

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР
Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

Препринт № Г78

МЕТОД КОРРЕКЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ЗОНДА
ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ БЛИЗНЕГО ПОЛЯ АНТЕНН НА ПЛОСКОСТИ

А. В. Калинин

И. А. Шмонин

Горький 1984

УДК 621.396.67

Рассматривается метод фазовой коррекции результатов измерения на плоскости ближнего поля антенны. Приводится описание установки для измерения отклонений зонда от плоскости сканирования. Получены соотношения для допустимых величин этих отклонений. Приведены результаты применения метода к модели ближнего поля.



При измерениях ближнего поля антенна требуется высокая точность перемещения измерительной антенны-зонда по заранее заданной поверхности. В работах [1, 2] приводятся требования на допустимые продольные и поперечные отклонения зонда. При этом требования на отклонения, перпендикулярные волновому фронту проекторного луча исследуемой антенны Δz , определяются из принципов геометрии и связаны с эквивалентной погрешностью определения фазы сигнала $\Delta\varphi$ следующим соотношением [3]:

$$\Delta z \leq \lambda \frac{1}{\cos\theta} \frac{\Delta\varphi (\text{град})}{360}, \quad (1)$$

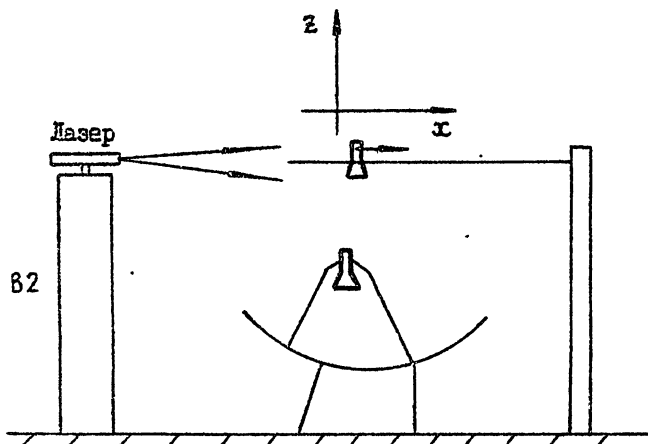
где 2θ - размер углового сектора, в котором восстанавливается диаграмма направленности антенны, λ - рабочая длина волны.

При исследованиях крупных антенн реализация движения зонда с такой точностью требует создания сложных и дорогих механических систем перемещения (сканирования) зонда, а иногда становится вообще невозможной. В связи с этим возникает интерес [4] к созданию и применению в антенных измерениях специальных систем, измеряющих отклонения зонда от поверхности сканирования и позволяющих существенно снизить требования к точности перемещения зонда за счет учёта измеренных отклонений при обработке результатов измерений ближнего поля.

Рассмотрим стенд для исследования ближнего поля, в котором измерительный зонд движется над испытуемой антенной вдоль линии на горизонтально ориентированной поверхности (см. рис. 1).

Анализ отклонений зонда от горизонтальной плоскости при больших

геометрических размерах сканера затруднен в условиях работы в непрерывном режиме перемещения зонда, в отличие от старт-стопного режима [4], где после установки зонда в фиксированное положение x, y, z координат сканера производится переключение фазирующих элементов антенны. Во время переключений зонд неподвижен и с помощью лазерного интерферометра определяется абсолютное положение зонда вдоль оси z , см. рис. 1. Нами разработана лазерная система контроля положения

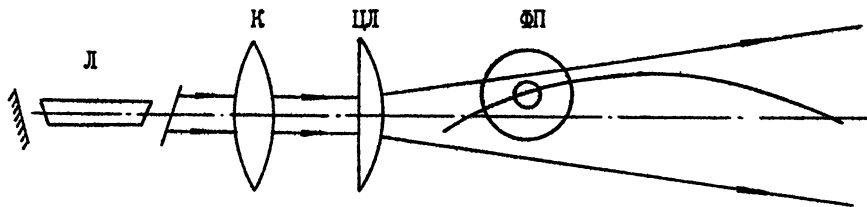


Р и с . 1

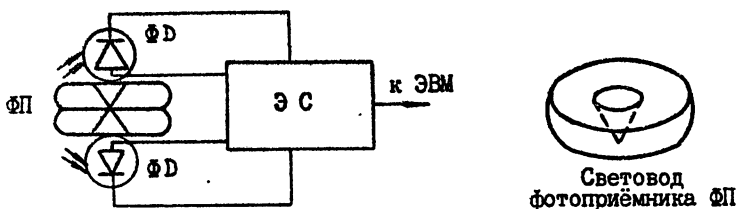
зонда, состоящая из стационарной вышки (B2) (см. рис. 1) с размещенной на ней лазерной и оптической системой развертывания светового пучка в сектор, фотоприёмника с электронной системой, анализирующей положение зонда относительно неподвижного⁺⁾ пучка света. Схема измерительной системы приведена на рис. 2, 3. На ней показано, как коллимированный пучок лазера расширяется по одной координате цилиндрической линзой в секторе, охватывающем траекторию перемещения зонда. В такой конструкции свет падает на фотоприёмник, жестко связанный с зондом, в довольно широком секторе углов. В ка-

⁺⁾ С точностью до флуктуаций положения лазера, вызванных механическими воздействиями ветра, вибрациями транспортных средств. Минимизация воздействия определяется специальной конструкцией вышки.

честве приёмного элемента использованы специальные световоды, см. рис. 3, которые собирают лучи света с любого азимутального направления ($0 + 360^\circ$) на фотодиоды, размещённые в центре световода. Лабораторные исследования системы определения вертикального отклонения



Р и с. 2 Л - лазер, К-коллиматор, ЦЛ - цилиндрическая линза, ФП - фотоприёмник



Р и с. 3 ЭС - электронная система, ФД - фотодиоды

фотоприёмника от "лазерного горизонта" (ось пучка света неподвижного лазера) показали, что точность её составляет величину $\pm 0,1$ мм в диапазоне ± 20 мм на расстоянии 25 м от источника света. Источником света является He-Ne лазер, работающий в одномодовом режиме. Подробное описание оптической схемы устройства контроля и методика анализа её точности опускаем для краткости изложения.

