

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНОГО ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600 ПО H₂O-МАЗЕРАМ

Г. И. Романов, О. В. Треховицкий,* В. Б. Хайкин*

Приведены требования к линейному фазовращателю, предъявляемые при получении радиоголографических изображений. Рассмотрены основные виды искажений восстановленного радиоголографического изображения с учетом влияния паразитных эффектов в фазовращателе. Для оптимизированного фазовращателя типа Реджиа—Спенсера приводятся экспериментальные характеристики, дается оценка спектра фазомодулированного сигнала. Уровень нежелательных составляющих в спектре не превышает -36 дБ, паразитная модуляция потерь менее 0.05 дБ.

Характеристики фазовращателя дают возможность получать хорошее качество восстановления радиоголографических изображений поверхности радиотелескопа РАТАН-600 по H₂O-мазерам.

The requirements to the linear phaser shifter for obtaining radioholographic images of the RATAN-600 radio telescope surface by H₂O masers are presented. The main types of the reconstructural radioholographic image distortions allowing for parasitic effects are considered.

The experimental characteristics of the optimized Reggia—Spenser phase shifter are presented, the estimation for the spectrum of the phase-modulational signal is given too. The level of the undesirable spectral components does not exceed -36 dB, parasitic modulation of the insertion losses is less 0.05 dB.

The phase shifter characteristics give a chance to obtain reconstructed radioholographic images of good quality for the RATAN-600 radio telescope by H₂O masers.

Космические H₂O-мазеры, обладающие большими потоками излучения в узкой полосе и малыми угловыми размерами, позволяют реализовать высокое пространственное разрешение в радиоголографических изображениях поверхности радиотелескопа РАТАН-600. Ранее на радиотелескопе РАТАН-600 высокое разрешение (более двух точек на элемент поверхности) было получено автоколлимационным радиоголографическим методом с внешним опорным сигналом [2]. Достижение в радиоголографических изображениях по H₂O-мазерам точности восстановления поверхности ~ 100 мкм, полученной в автоколлимационных радиоголографических измерениях [1, 3], даст возможность проводить быструю юстировку радиотелескопа в рабочем положении антенны [4].

Получение радиоголографических изображений по H₂O-мазерам. Отношение сигнал / шум (С/Ш) ≈ 40 дБ в радиоголографической записи по мазерному источнику Орион-KL (максимальная плотность потока $2 \cdot 10^6$ Ян) достижимо при использовании 2-м зеркала для получения опорного сигнала и фазопереклю-чающего приемника Райла [5]. При ограничении размера действующей апер-туры РАТАН-600 это позволит получать разрешение до одной и более точек на полноповоротный элемент поверхности радиотелескопа.

Фазопереклю-чающий приемник мазерного излучения на волне $\lambda = 1.35$ см может быть реализован на базе приемника модуляционного типа (с «пилот сигналом» [7]) с полосой $\Delta F = 30 \div 40$ кГц и $T_{\text{сист}} \approx 250$ К. С этой целью входная часть приемника выполняется по двухканальной схеме. В одной из каналов (основном) устанавливается модулятор фазы $0^\circ/180^\circ$, управляемый опорным напряжением синхронного детектора. Сигналы обоих каналов смешиваются

* Ленинградский научно-исследовательский институт «ДОМЕН».

с помощью двойного T -моста или гибридного кольца, и суммарный (разностный при фазе 180° модулятора $0^\circ/180^\circ$) сигнал поступает на вход малошумящего усилителя (МШУ).

Чувствительность схемы приема с переключением фазы $0^\circ/180^\circ$ в 2 раза ниже, чем у корреляционного интерферометрического приемника, так как выходной сигнал получаем на частоте модуляции фазы основного канала. Для увеличения отношения С/Ш в радиоголографической записи целесообразно иметь фазостабильные МШУ в обоих СВЧ-каналах.

Схема записи радиоголограммы по космическому источнику на радиотелескопе РАТАН-600 показана на рис. 1.

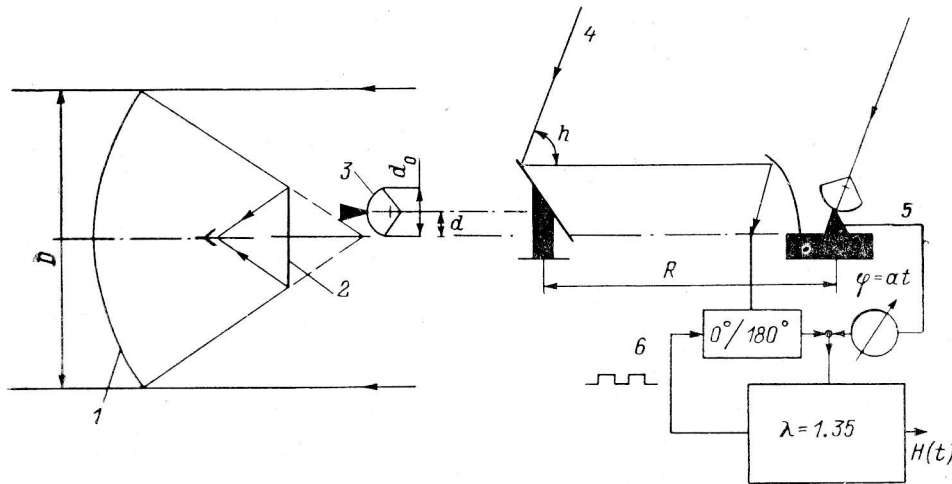


Рис. 1. Схема радиоголографической записи по космическому источнику на радиотелескопе РАТАН-600.

1 — главное зеркало РАТАН-600; 2 — вторичное зеркало РАТАН-600; 3 — опорная антенна; 4 — источник; 5 — опорный канал; 6 — основной канал; 7 — приемник. Опорная антенна неподвижна или сопровождает источник в режиме прохождения наблюдаемого источника через неподвижную диаграмму направленности (д. н.) радиотелескопа. D , d_0 — размеры действующих апертур; d — поперечное разнесение осей главного и опорного зеркал; R — расстояние между антеннами; $\tau = (R/C) \cos h$ — задержка времени прихода плосковолнового фронта от источника на измеряемое и опорное зеркало; C — скорость света.

