительные комплексы аппаратуры высокой точности;

II класс – рабочие измерительные комплексы аппаратуры.

2.3. Среднеквадратические отклонения результатов измерений амплитуды поля и фазы поля в раскрывах испытуемых остронаправленных антенн не должны превышать для измерительных комплексов I класса 0,6 дБ и 4°, соответственно, а для II класса – 1,2 дБ и 8°, соответственно. При этом погрешность результатов определения параметров поля излучения остронаправленных антенн не должна превышать значений, приведенных в таблице*. Погрешности определения положения электрической оси остронаправленной антенны в пространстве практически полностью определяются погрешностями определения относительного расположения остронаправленной антенны и плоскости сканирования геодезическими или другими методами.

№ п/п.	Наименование параметра	Нормы для рабочих измерительных комплексов аппаратуры классов	
		I	II
1	Диаграмма направленности а) ширина луча, % б) уровень первого бокового лепестка** в) уровень первого минимума по мощности**	0,2 3,0 3,0 (до уровня 27 дБ)	1,0 15,0 15,0 (до уровня 20 дБ)
	г) угловое смещение первого бокового лепестка, % д) угловое смещение первого минимума, %	0,1 0,2	0,6 1,0
2	Коэффициент поляризации поля (в пределах ширины луча), %	4	7
3	Положение электрической оси в пространстве относительно плоскости раскрыва, %	0,1	0,6

При работе с измерительными комплексами, имеющими погрешности, превышающие погрешности комплексов II класса, погрешность определения параметров остронаправленных антенн соответственно возрастает.

* Приведенные значения соответствуют случаю квазиравномерного распределения поля в раскрыве антенны.

** Погрешность указана в процентах от измеряемой величины.

2.4. Зависимости погрешностей определения параметров поля излучения остронаправленных антенн от среднеквадратических ошибок измерения поля в их раскрывах приведены в виде номограмм в обязательном приложении 2.

2.5. Дополнительным средством измерения может служить безэховая камера. Основным требованием к ней является обеспечение двукратных отражений с суммарным поглощением не менее 35 дБ. Для повышения точности измерений влияние этих отражений на результат измерений можно в значительной мере исключить как систематическую ошибку.

2.6. В автоматических измерительных комплексах аппаратуры, управляемых через ЭВМ, измерительный зонд при помощи механического сканера перемещается на плоскости в раскрыве остронаправленной антенны по растровому закону – вертикальными строками при горизонтальном шаговом движении или наоборот. Ввод измерительной информации в ЭВМ осуществляется в реальном масштабе времени. После окончания цикла измерения поля в раскрыве ЭВМ автоматически переходит в режим обработки и выдачи протокола измерений.

3. Подготовка к измерениям

3.1. Разворачивают измерительный комплекс аппаратуры в рабочее положение. Для этого механический сканер устанавливают в раскрыве испытуемой остронаправленной антенны перпендикулярно к ее геометрической оси.

3.2. После установки измерительной аппаратуры в рабочее положение в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации комплекса включают аппаратуру и выдерживают для прогрева 1 ч. 3.3. Проверяют режимы работы отдельных устройств и комплекса в целом согласно руководству по эксплуатации.

3.4. Устанавливают элементы аппаратуры и индикаторы в исходное состояние.

4. Проведение измерений

4.1. Измерительный комплекс аппаратуры переводят в автоматический режим работы согласно руководству по эксплуатации.

4.2. По контрольно-измерительным приборам измерительного комплекса аппаратуры следят за ходом работы комплекса.

4.3. Проверяют поступивший с выхода ЭВМ протокол аттестации остронаправленной антенны.

5. Обработка и оформление результатов измерений

5.1. Обработка результатов измерений производится автоматически в процессе выполнения измерений. Процесс обработки делится на два основных цикла: выполнение преобразования поля (моделирование ДН) и проведение окончательной обработки (расчет параметров). Указанные циклы могут выполняться с разнесением во времени по отношению к процессу измерений.

5.2. Алгоритмы, расчетные соотношения и методики определения параметров приведены в обязательном приложении 3.

5.3. Результаты измерений печатаются на выходе ЭЦВМ в виде протокола автоматической аттестации остронаправленной антенны. Форма протокола приведена в рекомендуемом приложении 4.