Оценим значения таких отклонений зонда Δz от горизонтальной плоскости $z = 0$, учёт которых в обработке ближнего поля $E(x, \Delta z(x))$, измеренного на этой "неровной" поверхности, ограничится введением лишь фазовой коррекции с сохранением алгоритма вычисления диаграммы направленности $f(\theta)$ в виде преобразования Фурье:

$$f(\theta) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\lambda} \cos \theta e^{-i\frac{\pi}{4}} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, \Delta z(x)) e^{-ikx \sin \theta - ik\Delta z(x)} dx.$$

Для совпадения диаграммы направленности $f(\theta)$ с "истинной" диаграммой, вычисленной по распределению ближнего поля на плоскости $z=0$, необходимо выполнение следующего условия:

$$\frac{\sqrt{2\pi}}{\lambda} \cos\theta e^{-i\frac{\pi}{4}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ik(2\Delta-x\sin\theta)-ik\Delta z(x)} \frac{1}{\sqrt{kr_{\Delta}}} = (1-\Delta a) e^{i\Delta\varphi} e^{ik(x_0\sin\theta-z_0\cos\theta)} \quad (2)$$

где $r_{\Delta} = \sqrt{(x-x_0)^2 + (z_0+\Delta z)^2}$ - расстояние от точки $(x, \Delta z)$ поверхности сканирования до точки (x_0, z_0) на раскрыве антенны. Значения Δa и $\Delta\varphi$, характеризующие эквивалентное искажение амплитуды и фазы поля на раскрыве, для оценок можно принять допустимыми, как в [5]: $\Delta a \approx 0,03 + 0,05$; $\Delta\varphi \sim 3^\circ + 5^\circ$.

Интеграл в соотношении (2) вычисляется методом стационарной фазы. Координата точки стационарной фазы как функция отклонений Δz может быть найдена разложением по степеням Δz вблизи "невозмущенной" точки стационарной фазы (при $\Delta z = 0$) в следующем виде:

$$x_{\text{ст}} = x_0 + z_0 \operatorname{tg}\theta \left[1 + \frac{\Delta z}{z_0} + \frac{1-\cos\theta}{\sin\theta \cos^2\theta} \Delta z' x + O\left(\left(\frac{\Delta z}{z_0}\right)^2\right) \right],$$

$$\frac{\Delta z}{z_0} \ll 1, \quad \Delta z' x(x_{\text{ст}}^0) \ll 1.$$

При этом соотношение (2) выполняется со следующими значениями параметров:

$$\Delta a \approx \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta z}{z_0} \right)^2, \quad \theta \ll 1,$$

$$\Delta\varphi = k\Delta z(1-\cos\theta) + O\left(\frac{\Delta z^2}{\lambda z_0}\right). \quad (3)$$

Как видно из выражения (3) для Δa , отклонения зонда эквивалентны незначительным искажениям амплитуды тока на раскрыве, и к искажениям величиной 3-5% могут привести отклонения $\Delta z \sim 0,3 z_0$, на практике не реализуемые. Следовательно оценка допустимых величин отклонений зонда может быть сделана из условия на эквивалентное искажение фазы тока на раскрыве, которое принимает вид

$$|k\Delta z(1-\cos\theta)| \leq \Delta\varphi = 3 \div 5^\circ$$

или

$$\Delta z = \lambda \frac{1}{1 - \cos \theta} \frac{\Delta \varphi (\text{град})}{360^\circ} \quad (4)$$

Для параметров θ и $\Delta \varphi$, обычно представляющих интерес при измерениях ближних полей антенн, приведем численные значения условий (1) и (4):

$$\Delta z \leq 0,01 \lambda, \quad \theta - \text{любое}, \quad \Delta \varphi \sim 3^\circ, \quad (1')$$

$$\Delta z \leq \left\{ \begin{array}{l} 2 \lambda, \quad \theta \leq 5^\circ \\ 0,25 \lambda, \quad \theta \leq 15^\circ \end{array} \right\}, \quad \Delta \varphi \sim 3^\circ. \quad (4')$$

Сравнение условий (1') и (4') показывает, что измерение реального положения зонда в каждой точке поверхности сканирования и введение дополнительной фазовой коррекции в обработку существенно снижает требования к точности перемещения зонда.

Проверка алгоритма вычисления диаграммы направленности антенны по её ближнему полю, измеренному на "шероховатой" поверхности, проводилась на модели ближнего поля круглой апертуры, полученной в работе [6] и имеющей аналитический вид:

$$E_y^+(x, z) = \left\{ \begin{array}{l} e^{-ikz} \\ 0 \end{array} \right\} + 2e^{-i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{a}{\pi x}} \left\{ \operatorname{tg} \theta_2 \cos \left(\frac{\theta_2}{2} + \frac{\pi}{4} \right) e^{-ikR_2} \times \right. \\ \left. \times F \left[\sqrt{kR_2(1 - \sin \theta_2)} \right] + i \operatorname{tg} \theta_1 \cos \left(\frac{\theta_1}{2} + \frac{\pi}{4} \right) e^{-ikR_1} F \left[\sqrt{kR_1(1 - \sin \theta_1)} \right] \right\},$$

где θ_1 и θ_2 - углы, под которыми "видна" точка ближнего поля с координатами (x, z) из краев апертуры, $R_1 = \sqrt{(x - D/2)^2 + z^2}$ и $R_2 = \sqrt{(x + D/2)^2 + z^2}$ - расстояния от точки (x, z) до краев апертуры, $F(x) = \exp(ix^2) \int_x^\infty \exp(-it^2) dt$ - интеграл Френеля.