Фазовращатель, введенный в тракт опорного канала радиоголографической записи, дает линейный во времени сдвиг фазы опорной волны. Это позволяет без искажений выделить действительное радиоголографическое изображение широкоугольной апертуры радиотелескопа в случае, когда опорная антенна находится в пределах действующей апертуры

$$d \ll \frac{D}{2} \left(1 + \frac{d_0}{D} \right).$$

Используемый способ записи радиоголограммы эквивалентен методу получения внеосевой оптической голограммы Лейта и Упатника [8].

Для схемы, показанной на рис. 1, одномерная радиоголограмма по космическому источнику во время его кульминации может быть записана как функция часового угла источника:

$$H(\alpha) = \dot{F}_O^*(\alpha) \dot{F}_A(\alpha) e^{-j\alpha\alpha} + \dot{F}_O(\alpha) \dot{F}_A(\alpha) e^{j\alpha\alpha}, \quad (1)$$

где $H(\alpha)$ — радиоголограмма на выходе квадратичного детектора; $\dot{F}_A(\alpha)$ — одномерная комплексная диаграмма направленности (д. н.) по полю радиотелескопа. Для РАТАН-600 это отклик в фокусе радиотелескопа на точечный космический источник, проходящий через центральное сечение «ножевой» д. н.; $\dot{F}_O(\alpha)$ — одномерная комплексная д. н. опорной антенны; α — крутизна линейного сдвига фазы опорной волны, град. фазы / град. дуги; α — часовой угол источника, град. дуги.

В (1) мощностной член вида

$$|\dot{F}_A(x)|^2 + |\dot{F}_O(x)|^2,$$

характерный для простого сложения основной и опорной волны и последующего детектирования, отсутствует, и измеряется сразу взаимокорреляционная функция двух сигналов с интервалом корреляции

$$\tau_{\text{кор}} = \frac{R}{C} (1 + \cos h),$$

где $\tau_{\text{кор}} < \tau_{\text{и}}$ — времени когерентности мазерного излучения, равного $1/\Delta F$ (ΔF — полоса излучения лазера). Это ведет к устранению из спектра радиоголограммы автокорреляционных функций вида

$$\dot{E}_A(y/\lambda) \otimes \dot{E}_A^*(y/\lambda); \quad \dot{E}_O(y'/\lambda) \otimes \dot{E}_O^*(y'/\lambda),$$

где $\dot{E}_A(y/\lambda)$ — поле на апертуре РАТАН-600; $\dot{E}_O(y'/\lambda)$ — поле на апертуре опорного зеркала; y, y' — координаты в плоскости апертуры обоих зеркал; \otimes — операция свертки.

В результате уменьшается необходимый динамический диапазон записи, что при сохранении разрядности АЦП повышает точность регистрации и восстановления радиоголограмм. Одновременно увеличивается точность восстановленного изображения,^{1*} если она ограничивается влиянием «хвостов» автокорреляционной функции.^{2**}

Одномерное распределение поля в плоскости апертуры, полученное в результате Фурье-преобразования вида

$$\tilde{F}\{H(u)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} H(u) \exp\left(2\pi j \frac{y_\sigma}{\lambda} u\right) du,$$

приведено на рис. 2. В двумерном случае Фурье-преобразование имеет вид

$$\tilde{F}\{H(v, u)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(v, u) \exp\left[2\pi j \left(v \frac{x_\sigma}{\lambda} + u \frac{y_\sigma}{\lambda}\right)\right] dv du,$$

где v, u — координаты источника в прямоугольной системе с центром в точке $O(v_0, u_0)$; x_σ, y_σ — прямоугольные координаты в плоскости апертуры σ .

Если O — точка кульминации выбранного (склонение δ_0) источника на небесной сфере, то вблизи кульминации $u \approx \alpha$ (область малых позиционных углов источника) и $v = \sin \theta \approx \theta$, где θ — угол возвышения оси д. н. над точкой O или возвышение над точкой O точки кульминации источника с $\delta \neq \delta_0$. В первом случае требуется многократное прохождение одним источником точки кульминации, во втором — наблюдение нескольких источников с близкими склонениями и прямыми восхождениями, например мазерных источников Орион-KL, W49, W51 и др. С учетом различных условий наблюдения в моменты кульминации источника или различий в величинах потоков источников элементы полученной в процессе измерений $u-v$ матрицы соответствующим образом взвешиваются.

Двумерная радиоголограмма $H(v, u)$ и восстановленное по ней поле на апертуре σ радиотелескопа $\dot{E}_A(x_\sigma/\lambda, y_\sigma/\lambda)$ при достаточном разрешении по координатам x_σ, y_σ позволяет определить три независимые координаты установки элемента поверхности: радиус, азимут и угол места. При избыточном разрешении по обоим координатам можно определять топографию отдельного элемента (панели).

Далее для упрощения анализа восстановленного изображения при линейном сдвиге фазы будет рассматриваться только одномерный случай.

^{1*} Под увеличением точности изображения будем понимать уменьшение ошибки между восстановленной и фактической фазой (амплитудой) поля.

^{2**} Здесь предполагается, что основное изображение и автокорреляционная функция разнесены в спектральной области, иначе исправить изображение обычно не удастся.

Искажения радиоголографических изображений. Искажение восстановленного изображения, которое демонстрируется на рис. 2, не может быть исправлено в процессе обработки применением различных методов фильтрации. Тот или иной способ выделения изображений должен быть заложен в процесс получения радиоголограммы. Наиболее естественным является интерферометрический способ радиоголографической записи [6], где разнос антенн препятствует наложению изображений. Другой способ состоит в записи квадратурных составляющих радиоголограммы, при котором восстанавливаются непосредственно амплитуда и фаза измеряемого поля в фокусе радиотелескопа [1]. Это позволяет устранить неоднозначность в определении поля на апертуре, но ценой расширения необходимого динамического диапазона записи или потери чувствительности. В [2] разделение изображений достигается выбором опорного элемента поверхности за пределами измеряемой апертуры. Линейный сдвиг фазы (опорного поля) позволяет выделить неискаженное действительное изображение при

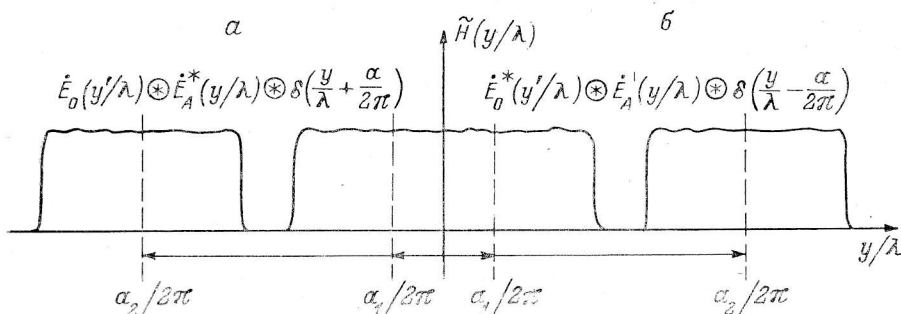


Рис. 2. Одномерное распределение поля в плоскости апертуры.

