

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

Препринт № 151

**КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГРАММ
НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН
ЧАСТЬ II**

В.С.Коротков

А.В.Калинин

В.И.Турчин

Н.В.Векслер

В.С.Беагон

Горький 1982

А н н о т а ц и я

УДК 621.396.67

Предлагается методика и приведены результаты исследования параметров радиотелескопа с помощью корреляционного метода по Солнцу. Получены соотношения для цифровой фильтрации результатов антенных измерений и для координат сканирования антенны с целью получения равномерной сетки отсчетов в системе координат, связанной с зеркалом радиотелескопа.

1. Цифровая фильтрация результатов измерений диаграммы направленности антенны

Цифровая фильтрация данных измерений основана на использовании априорной информации об объекте. В частности, для целей измерения диаграмм направленности антенн в качестве априорной информации выберем информацию о геометрических размерах антенны. При измерениях диаграммы направленности антенны корреляционным методом сигнал на выходе коррелятора пропорционален величинам

$$F(\theta, \varphi) \cos \psi(\theta, \varphi); \quad F(\theta, \varphi) \sin \psi(\theta, \varphi), \quad (1)$$

где $F(\theta, \varphi)$ и $\psi(\theta, \varphi)$ — амплитудная и фазовая диаграмма направленности.

Сигнал на выходе коррелятора связан со спектром поля в раскрыве антенны следующими простыми соотношениями:

$$F(\theta, \varphi) \cos \psi(\theta, \varphi) = \operatorname{Re} G,$$

$$F(\theta, \varphi) \sin \psi(\theta, \varphi) = \operatorname{Im} G, \quad (2)$$

где G — спектр поля в раскрыве антенны.

Учитывая, что поле в раскрыве антенны в геометрическом приближении занимает размеры приблизительно равные размерам проекции антенны на плоскость раскрыва, можно записать связь поля в раскрыве с его спектром в следующем виде (рассматриваем одномерный случай):

$$G^* = \int g(x) e^{i\varphi(x)} e^{ix\xi} \Pi(x) dx = \quad (3)$$

$$= G * \frac{\sin \xi D}{\xi D}$$

где G^* - спектр поля с учетом ограниченности размеров поля в плоскости раскрыва $g(x)$, $\varphi(x)$ - амплитудное и фазовое распределение поля в раскрыве антенны $\xi = \sin \theta$, где θ - угол между нормалью к плоскости раскрыва и направлением на источник,

$$\Pi(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq \Omega \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Для случая малых углов θ можно принять $\xi \approx \theta$. Величину Ω рекомендуется выбирать превышающей размеры антенны в связи с необходимостью учета влияния краевых токов.

В пакете программ, применяющемся при обработке сечений диаграммы направленности корреляционным методом на частоте 3090 МГц в качестве фильтрующей использовалась вместо функции вида $\frac{\sin \pi x}{x}$ в формуле (3) функция $\Phi(x)$, являющаяся приближением к ней. Функция $\Phi(x)$ задается следующими соотношениями:

$$\Phi(x) = \begin{cases} 1 - 0,1649 x^2 + 0,00645 x^4, & |x| < \pi \\ - 0,21723 + 0,11772 (|x| - 4,5)^2, & |x| \geq \pi \end{cases} \quad (4)$$

Вид функции $\Phi(\beta x)$ (где β - числовой параметр) приведен на

рис. 1. В связи с тем, что $\Phi(\beta x)$ задана на конечном интервале Ω и является приближением к функции вида $\frac{\sin x}{x}$, естественно при фильтрации экспериментальных значений возникает погрешность. С целью ее выявления проводилось математическое моделирование, заключающееся в том, что заданная функция вида $\frac{\sin 0,5x}{0,5x}$ подвергалась фильтрации. Результаты математического моделирования для различных параметров функции $\Phi(\beta x)$ показаны на рис. 2. Как следует из рис. 2 наибольшее совпадение достигается при выборе числового коэффициента β равным 2 и сектора задания Ω функции $\Phi(x)$ равным 3. На рис. 3 показано реальное сечение диаграммы направленности, полученной в результате фильтрации исходных данных, с помощью фильтра, имеющего параметры $\beta \Omega = 2\pi$; $\Omega = 1^\circ$. На этом же рисунке нанесены исходные данные. Как следует из сравнения двух графиков на рис. (3), низкие уровни диаграммы направленности, полученной в результате фильтрации, имеют меньшую дисперсию значений, чем исходные данные. Главные лепестки отфильтрованной и исходной диаграммы направленности практически совпадают. Первый боковой лепесток имеет отличие в пределах 2 дБ. Это может быть вызвано тем, что в качестве фильтрующей функции использовалось приближенное выражение, определяемое соотношениями (4). Фазовая диаграмма направленности (рис. 4), полученная в результате фильтрации, имеет меньшую дисперсию значений, чем исходная диаграмма.

С целью уменьшения погрешности фильтрации исходных

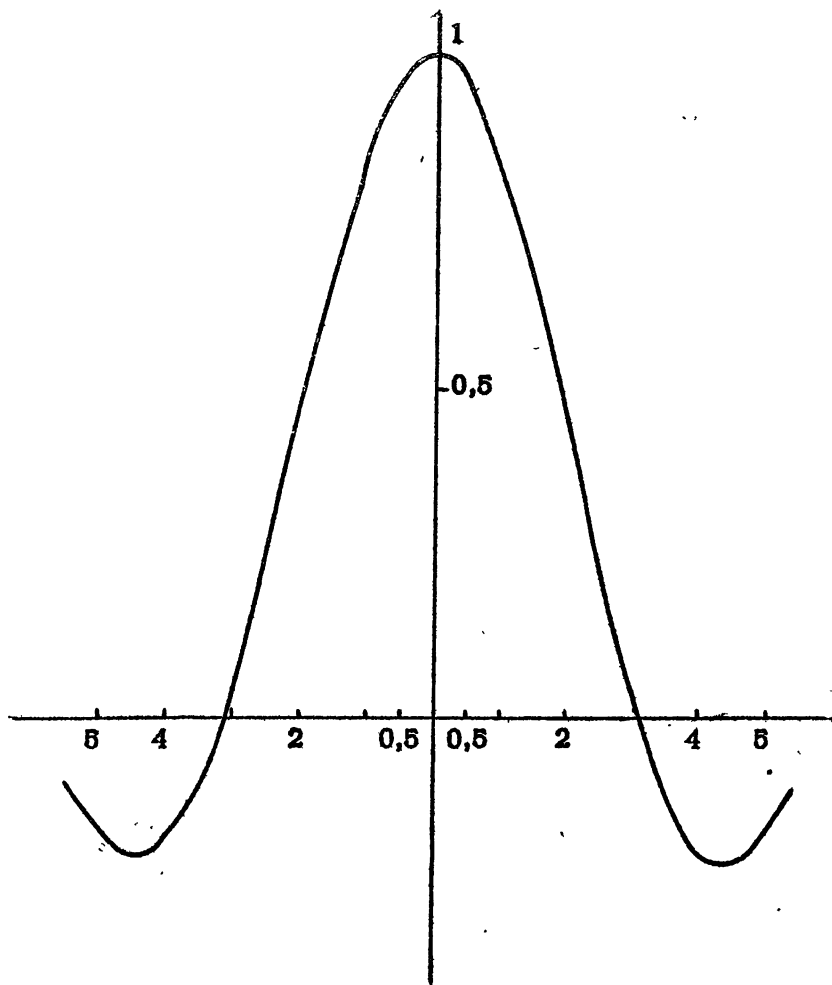


Рис. 1

Вид фильтрующей функции ($\beta = 1, \Omega = \theta$)