Геометрические размеры задачи - отношение диаметра апертуры и расстояния от раскрыва до поверхности сканирования к длине волны соот-

+) Плоская волна и разность краевых волн соответствует точкам ближнего поля с координатами $|x| > D/2$, ноль и сумма краевых волн - точкам с координатами $|x| > D/2$.

ветствовали размерам стэнда, описанного выше, и составляли величины:
 $D/\lambda = 120$, $z_0/\lambda = 60$.

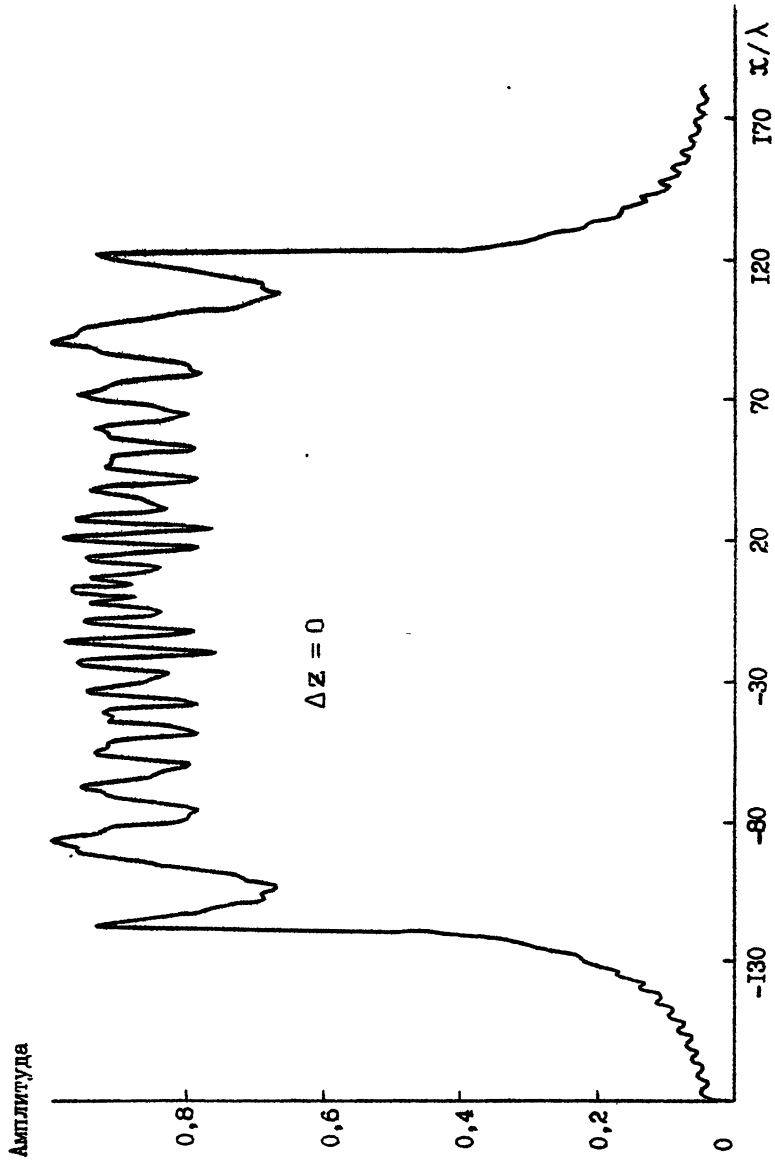
Траектория отклонений зонда от плоской поверхности представлялась в виде суммы трех гармонических колебаний разных частот⁺⁾ , суммарная амплитуда Δz которых являлась параметром модели

$$z = \Delta z \left[\frac{1}{2} \cos \frac{\pi x}{D} + \frac{1}{3} \cos \left(4 \frac{\pi x}{D} + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{1}{6} \cos \left(10 \frac{\pi x}{D} + \frac{\pi}{3} \right) \right].$$

На рис. 4 и 5 приведены сечения амплитуды и фазы ближнего поля на линии $z = z_0 + \Delta z$, рассчитанные для нескольких значений параметра Δz . Результаты вычисления диаграммы направленности антенны по ближнему полю на "неровной" поверхности с использованием фазовой коррекции и без неё для нескольких значений параметра Δz показаны соответственно на рис. 7, 6.

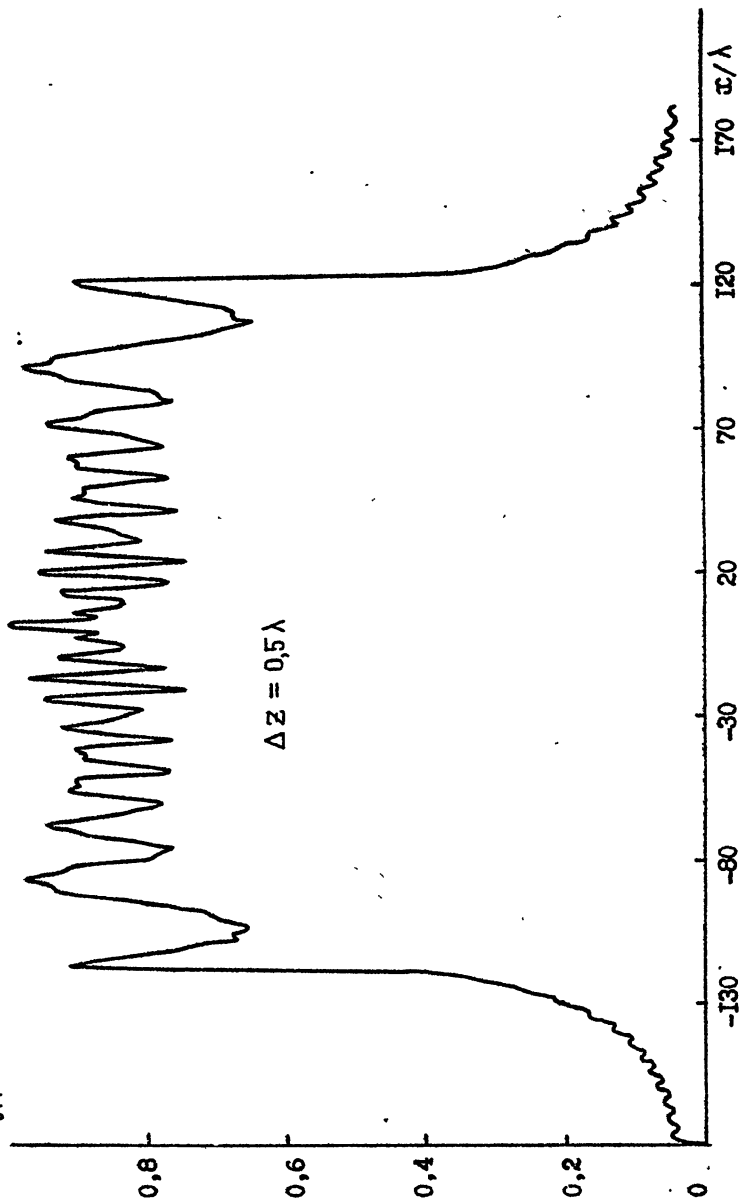
Малое отличие диаграммы восстановленной при достаточно больших для практики "неровностях" поверхности сканирования (при $\Delta z = 2\lambda$, см. рис. 7) от "истинной" диаграммы ($\Delta z = 0$) подтверждает целесообразность проведения фазовой коррекции при измерениях ближнего поля антенн.