Изображение: *a* — мнимое, *b* — действительное. Эффект искажения и разделения изображений демонстрируется выбором $a_1 < a_{\min}$ и $a_2 > a_{\min}$, где $a_{\min} = D/(2\lambda)$.

$a > a_{\min}$ (рис. 2). Искажения, связанные с наложением на основное изображение автокорреляционной функции, подробно не рассматриваются, так как предполагается, что она устраняется из спектра радиоголограммы при выбранном способе записи.

Рассмотренный первый вид искажений восстановленного изображения является основным, но существуют и другие виды искажений, без учета которых нельзя получить качественные радиоголографические изображения. Важно также, что их уровень накладывает верхние ограничения на требования к самому линейному сдвигу фазы, и дальнейшее улучшение качества изображений невозможно только в результате снижения погрешностей линейного фазовращателя.

Второй вид искажений — сглаживание восстановленного поля на апертуре основного зеркала с окном порядка размера апертуры опорного. Форма полосы пропускания сглаживающего фильтра определяется характером распределения поля на опорном зеркале. Эффект проявляется при отсутствии сопровождения наблюдаемого источника опорной антенной и наличии ошибок сопровождения во времени записи радиоголограммы. Он накладывает ограничения по разрешению в восстановленном изображении.

Третий вид искажений обусловлен ограничением области измерения радиоголограммы, что всегда имеет место в эксперименте. С ним связан ряд особенностей восстановленного изображения. Ограничение области измерений размером Δa приводит к потере высших пространственных гармоник в радиоголограмме (внешних боковых лепестков). Фурье-преобразование в этом случае заменяется усеченным преобразованием Фурье, а аналитический вид изображения усложняется сверткой поля на апертуре с функцией вида

$$\frac{\sin \Delta a \pi \frac{y_\sigma}{\lambda}}{\pi \frac{y_\sigma}{\lambda}}$$

От дельта-функции $\delta(y_\sigma/\lambda \pm a/2\pi)$ ($|\Delta u| \rightarrow \infty$, рис. 2) переходим к функции

$$\frac{\sin \Delta z \pi \left(\frac{y_\sigma}{\lambda} \pm \frac{a}{2\pi} \right)}{\pi \left(\frac{y_\sigma}{\lambda} \pm \frac{a}{2\pi} \right)}$$

Для случая сопровождения наблюдаемого источника опорной антенной восстановленное поле на апертуре имеет вид

$$\tilde{E}_A(y_\sigma/\lambda) \sim \left\{ E_A(y_\sigma/\lambda) \otimes \frac{\sin \Delta z \pi \frac{y_\sigma}{\lambda}}{\pi \frac{y_\sigma}{\lambda}} \right\} \otimes \frac{\sin \Delta z \pi \left(\frac{y_\sigma}{\lambda} - \frac{a}{2\pi} \right)}{\pi \left(\frac{y_\sigma}{\lambda} - \frac{a}{2\pi} \right)}$$

Это приведет к появлению выбросов Гиббса в восстановленном изображении в точках разрыва исходной функции распределения поля на апертуре, что вызовет искажения восстановленного поля на масштабах порядка одного элемента поверхности, расширению размера восстановленной или «видимой» апертуры,

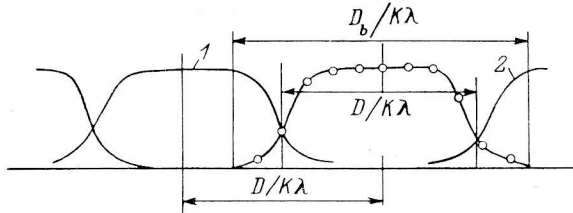


Рис. 3. Наложение смещенных спектров (1, 2) ДПФ при восстановлении изображения и $K \leq 1$, удовлетворяющем критерию Найквиста.

Для избежания искажений, связанных с перекрытием смещенных спектров выбирают $K < D/D_b$ и $K=0.5-1$.

появлению неопределенности в положении изображения. Отмеченные особенности важны с точки зрения принципиальных ограничений на точность и фактическое разрешение в восстановленном изображении. Переход от исходного пространственного размера апертуры D/λ к восстановленному D_b/λ требует соответственного увеличения крутизны линейного сдвига фазы a при записи радиоголограммы ($a > a_{\min}$).

Наконец, четвертый вид искажений, на котором здесь следует остановиться, связан с процедурой нахождения преобразования Фурье. Практически Фурье-преобразование вычисляют с помощью аппарата дискретных преобразований Фурье (ДПФ). При дискретизации голограммы интервал между отсчетами $K\lambda/D$ ($K=0.5-1$). Полное число отсчетов $M=N/K$ соответствует угловой области $\Delta\alpha=N\lambda/D$, где N — число независимых отсчетов, определяемое из требуемого пространственного разрешения Δy и $N=D/\Delta y$. В области спектра ДПФ N/K точек с интервалом $D/(K\lambda M)$ покрывают область $D/(K\lambda)$. На N/K точек разнесены и центры смещенных спектров ДПФ. Поле вне апертуры размером D не равно 0 из-за характера облучения основного зеркала и расширения размера восстановленной апертуры. Для избежания искажений, вызванных перекрытием смещенных спектров ДПФ (рис. 3) снижают K до 0.5 и ниже, что уменьшает относительный размер изображения и увеличивает разнос смещенных спектров. Аналогично при нахождении ДПФ от распределения поля на апертуре для избежания искажений восстановленного поля в фокальной плоскости радиотелескопа расширяют массив с помощью «нулевых» отсчетов. Дополнение измеренной радиоголограммы «нулевыми» отсчетами до $M' > M$ без улучшения разрешения уменьшает интервал между точками спектра $D/(K\lambda M')$ и увеличивает размер изображения с MK до $M'K$ точек. Соответственно расширяются границы спектра, и относительный размер изображения сохраняется.