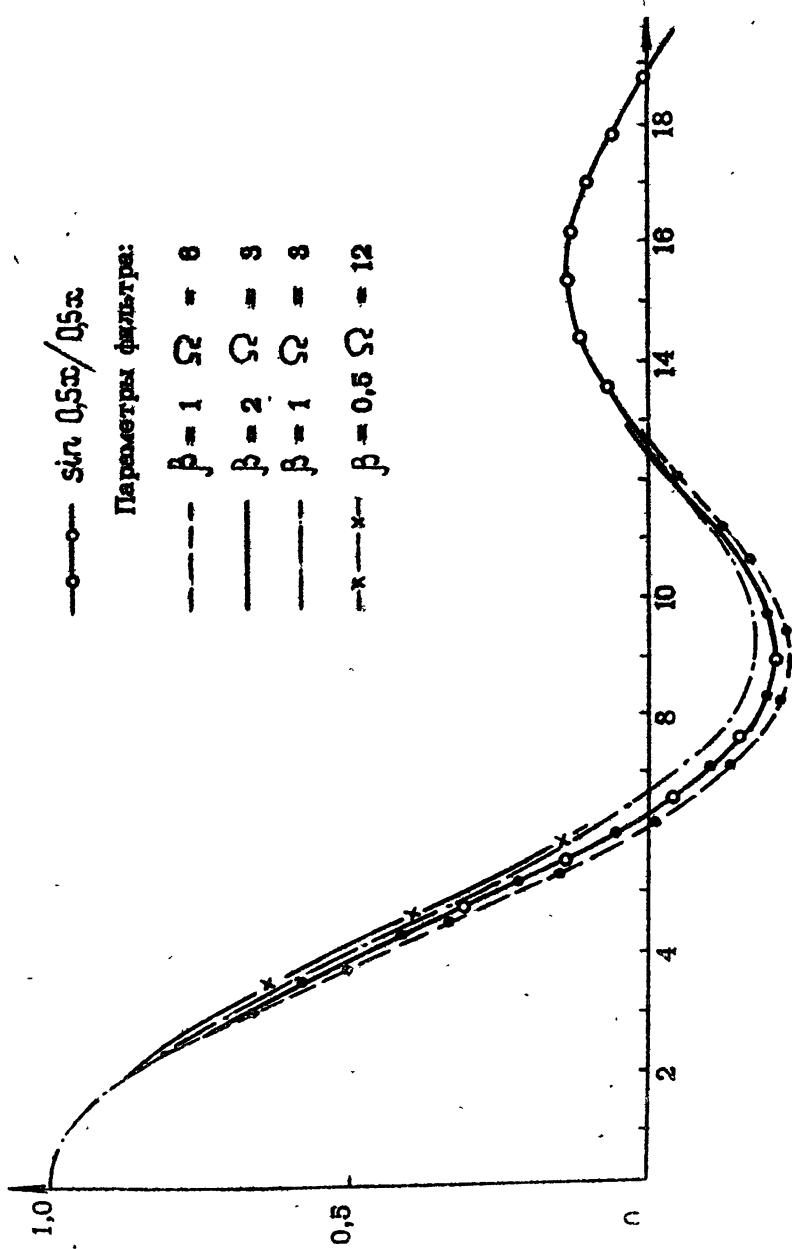


Рис. 2. Вид функции $\sin 0,5x / 0,5x$ и результаты фильтрации

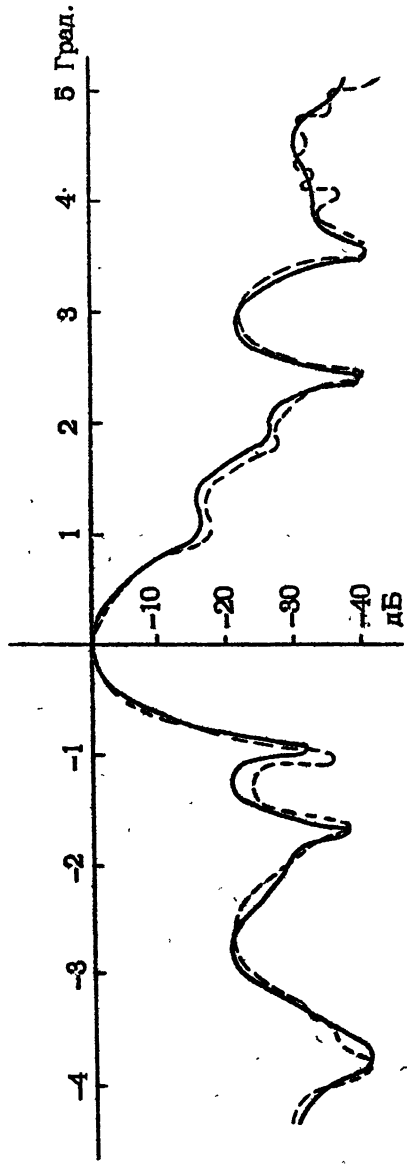


Рис. 3

Амплитудная ДН (—), полученное в результате фильтрации исходных данных (---)

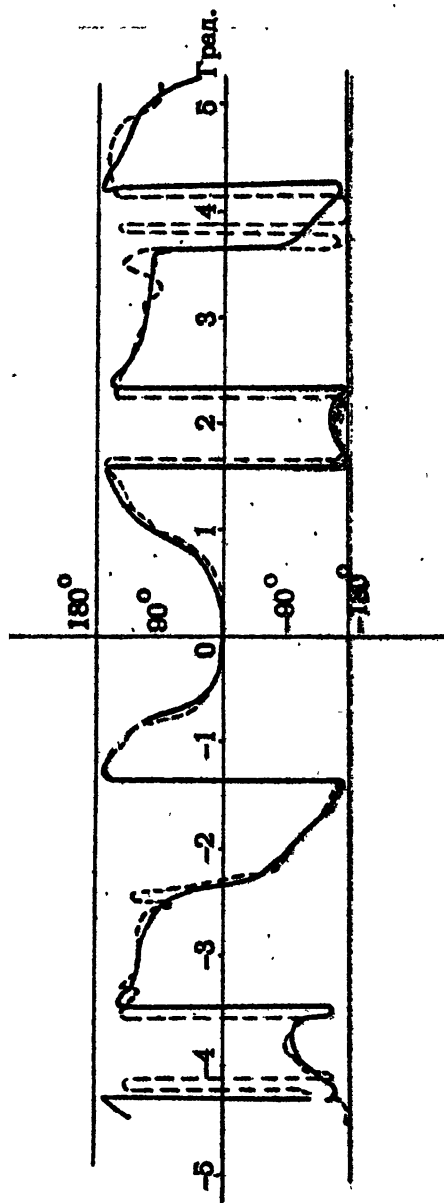


Рис. 7

Фазовая ДН (—), полученная в результате фильтрации исходных данных (---)

данных можно использовать фильтрующую функцию несколько иного вида, чем функция (4), полученная из соотношений (2) и (3). В качестве априорной информации об объекте используем информацию о размерах области, внутри которой располагаются сторонние токи формирующие диаграмму направленности антенны (рис. 5).