⁺⁾ Такая модель отклонений оправдана как технологическими причинами — колебаниями стрелы сканирующего устройства, так и условием максимального влияния периодических отклонений на боковые лепестки восстанавливаемой диаграммы направленности.

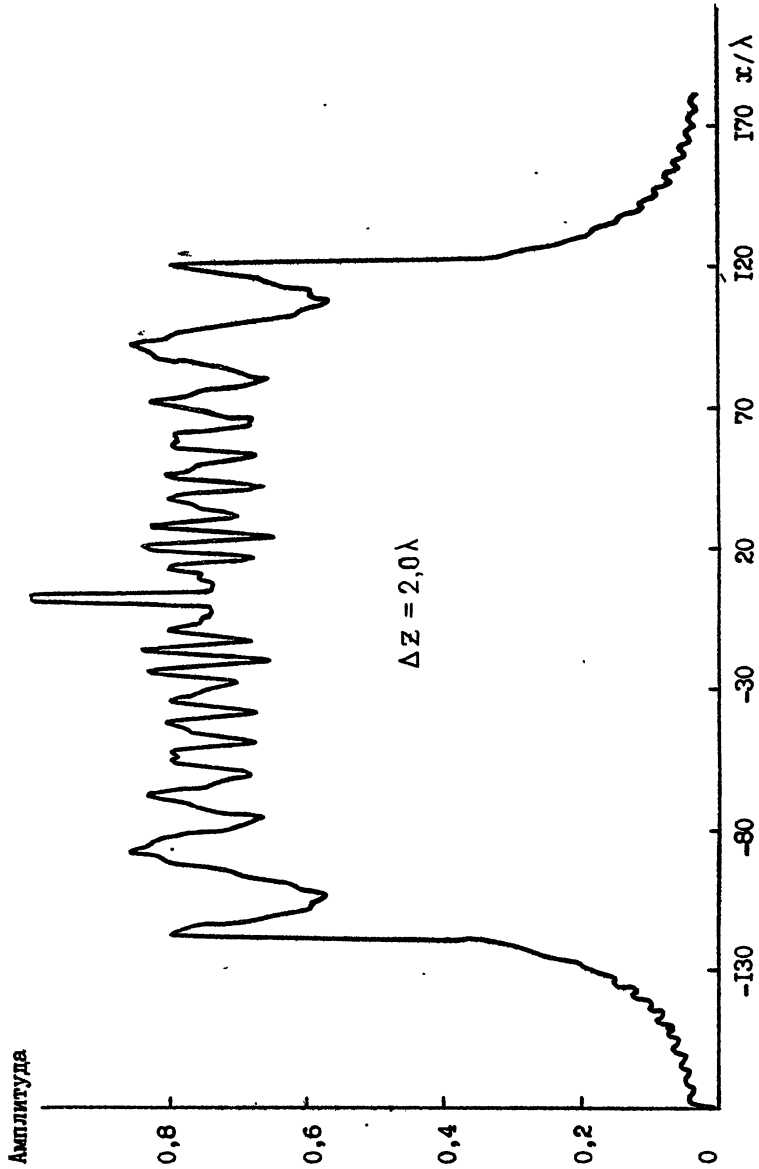


Р и с. 4а

Амплитуда



Р и с. 46

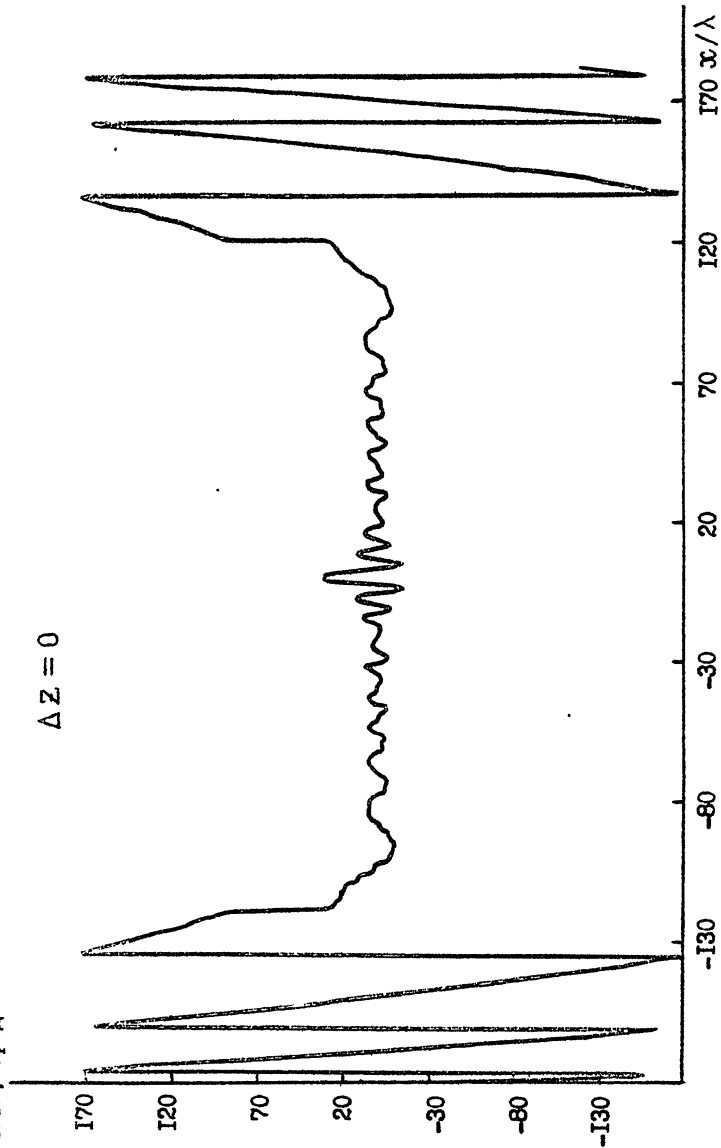


Р и с. 4в

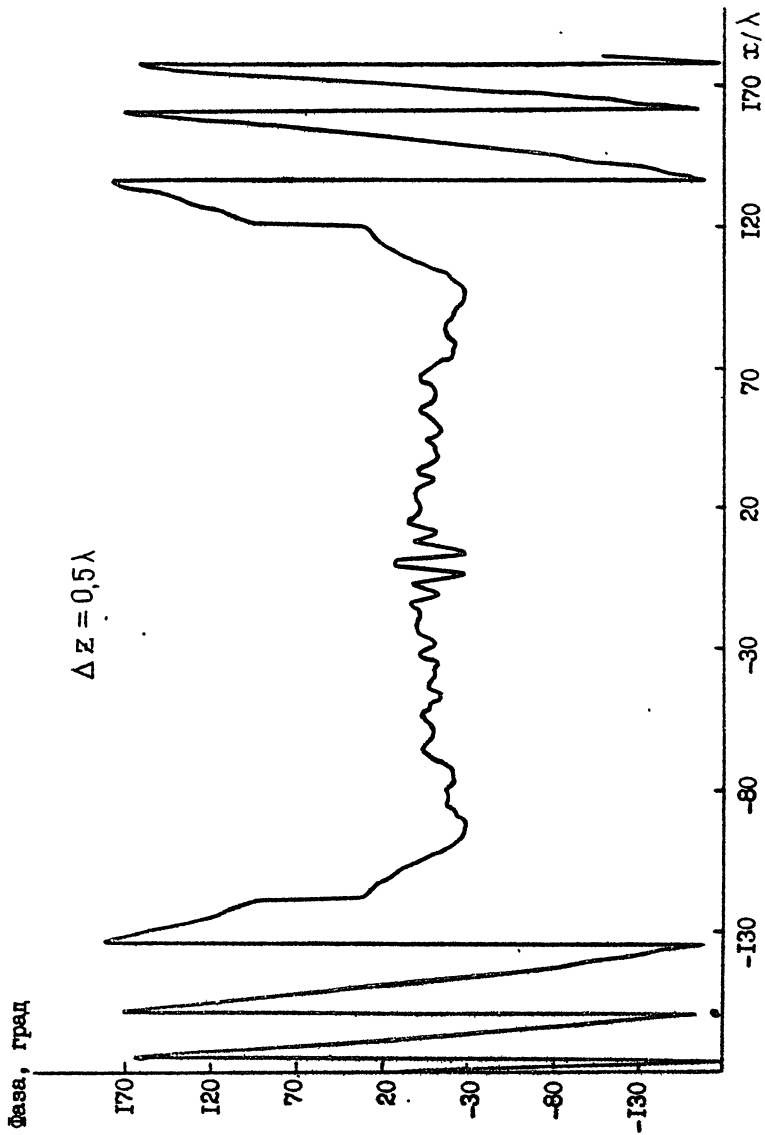