Оценим теперь влияние паразитных эффектов в фазовращателе на качество радиоголографических изображений.

Требования к линейному сдвигу фазы и паразитные эффекты в фазовращателе. Выше отмечалось, что отсутствие в спектре радиоголограммы автокорреляционной функции повышает точность восстановленного изображения. Однако подавление автокорреляционной функции может быть неполным. Так,

из-за фазовых погрешностей или паразитных эффектов модулятора $0^\circ/180^\circ$ (ошибка в установке фазы или амплитудная модуляция при переключении фазы) в восстановленном спектре может присутствовать остаточная автокорреляционная функция с пространственным размером $2D/\lambda$. Это обстоятельство требует выбора $a = a_{opt} = 3a_{min}$.

В случае $a = a_{opt}$ нет опасности наложения высших изображений на основное. «Высшие» изображения (в отличие от смещенных спектров ДПФ) могут возникать на кратных частотах линейного сдвига фазы из-за паразитных эффектов в фазовращателе. Их перекрытие с основным приведет к дополнительным искажениям восстановленного изображения (рис. 4, а). На рис. 4, б демонстрируется разделение основного и дополнительных (высших) изображений, а также остаточной автокорреляционной функции.

Таким образом, линейный сдвиг фазы опорной волны при $a \geq a_{opt}$ позволяет отделить действительное изображение от мнимого (рис. 2), а основное изобра-

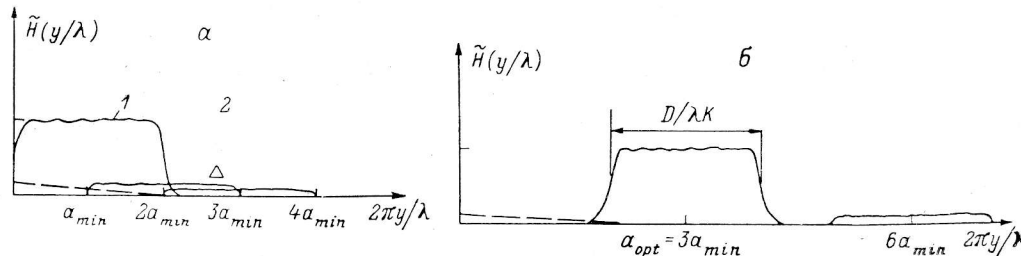


Рис. 4. Наложение изображений: основного (1), высших (2) и остаточной автокорреляционной функции (АК) (3) при $a < a_{opt}$ (а) и разделение изображений при $a > a_{opt}$ (б).

Уровень Δ определяется величиной кратных гармоник в спектре фазомодулированного сигнала.

жение от остаточной автокорреляционной функции и высших изображений, вызванных неидеальностью модулятора фазы $0^\circ/180^\circ$ и самого линейного сдвига (рис. 4, б). К сожалению, выбор $a \geq a_{opt}$ практически затруднен, так как требует соответственного уменьшения постоянной времени выходного фильтра τ_f во времени записи радиоголограммы. Точность радиоголографических измерений прямо пропорциональна величине C/Π [6], и необходимое уменьшение τ_f ведет к потере точности восстановленного изображения в $\sqrt{3}$ раз. Поэтому в условиях ограниченного отношения C/Π в радиоголографических измерениях по космическим источникам практически всегда следует добиваться снижения уровня паразитных эффектов в фазовращателе.

Назовем основные паразитные эффекты, возникающие в линейном фазовращателе: нестабильность сдвига фазы (1), модуляция вносимых потерь, КСВН и амплитуды сигнала (2), нелинейность фазовой характеристики (3), модуляция фазы при плохом КСВН устройства (4). К паразитным эффектам следует отнести и специфические, связанные с линейно-периодическим сдвигом фазы, о котором речь пойдет ниже: неточность установки амплитуды изменения фазы (5) и конечность обратного хода линейно-периодического изменения фазы (6). Эффекты (4—6) будут количественно оценены при рассмотрении особенностей получения линейно-периодического сдвига фазы. Указанные паразитные эффекты, кроме (2), являются фазовыми. (3—6) приведут к появлению в спектре линейно-периодически модулированного по фазе сигнала гармоник, кратных основной частоте сдвига (боковые полосы). Это снизит точность восстановленного изображения, так как приведет к появлению высших изображений и возможности их наложения на основное. Временная нестабильность (например, температурный дрейф фазы или медленные изменения крутизны сдвига) — наиболее опасный из фазовых паразитных эффектов. В ферритовых фазовращателях, которые мы использовали для получения линейного сдвига фазы, он может быть вызван: нестабильностью тока управления магнитным полем, температурной нестабильностью феррита и влиянием внешних магнитных полей. Эффект (1) приведет к появлению в спектре фазомодулированного сигнала дополнительных гармоник вблизи основной и кратных частот при

периодическом или случайном характере неустойчивости. По аналогии с внеосевой оптической голограммой здесь можно говорить о вариациях наклона плосковолнового фронта опорной волны и об интерференции основных изображений. Это, очевидно, ухудшит разрешение, как в случае «дрожания» изображения в оптике. Эффекты (2) относятся к амплитудным паразитным эффектам и различаются лишь характерными периодами модуляции. Опасность амплитудных паразитных эффектов в том, что они могут привести к искажению пространственных масштабов в изображении из-за модуляции огибающей голограммы. Крупномасштабная или мелкомасштабная ошибка появится в изображении при искажении соответственно низших или высших пространственных частот в голограмме. Фильтрация паразитной амплитудной модуляции может быть затруднена ее аperiodичностью или близостью частоты модуляции (биений) к частоте основной гармоники. Отмеченный эффект вызовет снижение точности изображения на соответствующих масштабах.