6. Требования безопасности

Требования безопасности работы по настоящей методике должны соответствовать ГОСТ 12.1.006–76*.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 (обязательное)

Метрологические характеристики средств измерений

№ п/п.	Наименование устройства измерительного комплекса	Характеристики**
1	Измерительный генератор по ГОСТ 14661–69, ГОСТ 14126–78 и ГОСТ 17193–71	Стабильность не хуже 1.10 по частоте и $\pm 3\%$ по мощности за один цикл измере- ний. Разность электрических длин опорно- го и сигнального трактов не более 10λ
2	Измерительный зонд (стан- дартный волновод)	Неравномерность ДН в пределах раскрыва испытуемой антенны не более 0,8 дБ
3	Сканер	Размеры рабочей поверхности $L \geq D + 2d \operatorname{tg} \alpha$, где D – размер геометри- ческого раскрыва остронаправленной ан- тены, м; d – расстояние от геометрическо- го раскрыва до рабочей поверхности сканера, м; 2α – угловая ширина определяе- мого сектора ДН, угловые градусы. Шаг из- мерений (дискретизации) $0,5\lambda \leq \tau \leq \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}, \text{ см.}$

* Действует ГОСТ 12.1.006–84.

** Приведенные значения относятся к средствам измерений I класса. Для II класса все требования могут быть ослаблены в два раза. В п. 1–4 погрешности могут быть перераспределены между средствами измерений при условии сохранения результирующих значений погрешностей по п. 2.3 настоящего стандарта.

		Верхняя граница для шага может использоваться с компенсацией ошибок путем фильтрации пространственных гармоник.
		Погрешность шага не более 0,1
		Среднее квадратическое отклонение рабочей поверхности сканирования от плоскости не более $\lambda/300$.
		Угловая погрешность установки сканера относительно антенны не должна превышать допустимую погрешность определения смещения электрической оси остронаправленной антенны по геометрической.
4	Амплифазометр	Чувствительность определяется мощностью генератора, трактом и отношением площадей раскрызов испытуемой остронаправленной антенны и измерительного зонда. Динамический диапазон входного сигнала 20 дБ. Относительная погрешность измерения амплитуды 1 дБ. Среднеквадратическая фазовая ошибка не более 2° .
5	Подвижная линия передачи сигнала	Нестабильность фазовой характеристики не более 1° (среднеквадратическое значение).
6	Преобразователь сигналов по ГОСТ 14014–68* типа Ф 722/4	Включает аналого-цифровой преобразователь и устройство ввода данных в ЭЦВМ.
7	Устройство автоматического управления сканера	Максимальные ошибки следования управляющих команд не более $\tau/10$
8	ЭЦВМ семейства «Наири»	Универсальная ЭЦВМ или спецпроцессор с объемом оперативной памяти в соответствии с размерами обрабатываемой матрицы измерительной информации.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 (обязательное)

Номограммы для определения норм точности измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) поля в раскрыве остронаправленных антенн

Приведенные номограммы составлены на основе соотношений статистической теории линейных антенн при синфазном равномерном распределении поля и при критическом радиусе корреляции погрешностей измерений. Схема пользования номограммами приведена на левом верхнем углу. В номограммах приняты следующие обозначения:

* Действует ГОСТ 14014–91.

σ_{ϕ}^0 – среднее квадратическое отклонение результатов измерений фазового распределения поля в раскрыве, в угловых градусах;

σ_A^{dB} – среднее квадратическое отклонение результатов измерений амплитудного распределения поля в раскрыве, в децибеллах, $\alpha = \sigma_{\phi}^2 + \sigma_A^2$,

где σ_{ϕ} – в радианах, σ_A – в неперах;

ГЛ – ширина главного лепестка ДН по половинной мощности, %;