Как известно [1, 2], диаграмма направленности антенны связана с излучающими токами $\vec{j}(\vec{x})$ соотношением вида

$$\vec{F}(\vec{x}) = \int_V [\vec{x} [\vec{j}(\vec{x}) \vec{x}]] e^{ik\vec{x}\vec{x}} d\vec{x},$$

где

$$\vec{x} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y + z\vec{e}_z,$$

$$\vec{x} = \xi\vec{e}_x + \eta\vec{e}_y + \zeta\vec{e}_z, \quad (5)$$

$$\xi = \sin \theta \cos \varphi,$$

$$\eta = \sin \theta \sin \varphi,$$

$$\zeta = \cos \theta.$$

Учитывая, что сторонние токи на поверхности антенны заключены внутри цилиндра, имеющего диаметр $2D$ и высоту $2z_0$, легко получить соотношение для "отфильтрованной" диаграммы направленности в следующем виде:

$$\vec{F}(\vec{x}) = \left\{ \frac{\sin(k\zeta z_0)}{k\zeta z_0} \frac{J_1(kD \sin \theta)}{kD \sin \theta} \right\} * \vec{F}^u(\vec{x}), \quad (6)$$

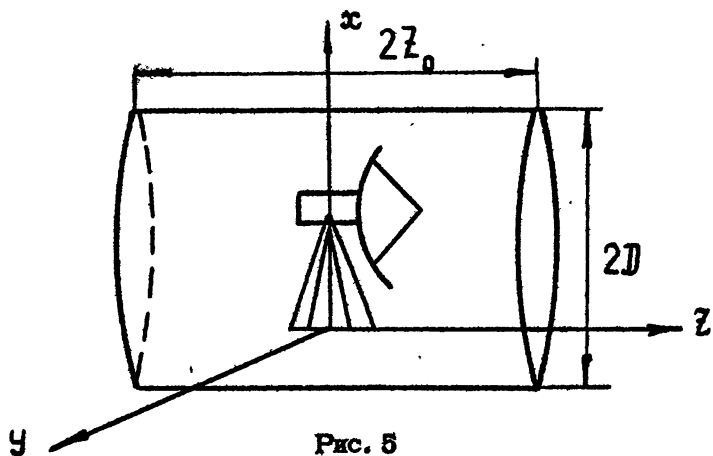


Рис. 5

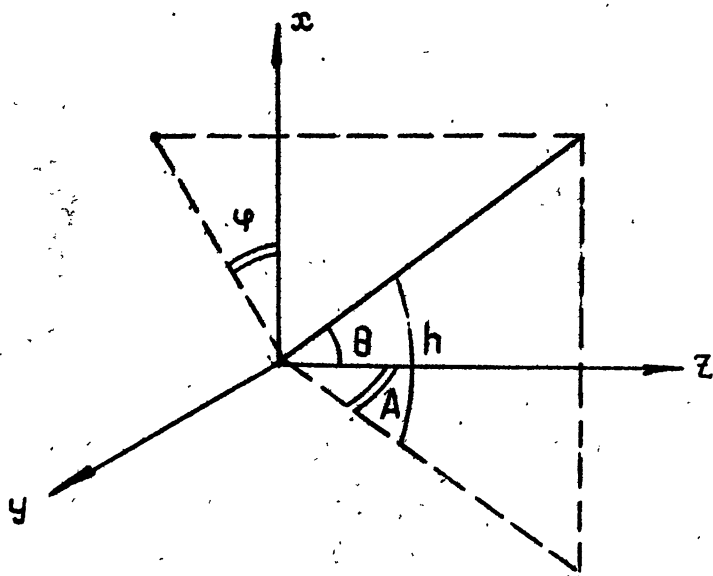


Рис. 6

где $J_1(kD \sin \theta)$ - функция Бесселя первого рода первого порядка.

Используя соотношения сферической тригонометрии, легко получить вид фильтрующей функции в горизонтальной системе координат (рис. 6), связанной с зеркалом антенны. Фильтрующая функция приобретает вид

$$\Phi(h, A) = \frac{\sin(kz_0 \cos h \cos A)}{kz_0 \cos h \cos A} \frac{J_1[kD\sqrt{1-\cos^2 h \cos^2 A}]}{kD\sqrt{1-\cos^2 h \cos^2 A}}, \quad (7)$$

где h и A - высота и азимут точки в диаграмме направленности антенны.

При фильтрации на ЭЦВМ диаграммы направленности, измеренной в широком секторе с целью экономии машинного времени, используют фильтрующую функцию, заданную на ограниченной площади, отбрасывая низкие уровни фильтрующей функции. При этом, при фильтрации данных, находящихся вблизи границы измеренной диаграммы направленности, может возникнуть дополнительная ошибка, связанная с тем, что в этом случае в фильтрации участвует меньшее количество точек исходной диаграммы направленности. Для устранения погрешности фильтрации, вызванной указанной причиной, необходимо вводить нормировку на число точек участвующих в фильтрации (с весовыми коэффициентами). При этом фильтрация осуществляется по формуле:

$$\bar{f}(x_{i,j}) = \frac{\sum_{n,m} \varphi(x_{i,j} - x_{n,m}) \bar{f}(x_{n,m})}{\sum_{n,m} \varphi(x_{i,j} - x_{n,m})} \quad (8)$$

Цифровая фильтрация экспериментальных данных измерения диаграмм направленности антенны, осуществляемая с использованием фильтрующей функции (7) позволяет получить более точный результат по сравнению с фильтрацией, основанной на предположениях об ограниченности размеров поля на раскрыве антенны. Это связано с тем, что при выводе соотношения (7) используется априорная информация об ограниченности пространства занимаемого сторонними токами антенны, что выполняется с высокой степенью точности. Условие ограниченности размеров поля в раскрыве антенны выполняется лишь в геометрикооптическом приближении.

Параметры $2D$ и $2z_0$ в формуле (7) представляют собой геометрические размеры антенны, в случае, если в результате фильтрации необходимо получить диаграмму направленности антенны без учета влияния окружающих предметов. В случае, когда интересуются диаграммой направленности антенны с учетом взаимодействия с окружающими предметами, величины $2D$ и $2z_0$ выбираются таким образом, чтобы указанные предметы попадали в объем $\sim D^2 \times z_0$.

2. Состав аппаратуры для измерений корреляционным методом по радиоизлучению Солнца диаграммы направленности антенны, работающей в диапазоне 10 см

Результаты измерений на частоте 540 МГц показали возможность измерения амплитудной, фазовой и кроссполяризационной диаграммы направленности антенны, входящей в состав действующего интерферометра. Обработка и измерения диаграммы направленности в этом случае опираются и во многом повторяют методику измерений сигнала от космических радиосточников на малобазовом интерферометре. Возможность получения фазовых и поляризационных характеристик, а также расширение динамического диапазона при измерениях диаграммы направленности по излучению внеземных источников свидетельствуют о перспективности применения интерферометрической техники специально для измерения параметров антенн, т.е. фактически для организации антенных измерений на основе корреляционного метода. Такая целенаправленность, естественно, приводит к упрощению состава измерительной аппаратуры и возможности полной автоматизации измерений параметров антенн указанным методом.