К амплитудным и фазовым паразитным эффектам приведет и высокий КСВН фазовращателя. Развязка K_p между основным и опорным каналами радиоголографической записи обычно не превышает 20—25 дБ. Основная волна в опорном канале эквивалентна паразитному сигналу: отразившись от входа взаимного фазовращателя она приобретет двойной фазовый сдвиг. Отношение амплитуд волн основного и опорного каналов $K_s = \sqrt{S_{\text{осн}}/S_{\text{оп}}}$, где $S_{\text{осн}}$, $S_{\text{оп}}$ — эффективные площади обоих зеркал. Для РАТАН-600 и 2-м опорного зеркала величины K_p и K_s соизмеримы, и паразитного эффекта можно ожидать на уровне коэффициента отражения от входа фазовращателя Γ . При КСВН=1.22 уровень паразитного сигнала в опорном канале $\sim \Gamma = 10\%$. Очевидно, установкой вентилей с хорошим КСВН в опорный канал можно снизить указанный эффект для основной волны. Однако для волны опорного канала он неустраним, и в результате переотражения волна может приобретать двойной (или большей кратности) фазовый сдвиг. Это приведет к появлению дополнительного изображения на двойной (кратной) частоте или паразитной амплитудной модуляции (биений) и искажению основного изображения.

Опасность паразитных эффектов в фазовращателе, включенном в схему радиоголографической записи, усугубляется тем, что они появляются не как аддитивный шум, а как мультипликативная помеха, и качество радиоголографических изображений будет зависеть от отношения сигнал / помеха (С/П). Если величина С/П повышается при увеличении сигнала и начинает насыщаться только при большом сигнале, то отношение С/П может оставаться неизменным при любом сигнале. В этом смысле оба канала радиоголографической записи являются эквивалентными для установки фазовращателя, вызывающего паразитные эффекты. Однако полезная амплитудная модуляция сигнала в основном канале способствует появлению паразитной амплитудной модуляции (биений) при неидеальном сдвиге фазы. Кроме того, паразитная амплитудная модуляция в опорном канале может быть устранена ограничением сигнала по амплитуде, например, в МШУ до смещения его с основным сигналом.

Основные выводы из данной части работы:

- 1) при реализации конкретной схемы фазовращателя следует обратить особое внимание на уровень паразитных эффектов;
- 2) наиболее опасными из паразитных эффектов являются неустойчивость сдвига фазы и паразитная амплитудная модуляция;
- 3) наложения высших изображений, связанных с паразитными эффектами, можно избежать выбором $a \geq a_{\text{opt}}$ (необходим запас по С/Ш);
- 4) фазовращатель для линейного сдвига фазы целесообразно устанавливать в опорный канал радиоголографической записи.

В заключение рассмотрения требований к линейному фазовращателю заметим, что узкополосность лазерного излучения ($\Delta F/F \approx 10^{-6}$) облегчает достижение необходимых параметров: КСВН, линейности, уровня модуляции потерь, равномерности ФЧХ и др. В этом состоит специфичность создаваемого устройства. Например, такой параметр, как равномерность ФЧХ фазовращателя, может серьезно сказаться на качестве радиоголографических изображений

и сделать проблему создания широкополосных устройств такого типа и перехода к другому классу излучающих объектов неразрешимой.

Оценка крутизны линейного сдвига и периода модуляции фазы. Оценим диапазон возможных значений крутизны линейного сдвига фазы и периода модуляции на волне $\lambda = 1.35$ см для различных размеров действующей апертуры РАТАН-600: $D_1 \approx 400$ м (один сектор РАТАН-600 — 225 элементов поверхности); $D \approx 140$ м (3 группы — 75 элементов поверхности), $D_3 \approx 50$ м (группа — 25 элементов поверхности). Имеем:

$$\frac{a_{\min}}{2\pi} = \frac{D}{2\lambda} \rightarrow a_{\min 1} \approx 93 \cdot 10^3 \text{ град. фазы/град. дуги.}$$

Для источника Орион-KL ($\delta = -5^\circ 24' 28''$) горизонтальная скорость движения вблизи кульминации

$$v_{\text{и}}^{\text{Ори}} = 15 \cos \delta \approx 15 \text{ град. дуги/ч.}$$

Получаем оценку a , град, фазы/с:

$$a_{\min 1} \approx 400; \quad a_{\min 2} \approx 140; \quad a_{\min 3} \approx 50.$$

С учетом $a_{\text{опт}} a = 50 \div 1200$ град. фазы/с.

Максимально возможная постоянная времени выходного фильтра τ_{\max} определяется требованием сохранения пропорций низших пространственных частот в радиоголограмме, от которых зависит точность восстановления масштабов порядка размера апертуры D/λ в изображении. При линейном сдвиге фазы τ_{\max} определяется максимальным периодом сдвига фазы $T_{\max} = 360^\circ / a_{\min}$:

$$\tau_{\max} = \frac{\Delta t}{2 \div 3} = \frac{T_{\max}}{2 \cdot (2 \div 3)},$$

где Δt — интервал между отсчетами.

Для $a_{\min 1} = 400$ град. фазы/с $\tau_{\max 1} = 0.15 \div 0.22$ с. Аналогично:

$$\tau_{\max 2} = 0.6 \div 1 \text{ с}; \quad \tau_{\max 3} = 1.6 \div 2.4 \text{ с.}$$

Для $D \approx 400$ м необходимо уточнить $\tau_{\max 1}$ с учетом спадающего распределения поля в раскрыве. Распределению поля вида:

$$E = E_0 \cos^2\left(\frac{\pi y}{D}\right)$$

соответствует полуширина д. н. $\Delta\varphi_{0.5} \approx 1.45 \lambda/D$ и $\tau_{\max 1} \approx 0.2 \div 0.3$ с.

В случае $a = na_{\min}$, где $n \geq 1$ и $a_{\min} = \pi D/\lambda$,

$$T_{\text{мод}} = \frac{360^\circ \lambda}{\pi n D v_{\text{и}}} [\text{с}],$$

где $v_{\text{и}}$ — скорость источника вблизи кульминации в градусах дуги на секунду. Диапазон возможных периодов модуляции фазы для различных D и n равен $T_{\text{мод}} = 0.3 \div 7$ с.

Характерный период в радиоголограмме

$$T_{\text{гол}} = 2 \frac{\lambda}{D v_{\text{и}}} \frac{180^\circ}{\pi} [\text{с}].$$

Соотношение периодов:

$$\frac{T_{\text{гол}}}{T_{\text{мод}}} = n.$$

Вид радиоголограммы для $n=3$ ($a = a_{\text{опт}}$) показан на рис. 5.