КЗ

фаза, град

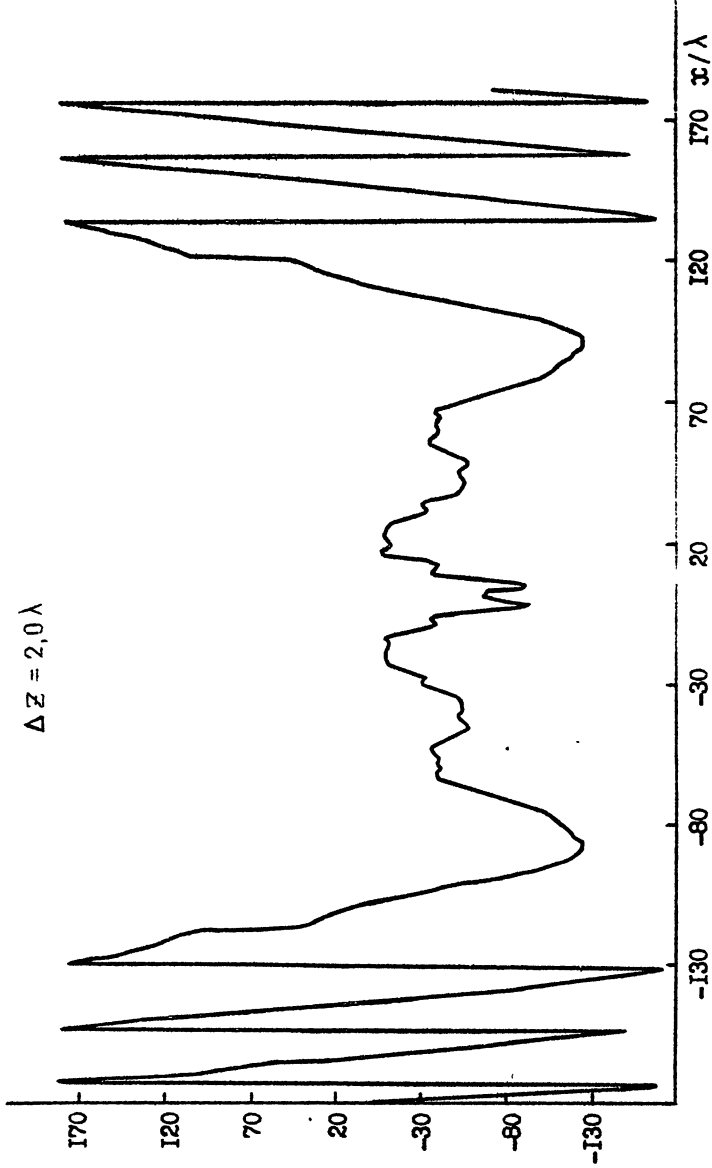
$\Delta Z = 0$



Р и с. 5а

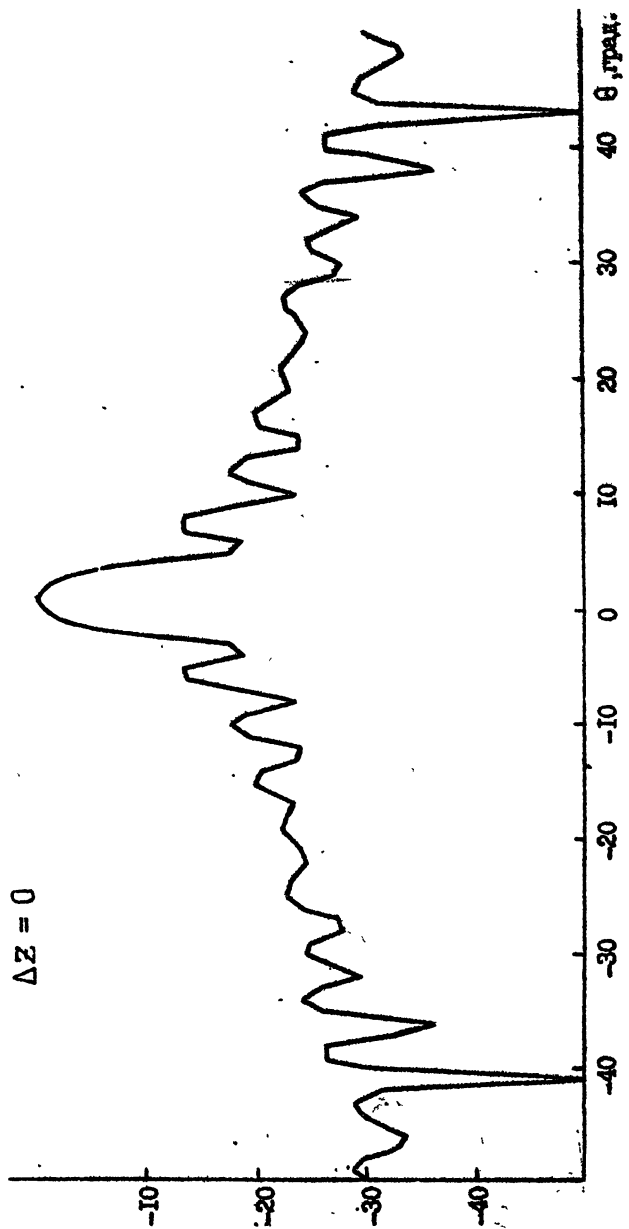


Р и с. 56

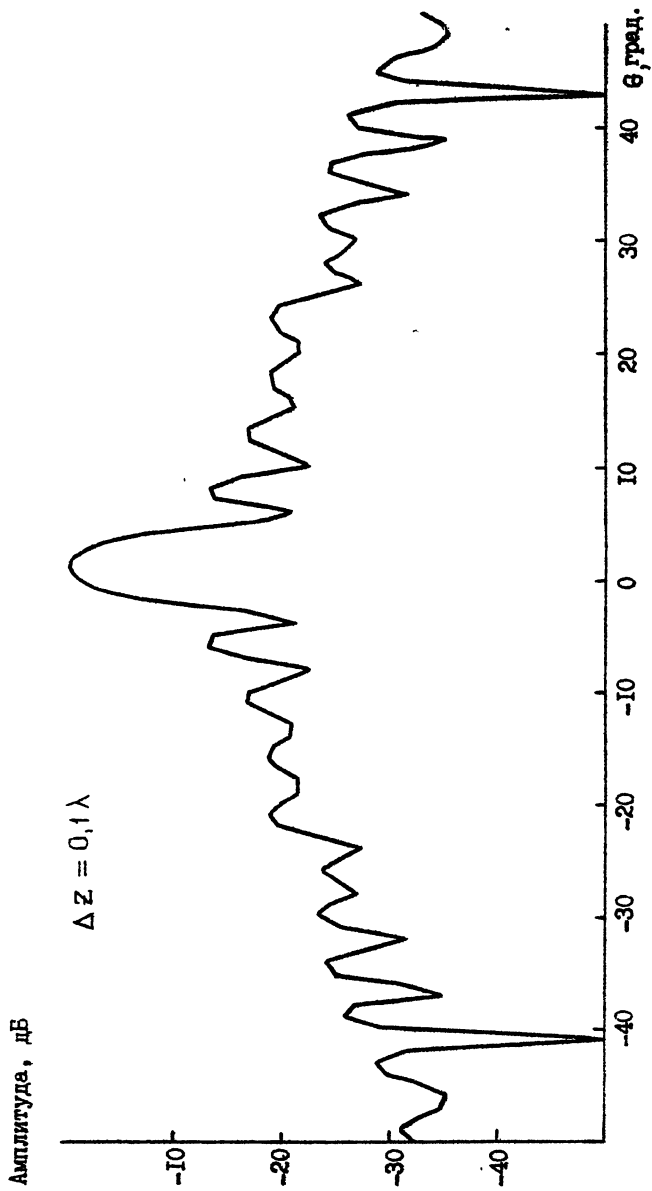
$\Delta Z = 2,0 \lambda$ 

Амплитуда, дБ

$\Delta Z = 0$

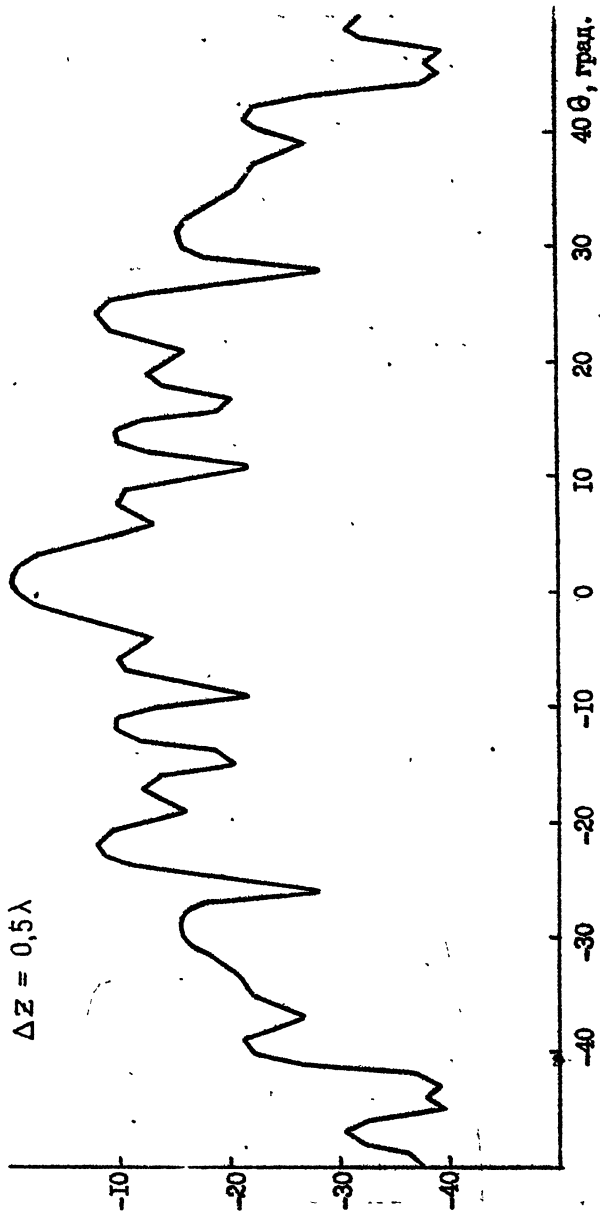


Р и с. 6а



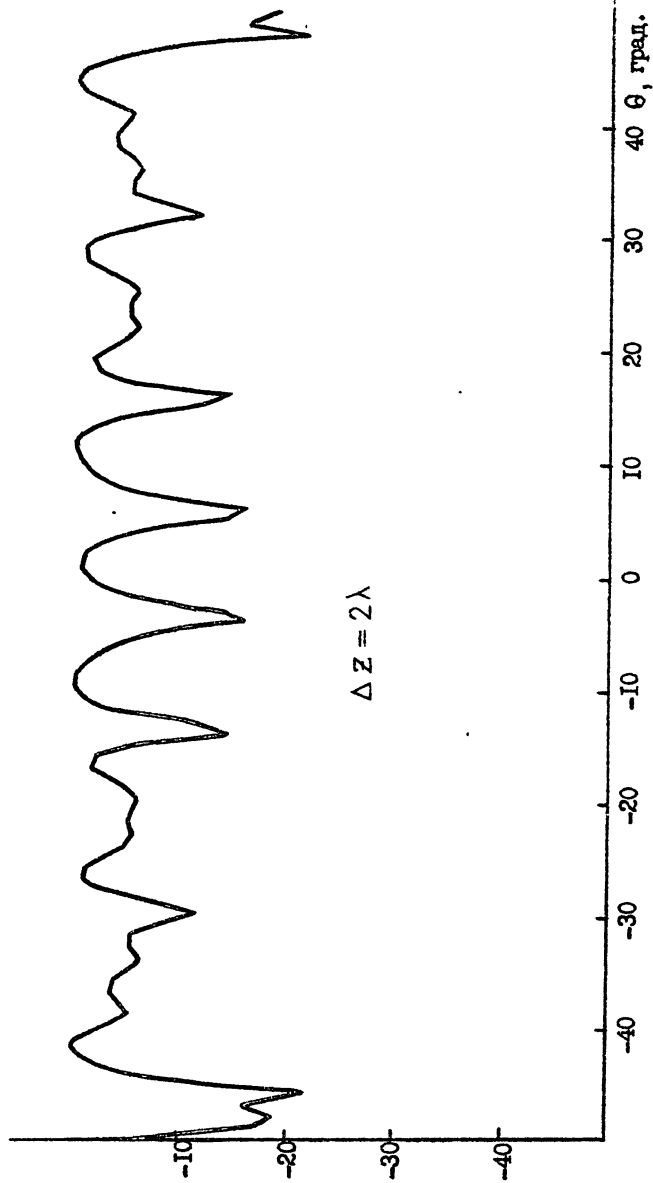
Амплитуда, дБ

$\Delta Z = 0,5\lambda$



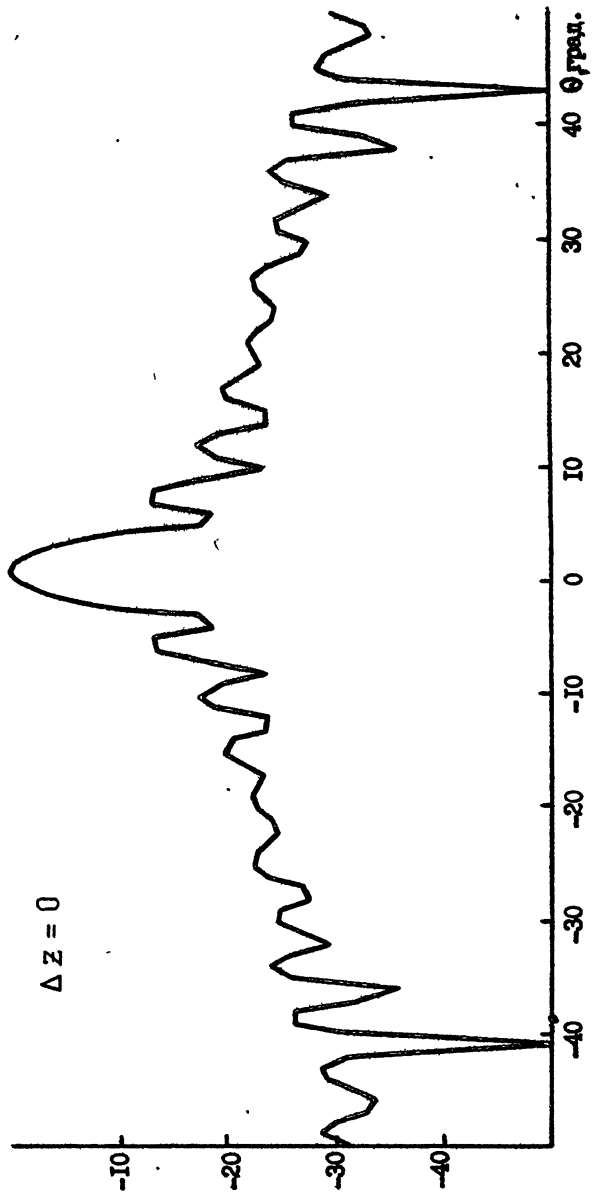