Измерение параметров антенн корреляционным методом проводилось в 10-сантиметровом диапазоне на антенне с параболическим зеркалом диаметром 7 метров, установленном на поворотном устройстве с горизонтальной монтировкой. Кассегреновская система облучения состоит из метрового контррефлектора, фокус которого совмещен с фокусом 7-мет-

рового зеркала, и прямоугольного рупора, помещенного в вершину зеркала. Принимаемый сигнал передается от облучателя в технологическое помещение с помощью кабеля РК-75-17-31. Поворотное устройство имеет дистанционное управление, пульт которого размещается в технологическом здании. Поворотное устройство снабжено системой, позволяющей формировать импульсные сигналы, время прихода которых "привязано" к угловому положению направления антенны и которые формируются через каждые 5 угловых минут.

Необходимым условием для реализации корреляционно-го метода измерений диаграмм направленности антенн является наличие вспомогательной антенны. Для измерений характеристик излучения 7-метровой антенны, работающей в 10-сантиметровом диапазоне в качестве вспомогательной использовалась антенна с параболическим зеркалом диаметром 2 м, установленном на экваториальном поворотном устройстве. Сопровождение по часовому углу осуществлялось автоматически, путем установки стабильной скорости вращения зеркала вокруг оси, параллельной оси вращения Земли. В качестве облучателя использовался круглый рупор, соединенный с помощью кабеля РК-75-17-31 с СВЧ блоком, находящимся в технологическом помещении. В состав СВЧ блоков входит параметрический усилитель, а также смеситель и усилитель промежуточной частоты, взятые от серийных приборов П5-16.

Параметрический усилитель состоит из двух каскадов

усилителей, включенных последовательно и записываемых от одного клистронного генератора накачки. Между смесителем и вторым каскадом параметрического усилителя включен вентиль и полосовой фильтр для запирания гетеродина. Коэффициент усиления параметрического усилителя СВЧ блока № 1, подключенного ко входу измеряемой антенны составляет ~ 27 дБ.

Коэффициент усиления параметрического усилителя СВЧ блока № 2, подключенного ко входу вспомогательной антенны составляет ~ 23 дБ. Шумовая температура параметрических усилителей измерялась с помощью измерителя шумовой температуры ПБ-16. Выход ПУ подключается на вход ПБ-16. Затем на вход ПУ подсоединяется либо согласованная нагрузка, либо калиброванный генератор шума. По полученной разнице выходных напряжений легко получить приведенную ко входу шумовую температуру параметрических усилителей. Для СВЧ блока № 1 шумовая температура составляет 560°K , а для СВЧ блока № 2 около 900° .

После усиления параметрическими усилителями сигнал поступает на смеситель, взятый из комплекса серийного прибора ПБ-13. На смеситель подается сигнал гетеродина, в качестве которого используется серийный генератор Г4-80. Частота гетеродина составляет 3030 МГц.

Сигнал промежуточной частоты, полученный в смесителе, поступает на усилитель промежуточной частоты, настроенный на частоту 60 МГц. УПЦ ~~настроен~~ настроен на основе соответ-

ствующего усилителя, применяющегося в приемнике П5-16. Используемый усилитель отличается от серийного тем, что имеет более широкую полосу пропускания за счет уменьшения коэффициента усиления путем расстройки центральной частоты полосы пропускания каскадов усилителя относительно частоты 60 МГц. Сигнал промежуточной частоты поступает на коррелятор, конструкция которого приведена в работе [3]. Между коррелятором и блоком СВЧ включен блок фиксированных фазовых задержек, Блок фиксированных фазовых задержек предназначен для введения задержки $\pm \frac{\pi}{2}$ на любом входе коррелятора. Блок фиксированных фазовых задержек управляется либо от ЭКВМ, либо вручную. Введение задержек $\pm \frac{\pi}{2}$ в тракт сигнала необходимо с целью выявления "паразитной" составляющей сигнала на выходе коррелятора и последующей коррективы при обработке в ЭКВМ. Задержки на $\pm \frac{\pi}{2}$ вводятся в режиме "Калибровка по ПШ" см. п. 2.8. Сигналы $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$ — выходов коррелятора поступают на гетеродинный фильтр, который состоит из двух предварительных усилителей НЧ, двух синхронных интеграторов, двух синхронных детекторов, двух усилителей постоянного тока и одного генератора опорного напряжения, который выдает сигналы модуляции на частоте 1 кГц в виде меандра на коррелятор и на платы синхронного интегратора и синхронного детектора.

Генератор опорного напряжения имеет схему, позволяющую сдвигать по фазе напряжение, выдаваемое на коррелятор и на платы гетеродинного фильтра. Кроме этого напряжение

на синхронный интегратор и синхронный детектор формируется несколько в иной форме, чем напряжение, выдаваемое на коррелятор, а именно: в виде импульсов с регулируемой скважностью меньше единицы, что позволяет уменьшить паразитный сигнал без заметного уменьшения полезного сигнала. Регулировка фазы и скважности опорного напряжения дает возможность произвести настройку гетеродинного фильтра оптимальным образом. Предварительные усилители, установленные на входе гетеродинного фильтра имеют плавную и ступенчатую регулировку усиления, что увеличивает реальный динамический диапазон аппаратуры. Синхронный фильтр и синхронный детектор выполнены на интегральных прерывателях К1УТО11Б. Интегрирующие цепочки синхронных детекторов имеют постоянные времена 1,4, 16 сек. Сигналы с усилителей постоянного тока подаются на вход цифровых вольтметров Ф-210.1. Цифровые вольтметры Ф-210 предназначены для цифровой индикации \cos - и \sin -сигналов, а также для выдачи сигналов в цифровом виде на аппаратуру управления и обработки данных. Блок схема аппаратуры управления и обработки данных приведена на рис. 7. Аппаратура управления и обработки данных создана на базе ЭКВМ "Электроника ДЗ-28". Через специальный блок согласования ЭКВМ связана с датчиком угловых меток, синхронизмометром Ч7-15, двумя самописцами КСП-4, двумя вольтметрами Ф210, блоком фиксированных фазовых задержек. Кроме этого к ЭКВМ подключена печатающая машинка "Консул-260" и перфоратор ПЛ-150 через согласующее ус-