Замена линейного сдвига фазы линейно-периодическим. Для упрощения задачи получения линейного сдвига фазы заменим его линейно-периодическим с $\tau_2 \ll T_{\text{и}}$ (рис. 6) и $\Delta\varphi = 0 \div 360^\circ$.

Спектр колебания, показанного на рис. 6, дискретный и содержит две последовательности гармоник с амплитудами A_n, B_n (рис. 7) [9]:

$$A_n(\omega_1 \pm n\Omega) = \frac{\Omega}{\pi} \frac{\sin[\omega_1 - (\omega_1 + n\Omega)](\tau_1/2)}{[\omega_1 - (\omega_1 + n\Omega)]}; \quad B_n(\omega_2 \pm n\Omega) = \frac{\Omega}{\pi} \frac{\sin[\omega_2 - (\omega_2 + n\Omega)](\tau_2/2)}{[\omega_2 - (\omega_2 + n\Omega)]}$$

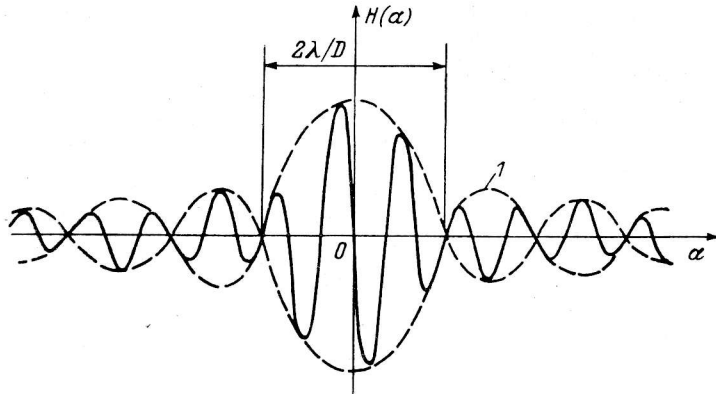


Рис. 5. Вид радиоголограммы на выходе фазопереключающего приемника Райла и линейном сдвиге фазы опорной волны, $T_{\text{гол}}/T_{\text{мод}}=3$ ($a=a_{\text{opt}}$).

1 — огибающая радиоголограммы.

где Ω — частота повторения гармоник в спектре, $\Omega=2\pi/T_{\text{п}}$; ω_1, ω_2 — смещенные частоты, $\omega_1=\omega_0+\Omega, \omega_2=\omega_0-\Omega$; Ω_1, Ω_2 — частоты сдвига, $\Omega_1=\varphi_m/\tau_1, \Omega_2=\varphi_m/\tau_2$.

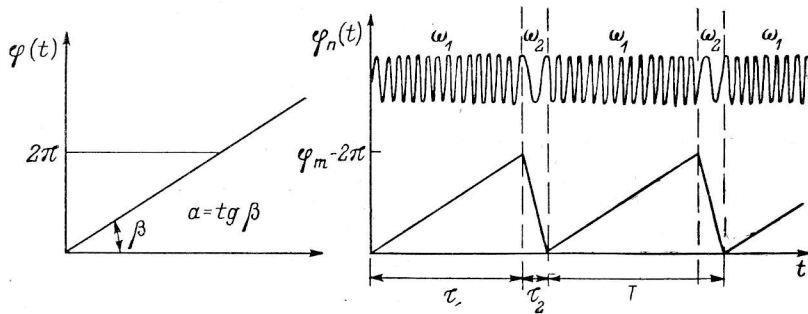


Рис. 6. Замена линейного сдвига фазы линейно-периодическим с периодом повторения $T_{\text{п}}$ и $\tau_2 \ll \tau_1$, где τ_1, τ_2 — длительности прямого и обратного хода «пилю», $\varphi_m=360^\circ$.

Результирующее колебание можно представить в виде двух последовательностей радиоимпульсов с частотами заполнения ω_1 и ω_2 .

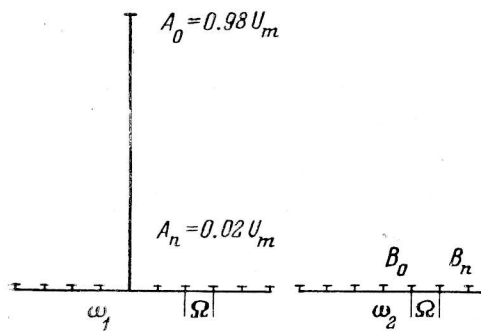


Рис. 7. Спектр колебания с линейно-периодическим законом модуляции фазы, $\varphi_m=360^\circ$, $\tau_2=2\% T_{\text{п}}$.

Подавление несущей и нежелательных боковых полос в спектре сигнала $20 \lg U_m/A_n$ или $20 \lg U_m/B_n$ не хуже 34 дБ.

Для исходного сигнала с частотой ω_0 и амплитудой U_m :

$$A_n = \frac{V_m}{T_{\text{п}}} \frac{\sin X_n \tau_1}{X_n}; \quad B_n = \frac{V_m}{T_{\text{п}}} \frac{\sin X_n \tau_2}{X_n}, \quad n=0, 1, 2, \dots,$$

где $X_n = n\pi/T_{\text{п}}$ амплитуды основных гармоник преобразованного сигнала

$$A_0 = U_m \frac{\tau_1}{T_H}; \quad B_0 = U_m \frac{\tau_2}{T_H}.$$

При $\tau_2 \ll T_H$ основная часть энергии фазомодулированного сигнала сосредоточена в гармонике с частотой $\omega_0 + \Omega_1$. Потери на преобразование равны

$$20 \lg \frac{U_m}{A_0} = 20 \lg \frac{T_H}{\tau_1},$$

где $\tau_1 = T_H - \tau_2$, и для $\tau_2 = 2\% T_H$ не превышают 0.2 дБ.