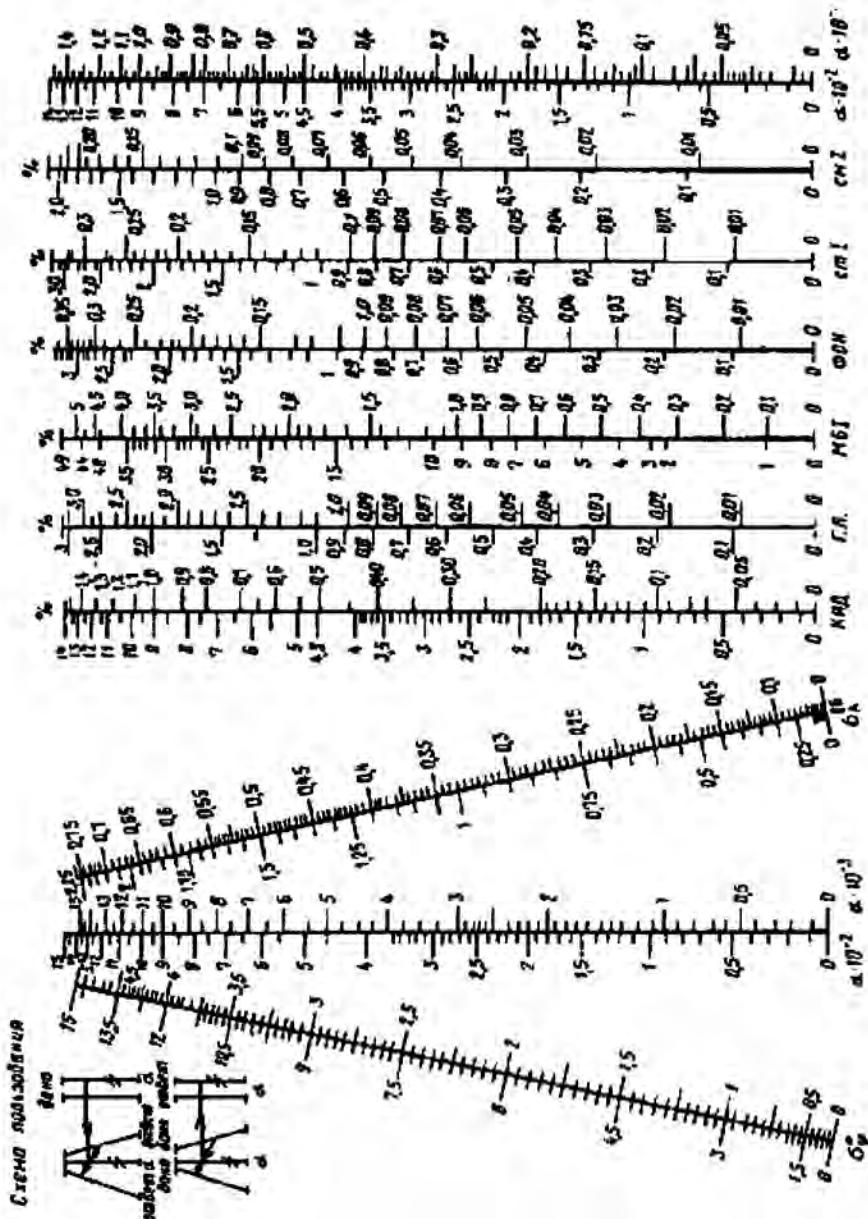
МБI – уровень максимума первого бокового лепестка, %;

«фон» – уровень достоверного определения первого минимума, %;

СмI – смещение максимума первого бокового лепестка ДН;

СтI – смещение первого минимума.

Номограммы норм точности измерения АФР в раскрыве СВЧ антенн



ПРИЛОЖЕНИЕ 3 (обязательное)

Алгоритмы, расчетные соотношения и методики определения параметров поля излучения остронаправленных антенн

1. В зависимости от выбора системы координат при измерении распределения поля в раскрыве остронаправленной антенны выбирается соответствующий алгоритм обработки.

1.1. При измерении на плоскости в прямоугольной (декартовой) системе координат обработка производится на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ).

1.2. При измерении на сферической или цилиндрической поверхности обработка производится по специальным алгоритмам пересчета полей на криволинейных поверхностях.

2. При измерениях поля на плоскости в раскрыве остронаправленной антенны и обработке результатов на основе алгоритма БПФ рекомендуется руководствоваться следующими расчетными соотношениями.

2.1. Угловые соотношения моделирования ДН. Угловые координаты точки в дальней зоне относительно нормали к плоскости сканирования.

$$\Theta(n(x), n(y)) = \arcsin \left[\lambda \sqrt{\left(\frac{n(x)}{N(x)\tau_x} \right)^2 + \left(\frac{n(y)}{N(y)\tau_y} \right)^2} \right],$$

$$\varphi(n(x), n(y)) = \operatorname{arctg} \left[\frac{n(y) N(x) \tau_x}{n(x) N(y) \tau_y} \right].$$

Угловой шаг на ДН (между соседними точками в матрице ДН):

$$\Delta\theta(x) = \arcsin \left[\frac{\lambda n(x)}{N(x)\tau_x} \right] - \arcsin \left[\frac{\lambda(n(x)-1)}{N(x)\tau_x} \right] \text{ по оси } \varphi = 0;$$

$$\Delta\theta(y) = \arcsin \left[\frac{\lambda n(y)}{N(y)\tau_y} \right] - \arcsin \left[\frac{\lambda(n(y)-1)}{N(y)\tau_y} \right] \text{ по оси } \varphi = \pi/2.$$