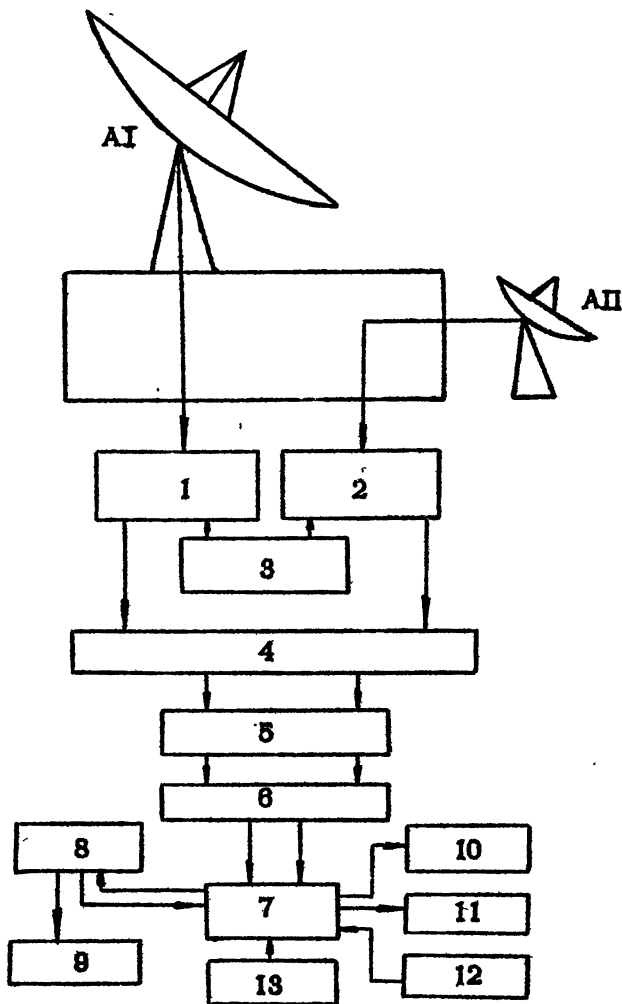


Рис. 7. Состав аппаратуры для измерений в 10 см диапазоне: 1, 2 – блоки СВЧ, 3 – гетеродин, 4 – блок фиксированных фазовых задержек, 5 – коррелятор, 6 – блок гетеродинных фильтров, 7 – блок согласования, 8 – Э К В М "Электроника ДЗ-28", 9 – печатающая машинка "Консул 260", 10, 11 – самописцы КСП-4, 12 – синхронметр Ч7-15, 13 – блок формирования угловых меток.

тройство. Датчик угловых меток выдает при вращении антенны по высоте метки через каждые $5'$. Метки в виде импульсов напряжения используются для запуска цифровых вольтметров Ф210, а также для сигналов прерывания на ЭКВМ. По сигналам прерывания происходит считывание показаний вольтметров и значения времени с цифрового выхода синхронизатора Ч7-15. Цифровые значения показаний вольтметров и времени подаются на блок согласования, который формирует эти значения в виде, необходимом для ввода в ЭКВМ. Кроме этого блок согласования формирует два вида сигналов прерывания, один из которых используется для ввода числовых значений в ЭКВМ, а другой, с использованием секундных меток от синхронизатора Ч7-15 для вывода из ЭКВМ обработанной числовой информации. Выведенная числовая информация в блоке согласования преобразуется с помощью простейшего двухканального преобразователя "код-напряжение" в два аналоговых сигнала, один из которых соответствует фазе, а другой - амплитуде сигнала. Аналоговые сигналы выдаются на два самописца КСП-4, которые в данном случае используются в качестве простейших графопостроителей. ЭКВМ через блок согласования обеспечивает автоматическое включение самописцев в соответствии с заданной программой обработки и выдачу цифровых сигналов на преобразователь "код-напряжение" по прерываниям, получаемым от синхронизатора Ч7-15. Помимо вывода на самописец, обработанная информация выводится на ПМ "Консул-260". Обработанная информация представляет собой амплитуду и

фазу сигнала, результаты калибровок и некоторые вспомогательные данные. Информация, находящаяся в памяти ЭКВМ, выводилась на ленту перфоратора ПЛ-150. Для этого блок согласования отсоединяется и вместо него подключается перфоратор через специальный блок согласования перфоратора с ЭКВМ.

В режиме калибровки ЭКВМ через блок согласования управляет режимом работы блока фиксированных фазовых задержек. В этом режиме блок согласования формирует секундные метки синхронизатора для запуска цифровых вольтметров Ф-210 и для сигналов прерываний на ЭКВМ, по которым происходит считывание значений вольтметров.

3. Методика измерений

В качестве источника радиоизлучения для измерений характеристик направленности 7-метровой антенны, работающей на частоте 3090 МГц, было выбрано Солнце. Угловые размеры Солнца в этом диапазоне составляют величину около $30'$. Конечные угловые размеры радиоисточника накладывают ограничения на величину базы между измеряемой и вспомогательной антенной в соответствии с формулой (28), ч. I. Из формулы (28), ч. I и рисунка 3, ч. I следует, что для увеличения сигнала на выходе корреляционного приемника за счет увеличения величины функции видимости необходимо выбирать базу минимально возможной. В эксперименте расстояние между проекциями антенн в плоскости Земли составляло прибли-

зительно 9 м, разность высот антенн составляла около 5 м. Для этих размеров величина функции видимости равна 0,75, при высоте Солнца 45° . В отличие от обычной схемы интерферометра для приведенных размеров базы нет необходимости в состав аппаратуры вводить линию задержек. Это связано с тем, что раскорреляция сигнала в рассматриваемом случае незначительна и плавное изменение сигнала, вызываемое суточным перемещением радиосточника можно учесть при соответствующей методике измерений. Методика измерений диаграммы направленности корреляционным методом включает следующие режимы работы: "калибровка по ПШ", "калибровка по Солнцу" и "Измерение строки". Рассмотрим подробнее каждый из режимов.

3.1. "Калибровка по ПШ".

Калибровка по генератору шума с известной мощностью проводится с целью выявления и последующего учета при обработке паразитных составляющих сигнала, возникающих в корреляторе. Калибровка проводится с использованием схемы, показанной на рис. 8. Сначала с помощью крановых переключателей на вход СВЧ блоков включаются согласованные нагрузки. После этого ЭКВМ производит N_s считываний. После усреднения считанных значений получаем значения нулей в каждом канале. Обозначим нуль в \cos -канале буквой Q_c , нуль в \sin -канале буквой Q_s . Затем крановые переключатели устанавливаются в положение, подключающее на вход сигнал ПШ, полученный с помощью схемы на рис. 8. После этого про-