Крутизна линейно-периодического сдвига фазы $a = \varphi_m / \tau_1$. Увеличение a_1 , необходимое для качественного выделения изображений (рис. 4, б), уменьшает τ_1 и T_H (при фиксированном τ_2). Это приводит к снижению амплитуды основной гармоники (повышение потерь преобразования), возрастанию уровня боковых составляющих в спектре. В результате искажения, связанные с перекрытием высших изображений (рис. 4, а), сохраняются. Противоречивость требований в выборе a практически устраняется, если τ_2 достаточно мало по сравнению с T_H . В этом случае относительный вклад конечности τ_2 в уровень Δ невелик и определяется другими паразитными эффектами (нелинейность, модуляция фазы при плохом КСВН и др.). Удобным критерием для оценки влияния τ_2 на уровень боковых составляющих в спектре является соотношение τ_2 и τ_{\max} . Если $\tau_2 / \tau_{\max} \ll 10^{-2}$, то обычно превалируют другие паразитные эффекты и имеется возможность увеличения a , пока выполняется указанное соотношение.

Для наилучшего подавления нежелательных боковых гармоник в спектре фазомодулированного сигнала, связанных с конечностью обратного хода «пилы», следует выбирать φ_m несколько отличным от 360° , причем это отличие возрастает с увеличением τ_2 . Это объясняется различием фаз кратных гармоник для случаев $\tau_2 \neq 0$ и $\varphi_m = 360^\circ$.

При других значениях $\varphi_m < 360^\circ$ замена линейного сдвига фазы линейно-периодическим возможна только для $\varphi_m = 180^\circ$ и $\tau_1 = \tau_2$ в законе изменения фазы (равносторонняя «пила»). Однако практически этот случай не реализуется, так как требует постоянства и определенного значения ($\varphi_0 = 0^\circ$) начального сдвига фазы волны. В радиолокационных измерениях это потребовало бы синхронизации момента начала сдвига фазы, что бессмысленно для монохроматического сигнала.

Нелинейность сдвига фазы, ошибка в выборе наилучшего значения φ_m и другие факторы наряду с конечностью τ_2 приведут к возрастанию уровня нежелательных боковых полос в спектре фазомодулированного сигнала. Для оценки влияния указанных факторов на качество спектра фазомодулированного сигнала проведено математическое моделирование линейно-периодического сдвига фазы при аппроксимации закона изменения фазы функцией вида

$$\varphi_H(t) = \begin{cases} at + b \sin(ct + \varphi_{0s}) & \text{— прямой ход «пилы» } \tau_1; \\ -a_0t & \text{— обратный ход «пилы» } \tau_2. \end{cases}$$

На рис. 8, а приведен результат моделирования функций $\varphi_H(t)$ и $d_m(t) = \cos[\varphi_H(t) + \varphi_0]$. Практически функция, пропорциональная $d(t)$, получается при детектировании суммарного сигнала двух СВЧ-колебаний, одно из которых относительно другого сдвигается по фазе φ по закону $\varphi = \varphi_H(t)$. Рассчитанный спектр колебания $d_m(t)$ дан на рис. 8, б.

Получение линейно-периодического сдвига фазы СВЧ поля. Для получения линейно-периодического сдвига фазы на волне $\lambda = 1.35$ см был применен ферритовый фазовращатель типа Реджиа—Спенсера, представляющий собой прямоугольный нормализованный волновод с расположенным по оси волновода ферритовым вкладышем и катушкой управления продольным магнитным полем в феррите. В работе [9] подобный фазовращатель предлагается использовать для управления частотой СВЧ волны. Оценка возможности применения фазовращателя данного типа для линейного сдвига фазы опорного поля дана в [10].

Остановимся на вопросах оптимизации параметров фазовращателя типа Реджиа—Спенсера. Ферриты, используемые для его изготовления, должны

удовлетворять условию отсутствия резонансных потерь: $0.3 < \omega/\omega_m < 0.8$, где ω_m — частота ферромагнитного резонанса; ω — рабочая частота. Ферриты должны иметь высокую добротность, т. е. отношение управляемого сдвига фаз к потерям, и намагниченность насыщения 4500—5000 Гс. Нами использовались NiZn-ферриты с намагниченностью насыщения 4750 и 5000 Гс. Для обеспечения необходимого линейного участка фазовой характеристики 0—360° добротность феррита должна составлять 800—1000 град./дБ.

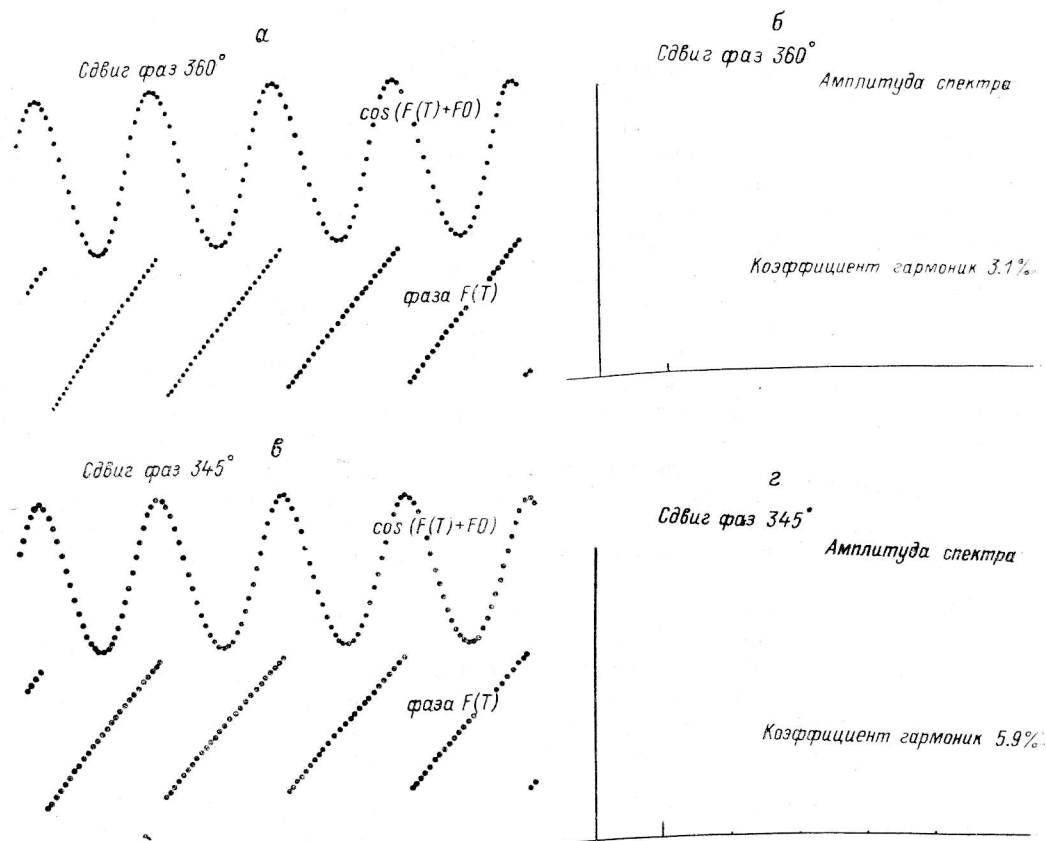


Рис. 8. Результат моделирования функций $\varphi_n(t)$ и $d_m(t) = \cos[\varphi_n(t) + \varphi_0]$ (а, б).