Р и с. 6в

Амплитуда, дБ



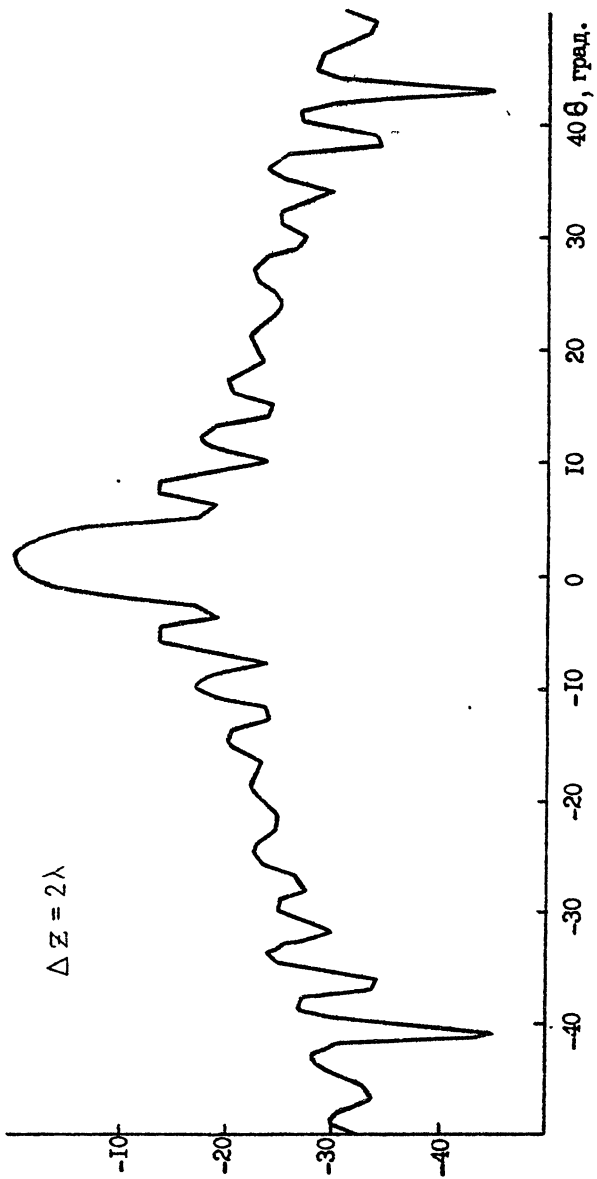
Р и с. 6г

Амплитуда, дБ



Р и с. 7а

Амплитуда, дБ



Р и с. 76

Л и т е р а т у р а

1. Турчин В.И., Цейтлин Н.М. Амплифазометрический метод антенных измерений (обзор). - Радиотехника и электроника, 1979, т. XXIV, № 12, с. 23 - 82.
2. A.C.Newell, A.D.Yaghjian, Internat.IEEE/AP-S Symp., Urbana, 1975, p.470.
3. Отчёт по НИР "Голография", НИРФИ, 1978, № г.р. 78008044.
4. J.Borowick, etc. A near-field antenna measurement system.-IEEE Trans., III.v.32, N1, 1983.
5. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. - М.: Сов. радио, 1970.
6. R.C.Rudduck, C.-L.J.Chen. New plane wave spectrum formulations for the near-fields of circular and strip apertures.-IEEE Trans. AP, 1976, v.24, №4.

Дата поступления статьи
2 апреля 1984 г.

Андрей Владимирович КАЛИНИН
Иван Александрович ШМОНИН

МЕТОД КОРРЕКЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ЗОНДА[®]
ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ АНТЕНН НА ПЛОСКОСТИ

Подписано в печать 01.06.84 г. МЦ 01287. Формат 60 x 84 1/16
Бумага множительная. Печать офсетная. Объем 1,29 усл. л. лист.
Тираж 120. Заказ 4042. Бесплатно.

Отпечатано на ротационте НИРФИ.