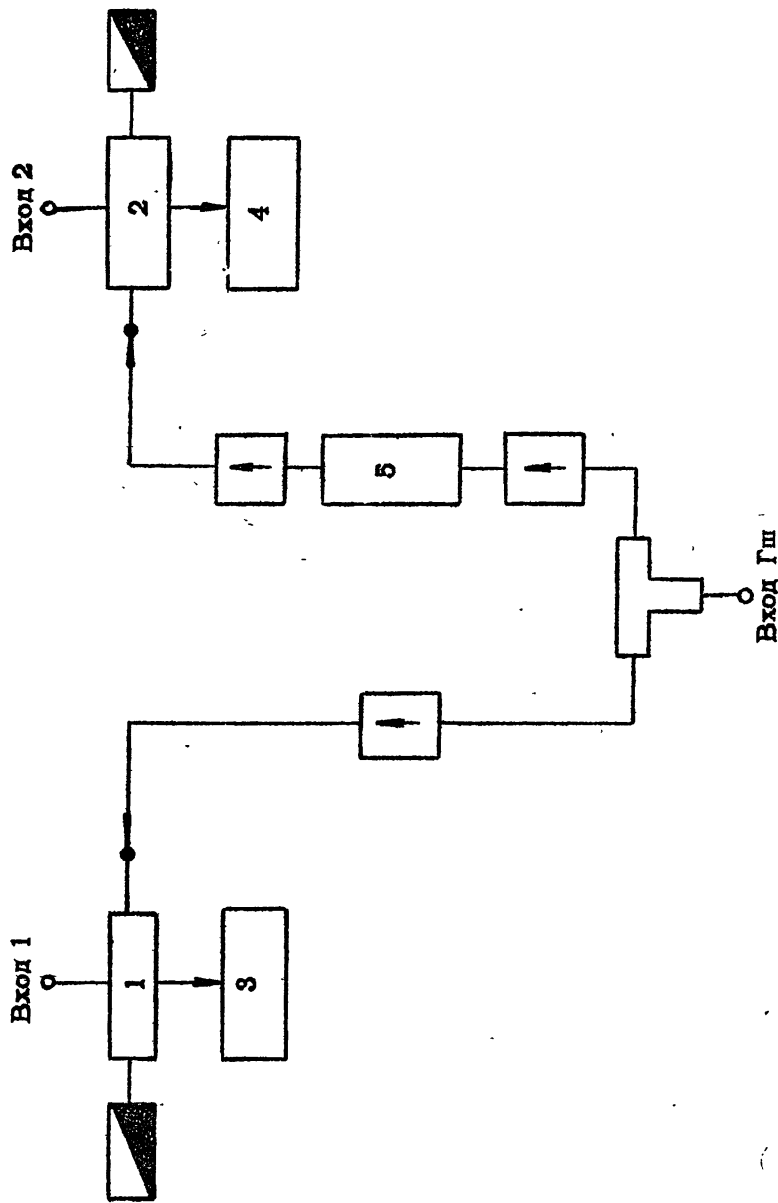


Рис. 8. 1, 2 - крайные переключатели; 3, 4 - СВЧ блоки; 5 - линия переменной длины

изводится N_s считываний выходных значений коррелятора. Каждое считанное значение (обозн. C и S) корректируется по формуле $C'_1 = C - Q_C$; $S'_1 = S - Q_S$, где C' и S' - откорректированные значения. Полученные значения усредняются. Затем в одно из плеч коррелятора вводится фазовая задержка на $\pi/2$ и повторяется предыдущая процедура со считанными значениями. В результате получаем значения, обозн. C'_2 и S'_2 .

Полученные значения используются для вычисления отношения коэффициентов усиления \cos -и \sin -каналов (обознач. d), сдвига фаз между каналами (обознач. $\Delta\varphi$) по следующим формулам:

$$d = \sqrt{\frac{(C'_1)^2 + (C'_2)^2}{(S'_1)^2 + (S'_2)^2}},$$

$$\cos \Delta\varphi = d \frac{C'_1 S'_2 - C'_2 S'_1}{(C'_1)^2 + (C'_2)^2}, \quad (8)$$

$$\sin \Delta\varphi = d \frac{C'_1 S'_1 + C'_2 S'_2}{(C'_1)^2 + (C'_2)^2}.$$

В дальнейшем каждое значение, считанное с цифровых вольтметров коррелятора, подвергается корректировке по формулам.

$$C' = C - Q_C, \quad (10)$$

$$S' = ((S - Q_S) d - C' \sin \Delta\varphi) / \cos \Delta\varphi.$$

3.2. "Калибровка по Солнцу".

Калибровка по Солнцу производится в режиме, когда измеряемая и вспомогательная антенны направлены на Солнце. Рассматриваемая калибровка проводится в начале и конце каждого сечения измеряемой диаграммы направленности. Цель калибровки заключается в получении данных, с помощью которых можно учесть плавные изменения амплитуды сигнала, вызванные различными причинами, а также компенсировании фазового хода интерференционной картинке, вызванного суточным перемещением Солнца и различными плавными уходами разности фаз между каналами.

Калибровка по Солнцу производится следующим образом. Через равные промежутки времени производится N_s считываний цифровых вольтметров. Полученные данные корректируются по формуле (10). По откорректированным значениям выхода \cos - и \sin -каналов вычисляются амплитудное и фазовое значение. Затем вычисляется среднее значение амплитуды, обозн. A_n . С помощью метода наименьших квадратов, N_s полученных значений фазы аппроксимируются отрезком прямой, и для дальнейших вычислений используется средняя точка отрезка прямой в определенный момент времени и тангенс наклона. Эти величины обозначим φ_n, T_n и $\operatorname{tg} \varphi_n$. Аналогичная процедура проводится после окончания измерения сечения диаграммы направленности. В результате этого получаем значения A_k, φ_k в момент времени T_k и тангенс угла наклона отрезка прямой, соответствующей фа-

зовому ходу интерференционной картинке. Значения амплитуды, полученные в момент времени, ограниченные интервалом $\left[T_H, T_K \right]$ при измерениях сечения диаграммы направленности антенны корректируются по формуле:

$$A_{(j)}^{(k)} = A_j \frac{A_{HH}}{A_H + \frac{A_K - A_H}{T_K - T_H} (T_j - T_H)} \quad (11)$$

Значения фазы, относящиеся к вышеприведенному моменту времени, корректируются по формуле:

$$\varphi_{(j)}^{(k)} = \varphi_j - \left[\varphi_H + \frac{\varphi_K - \varphi_H + 2\pi L}{T_K - T_H} (T_j - T_H) \right] \quad (12)$$

где L - число пересечений фазовой кривой интервала 2π .

3.3. Режим "Измерение строки".

В этом режиме запуск вольтметров и считывание информации с них осуществляется по приходу импульсов с блока формирования угловых меток. В момент прихода импульса запуска в блоке согласования вырабатывается сигнал прерывания для ЭКВМ, по которому работа ЭКВМ переводится из программы обработки в программу считывания цифровых значений вольтметров. После считывания показаний вольтметров вычисления координаты Солнца ЭКВМ возвращается к исполнению программы обработки. Обработка считанной информации включает несколько этапов.

Прежде всего считанные значения корректируются в

соответствии с формулами (10). Обработка начинается лишь при наличии одной целиком измеренной строки с имеющимися калибровками по Солнцу в начале и в конце строки. Откорректированные значения \cos -и \sin - канала этой строки подвергаются фильтрации в соответствии с п. 1. В результате этой операции, во-первых, повышается соотношение сигнал/шум по сравнению с единичным замером, а во-вторых, измеренные значения в неравномерной угловой сетке диаграммы направленности интерполируются к равномерной сетке.⁺⁾ Применение фильтрации приводит к тому, что для получения обработанных данных сечения диаграммы направленности в секторе Ψ_0 необходимо проводить измерения в секторе $\Psi_0 + \Omega$, где Ω - ширина фильтрующей функции. Параметры фильтрующей функции известны заранее. Поэтому для вычислений исходной точки установки антенны при измерении сечения диаграммы направленности, достаточно задать сектор и начальную точку для обработанного сечения. Вывод обработанных данных начинается после того, как в блоке памяти ЭКВМ накапливается достаточное количество измеренных данных. После получения первой же отфильтрованной точки в диаграмме направленности происходит ее коррекция в соответствии с формулами (10) и затем вывод на самописцы по сигналам прерывания, полученным с использова-

⁺⁾ Неравномерность отсчетов по углу в сечении диаграммы направленности возникает в результате суточной перемещения Солнца.

нием секундных импульсов синхрометра.

Таким образом, осуществляется обработка, считывание и вывод полученной информации в реальном масштабе времени с использованием двух видов прерываний. При этом во время измерения очередного сечения полной диаграммы направленности осуществляется обработка и вывод на самописцы предыдущего сечения. Во время измерения первого сечения обработка и вывод данных не производится.