Угловой сектор моделирования

$$\text{по оси } \varphi = 0 \quad \Delta\theta_0 = 2 \arcsin \frac{\lambda}{2\tau_x};$$

$$\text{по оси } \varphi = \frac{\pi}{2} \quad \Delta\theta_{\frac{\pi}{2}} = 2 \arcsin \frac{\lambda}{2\tau_y}.$$

В формулах приняты следующие обозначения: $n(x)$, $n(y)$ – порядковые номера (координаты) точки в матрице ДН по осям $\phi = 0$ и $\phi = \pi/2$ (угломестная и азимутальная плоскости), соответственно, с началом отсчета в центре матрицы;

$N(x)$, $N(y)$ – размеры матрицы ДН и обрабатываемой матрицы поля в раскрыве, количество точек в раскрыве и в измеряемой ДН;

τ_x , τ_y – шаги в матрице измеренного поля в раскрыве остронаправленной антенны, см;

λ – длина волны, см.

По результатам одного цикла измерений поля в раскрыве определяется ДН остронаправленной антенны в любом заданном сечении (в горизонтальной, вертикальной или другой плоскости). Одновременно получается фазовая ДН в том же сечении.

2.2. Методика определения КП.

Для определения КП поля излучения остронаправленной антенны производится два цикла измерения поля в раскрыве при двух взаимно перпендикулярных положениях линейно-поляризованного измерительного зонда.

КП определяется по двум полученным амплитудным и фазовым ДН:

$$\text{КП} = \frac{b}{a},$$

где b , a – большая и малая оси эллипса поляризации, соответственно.

2.3. Методика определения положения электрической оси.

Положение электрической оси остронаправленной антенны относительно нормали к плоскости сканирования определяется как угловое смещение максимума главного лепестка ДН относительно начала отсчета углов, рассчитанное по выражениям, приведенным в п. 2.1 настоящего приложения. При этом положение электрической оси остронаправленной антенны относительно геометрической определяется с учетом смещения геометрической оси относительно нормали к плоскости сканирования.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4 (рекомендуемое)

Форма протокола автоматической аттестации

(Гриф)

**ПРОТОКОЛ
аттестации изделия №**

(число, месяц, год)

(город)

1. Параметры луча в вертикальной плоскостиКоордината максимума луча $0,0^\circ$ Ширина луча $2\Theta_{05} = 1,0^\circ$

Уровень и координата максимума боковых лепестков:

первый:	11,6 дБ, $2,8^\circ$;	второй:	24 дБ, $5,9^\circ$;
	10,5 дБ, $2,2^\circ$		18,3 дБ, $6,2^\circ$
третий:	24,1 дБ, $7,0^\circ$;	четвертый:	33,0 дБ, $11,0^\circ$;
	26,7 дБ, $8,5^\circ$		23,1 дБ; $10,2^\circ$
пятый:	30,1 дБ, $14,4^\circ$;	шестой:	27,9 дБ, $16,1^\circ$;
	31,3 дБ; $12,4^\circ$		32,0 дБ; $14,1^\circ$

2. Параметры луча в горизонтальной плоскостиКоордината максимума луча $0,0^\circ$ Ширина луча $2\Theta_{05} = 1,7^\circ$

Уровень и координата максимума боковых лепестков

первый:	5,9 дБ, $1,5^\circ$;	второй:	20,3 дБ; $6,8^\circ$;
	15,3 дБ, $3,6^\circ$		14,7 дБ, $5,7^\circ$
третий:	14,7 дБ, $9,9^\circ$;	четвертый:	14,2 дБ, $12,3^\circ$;
	16,2 дБ, $7,8^\circ$		19,1 дБ, $10,6^\circ$
пятый:	0,0 дБ, $0,0^\circ$;	шестой:	0,0 дБ, $0,0^\circ$;
	0,0 дБ; $0,0^\circ$		0,0 дБ; $0,0^\circ$

3. Коэффициент поляризации = 0,1

Вывод: изделие к эксплуатации годно

Автоматический измерительный комплекс №

Изделие сдал

Изделие принял

4. Режим выдачи графиков ДН.

ДЛЯ ЗАМЕТОК