В библиотеке программ, разработанных для этих измерений, имеются программы вывода на ПМ "Консул-260" и на самописцы отфильтрованных и исходных значений сечения диаграммы направленности. При измерении двумерной диаграммы направленности отфильтрованные значения выводятся на самописцы, а также запоминаются в ОЗУ ЭКВМ. При этом на ленту ПМ "Консул-260" выводятся следующие данные: время калибровки в начале и в конце строки (обозн. T_H и T_K), высота первой отфильтрованной точки в диаграмме направленности (H_0), шаг выводимых точек (ΔH), параметры фильтрующей функции (Ω и β - см. п. 1), амплитуда и фаза калибровки по Солнцу в начале и конце строки, число вычисленных целых интервалов 2π фазового хода Солнца за время между калибровками, отношение коэффициентов усиления в \sin - и \cos -каналах, параметры неортогональности каналов, величина "нуля" в \sin - и \cos -каналах, дисперсия значений \sin - и \cos -канала, вычисленная по результатам калибровки по ПЦ

4. Экспериментальные результаты

4.1. Результаты измерения параметров коррелятора

В систему калибровок при измерении корреляционным методом входила проверка коррелятора. По результатам калибровок по ПШ получены следующие точностные характеристики коррелятора: неортогональность \sin -и \cos -каналов около 5° , плавный уход нулей каналов около 6 мВ в час, изменение отношения коэффициентов усиления \cos -и \sin -каналов соответствует приблизительно 1% в час.

4.2. Экспериментальные результаты измерения сечений по высоте диаграммы направленности антенны с помощью корреляционного метода.

На рис. 9 приведены три реализации сечений по высоте амплитудной диаграммы направленности, измеренных с помощью корреляционного метода по радионизлучению Солнца. Две из приведенных реализаций измерены в течение одного дня, причем измерение одной реализации следовало за измерением другой. Одна реализация была измерена в предыдущий день. Как следует из рис. 9 все три реализации практически совпадают между собой в главном лепестке. Дисперсия значений амплитуды на уровне 20 дБ находится в пределах 1 дБ, на уровне 30 дБ находится в пределах 3 дБ. Как следует из значений диаграммы направленности в минимумах (рис. 9), реальная чувствительность находится в пределах $-40 + 50$ дБ по диаграмме. Приведенные реализации представляют собой копии диаграмм, снятых с ленты самописца. На рис. 10 приведены три реализации

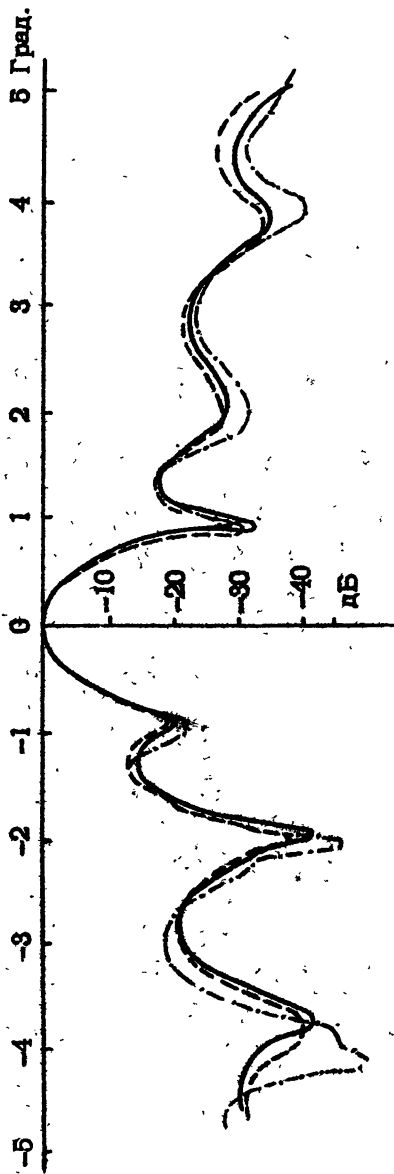


Рис. 9. Три реализации амплитудной диаграммы направленности ($f = 3090$ МГц)

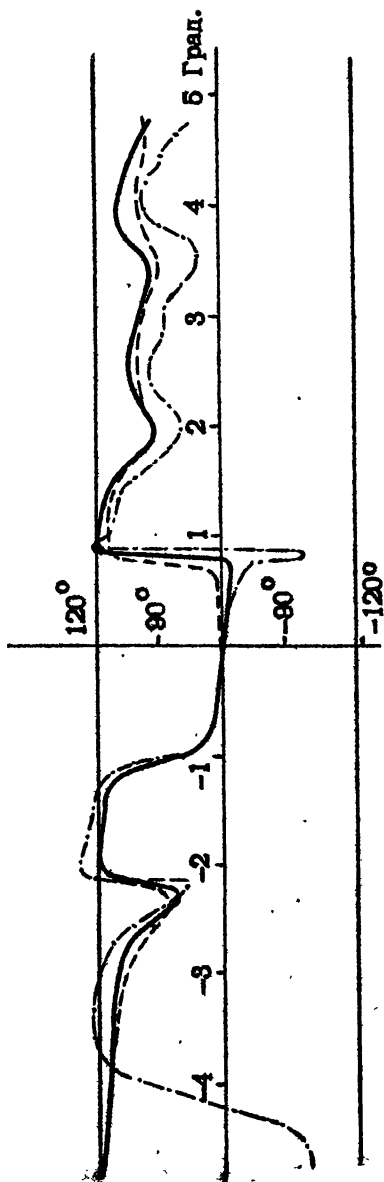


Рис. 10. Три реализации фазовой диаграммы направленности ($f = 3090$ МГц)

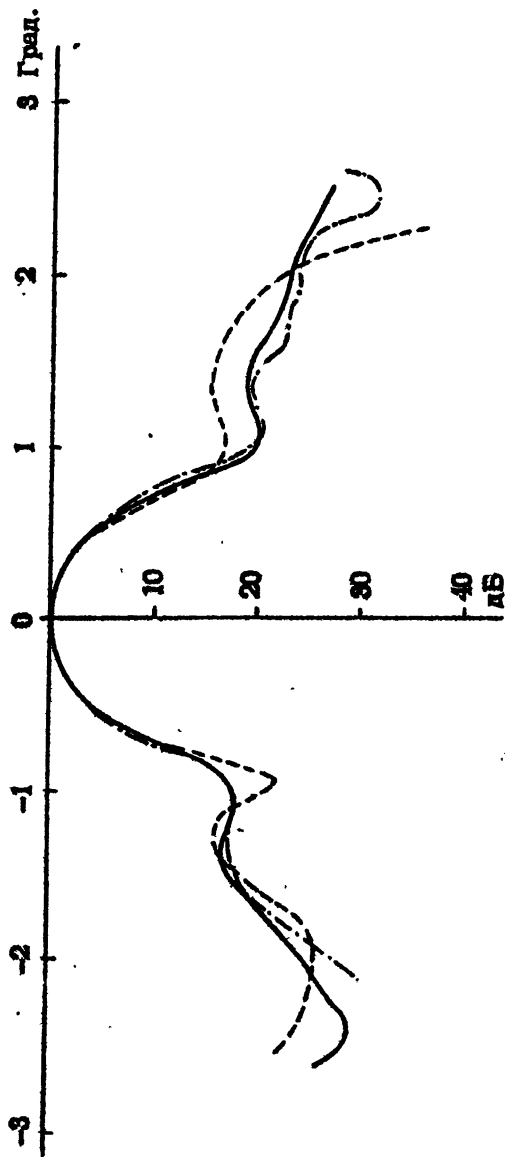


Рис. 11. Две реализации амплитудной диаграммы направленности, измеренные с помощью приемника ПБ-16 (— и ---). Сечение диаграммы направленности, полученной корреляционным методом.

фазовой диаграммы направленности, соответствующие амплитудной на рис. 9. В пределах первых боковых лепестков дисперсия значений фазы находится в пределах 20° , а для вторых и третьих боковых лепестков в пределах 30° .

С целью выявления методических погрешностей проводилось сравнение сечений диаграммы направленности, полученных корреляционным методом прямых измерений по Солнцу с использованием схемы радиометра. На рис. 11 нанесены три графика, два из которых соответствуют сечениям диаграммы направленности, полученным с помощью прямых измерений по Солнцу, использующих схему радиометра, а один соответствует сечению диаграммы направленности, полученному корреляционным методом. Из сравнения графиков видно, что они практически совпадают в пределах главного лепестка и отличаются приблизительно на $2 + 3$ дБ в одном из первых боковых лепестков. Как следует из п. 1 это отличие может быть вызвано ошибками, связанными с обработкой сигнала.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

При измерениях сечений диаграмм направленности антенн, имеющих горизонтальную монтировку, необходимо учитывать некоторые особенности, связанные со сканированием антенны. Например, для измерения азимутального сечения диаграммы направленности только в одной E -плоскости антенны необходимо производить сканирование антенны с горизонтальной монтировкой по двум координатам одновременно. Соотношения, необходимые для сканирования антенн с целью получения равномерной сетки отсчетов значений диаграммы направленности в системе координат, связанной с зеркалом, приведены ниже. (рис. 12).

Соотношения между координатами антенны A, h , координатами источника A_0, h_0 и координатами диаграммы A_1, h_1 .

Координаты задаются в левой системе координат. Ось x направлена на юг, ось y - на запад, ось z - в зенит.

Преобразование координат источника x_0, y_0, z_0 при повороте антенны в точку A, h можно представить как произведение двух преобразований:

Поворот вокруг оси Z на угол A

$$x' = x_0 \cos A + y_0 \sin A,$$

$$y' = -x_0 \sin A + y_0 \cos A,$$

$$z' = z_0,$$

а затем вокруг оси на угол h

(п. 1)

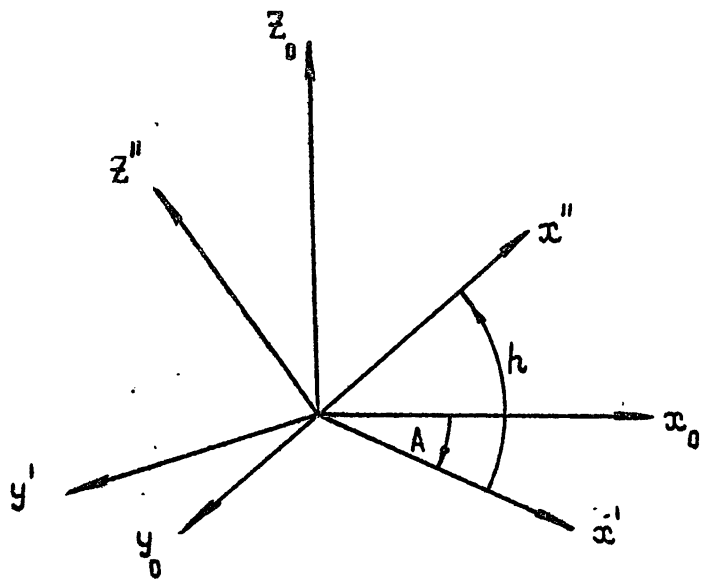


Рис. 12

$$\begin{aligned}
 x'' &= x' \operatorname{cosh} h + z' \operatorname{sinh} h, \\
 y'' &= y', \\
 z'' &= -x' \operatorname{sinh} h + z \operatorname{cosh} h.
 \end{aligned}
 \tag{п.2}$$

Преобразование, обратное преобразованию (2) имеет

вид

$$\begin{aligned}
 x' &= x'' \operatorname{cosh} h - z'' \operatorname{sinh} h, \\
 y' &= y'', \\
 z &= x'' \operatorname{sinh} h + z'' \operatorname{cosh} h.
 \end{aligned}
 \tag{п.3}$$

Приравняв (2) и (3) и учитывая, что

$$\begin{aligned}
 x_0 &= \operatorname{cosh} h_0 \cos A_0, \\
 y_0 &= \operatorname{cosh} h_0 \sin A_0, \\
 z_0 &= \operatorname{sinh} h_0;
 \end{aligned}
 \tag{п.4}$$

$$\begin{aligned}
 x'' &= \operatorname{cosh} h_1 \cos A_1, \\
 y'' &= \operatorname{cosh} h_1 \sin A_1, \\
 z'' &= \operatorname{sinh} h_1,
 \end{aligned}
 \tag{п.5}$$

имеем

$$\cos(A-A_0) \cos h_0 = \cos(h+\varphi) \sqrt{(x'')^2 + (z'')^2},$$

$$-\sin(A-A_0) \cos h_0 = \cos h_1 \sin A_1, \quad (\text{п. 6})$$

$$\sin h_0 = \sin(h+\varphi) \sqrt{(x'')^2 + (z'')^2},$$

где φ можно найти из

$$\cos \varphi = \frac{x''}{\sqrt{(x'')^2 + (z'')^2}}, \quad (\text{п. 7})$$

$$\sin \varphi = \frac{z''}{\sqrt{(x'')^2 + (z'')^2}}.$$

Преобразовав, получим

$$h = \arcsin \frac{\sin h_0}{\sqrt{1 - \cos^2 h_1 \sin^2 A_1}} - \arcsin \frac{\sin h_1}{\sqrt{1 - \cos^2 h_1 \sin^2 A_1}}$$

$$A = A_0 - \arcsin \frac{\cos h_1 \sin A_1}{\cos h_0},$$

при этом должно выполняться

при $A_1 = 0$ из (8) имеем

$$\cos h_1 \cdot \sin A_1 < \cos h_0$$

$$h = h_0 - h_1,$$

$$A = A_0.$$

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Н.А.Есепкина, Д.В.Корольков, Ю.Н.Парийский. Радиотелескопы и радиометры. - М.: Наука, 1973.
2. Н.М.Цейтлин. Антенная техника и радиоастрономия. - М.: Сов. радио, 1976.
3. В.Ф.Засухин и др. - Изв. вузов - Радиофизика, 1976, т.19, № 7, с. 949.

Дата поступления
статьи
3 августа 1981 г.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
1. Цифровая фильтрация результатов измерений диаграммы направленности антенны	3
2. Состав аппаратуры для измерений корреляционным методом по радиоизлучению Солнца диаграммы направленности антенны, работающей в 10 см диапазоне	14
3. Методика измерений	21
4. Экспериментальные результаты	29
5. Приложение	34
6. Литература	38

Виктор Игоревич ТУРЧИН
Вячеслав Савельевич КОРОТКОВ
Андрей Владимирович КАЛИНИН
Николя Вениаминовна ВЕКСЛЕР
Владимир Самуилович БЕАГОН

**КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГРАММ
НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН
ЧАСТЬ II**

Подписано в печать 09.11.81 г. МЦ 00 352. Формат 60x84 1/16
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 2,37 усл. печ. листов
Тираж 120. Заказ 2635. Бесплатно

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский радиопизический институт 603600, Горький ГСП-51,
ул. Лядова 25/14, т. 38-90-91 д. 5-09.

Отпечатано на ротапринте НИРФИ