Спектры колебаний $d_m(t)$ (б, з). Коэффициент гармоник $K_T = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N I_i^2}}{I_0}$, где I_0 и I_i — амплитуды основной и высших гармоник. Сдвиг фаз 360°, начальная фаза 0°. Нелинейность фазовой характеристики; %: а — ..., б — 0; обратный ход, %: а — ..., б — 0.

При обработке геометрии ферритового вкладыша стремятся, варьируя заполнение волновода ферритом и подбирая форму согласующих скосов, обеспечить режим 1-го рода в феррите для получения «чистого» сдвига фазы волны квази- H_{10} (изменение постоянной распространения $\gamma_{H_{10}}$ при изменении продольного магнитного поля) [11]. Возможен также режим 2-го рода с основной волной в феррите квази- H_{01} , что обеспечивает менее эффективный фазовый сдвиг, так, при всех величинах заполнения $\gamma_{H_{01}} < \gamma_{H_{10}}$. Установление в ферритовом вкладыше режима 3-го рода, являющегося многоволновым (волны квази- H_{10} , H_{01} , E_{11} , H_{20} и др.), крайне нежелательно: в этом случае фазовый сдвиг основной волны в волноводе, в которую трансформируются все типы волн на выходе фазовращателя, существенно нелинеен. Он складывается из фазовых сдвигов различных типов волн с разными γ , амплитудами, поляризациями. Уменьшение величины заполнения волновода ферритом, облегчающее установление режима 1-го рода [11], ведет в то же время к уменьшению добротности феррита и необходимости увеличивать длину ферритового стержня. Это приводит к возраста-

нию прямых потерь в фазовращателе. Компромисс необходим и в выборе формы согласующего клина: клин, ориентированный в E -плоскости, облегчает возбуждение волны квази- H_{10} , но не дает минимума КСВН, что эквивалентно дополнительным фазовым ошибкам. Рост КСВН также увеличивает возможность проявления ряда паразитных эффектов, в том числе появления резонансных потерь для высших типов волн в феррите.

Фазовращатель управляется линейно нарастающим током с крутизной, обеспечивающей сдвиг фазы $120 \div 1200^\circ \text{C}$ при обратном ходе «пилы» $\tau_2 = (0.03 \div 0.3) \% T_n$. Для выбора рабочей точки на фазовой характеристике фазовращателя в генераторе линейно нарастающего тока имеется регулировка начального уровня «пилы». Генератор тока нагружен на катушку управления продольным магнитным полем, имеющую 1500—2000 витков, что при малых токах 1—50 мА обеспечивает необходимые поля управления до 50 Э. Установка требуемой крутизны сдвига фазы a осуществляется отдельными регулировками длительности прямого хода «пилы» τ_1 и амплитуды «пилы» φ_m .

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| Намагниченность насыщения феррита $4\pi M_s$, Гс | 4750 | 5000 |
| Крутизна фазовой характеристики $\Delta\varphi/\Delta I$, $^\circ/\text{мА}$ | 12 | 16 |
| Область изменения тока ΔI , мА | 10—45 | 7.5—33 |
| КСВН в полосе 21.6—22.5, ГГц | 1.10—1.24 | 1.05—1.16 |
| Прямые потери ρ , дБ | 1.2 | 0.9 |
| Модуляция потерь $\Delta\rho$, дБ | <0.05 | <0.05 |
| Нелинейность* фазовой характеристики σ , % | 2 | 1 |

* Под нелинейностью здесь понимается отклонение от линейного закона изменения фазы.

В таблице приведены параметры фазовращателя для двух использованных ферритов. Фазовые характеристики обоих фазовращателей, измеренные с помощью двухканальной фазометрической схемы, даны на рис. 9.

Гармонический характер нелинейности (особенно кривая 1, $\text{КСВН}_1 > \text{КСВН}_2$) свидетельствует о фазовой ошибке, связанной с переотражением от волны в фазовращателе. Если Γ_1 , Γ_2 — коэффициенты отражения от двух неоднородностей, например концов ферритового стержня, максимальная систематическая фазовая ошибка [12]

$$\Delta\varphi_{\max} = \pm 57 \cdot 2 \text{Arctg}(\Gamma_1\Gamma_2) \text{ [град.]}$$

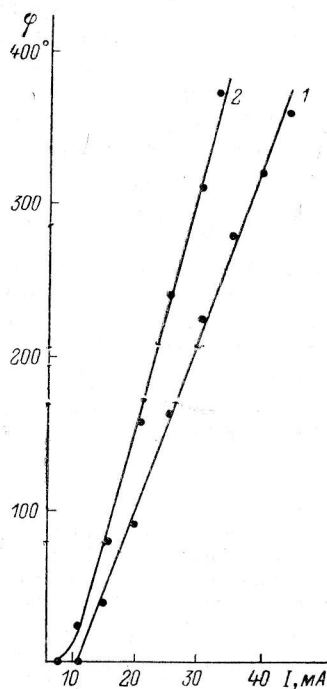
В этом случае фазовая ошибка будет изменяться по гармоническому закону, что вызовет паразитный эффект модуляции фазы

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\max} \cos \varphi_0,$$

где φ_0 — электрическая длина стержня, пропорциональная величине фазовой постоянной β (γ)

Рис. 9. Фазовые характеристики фазовращателей (1, 2), измеренные по двухканальной фазометрической схеме с помощью калибровочного фазовращателя.

Величина тока в катушке управления магнитным полем выставлялась цифровым прибором Ц301-1 класса 0.05.



в феррите. Для $\Gamma_1 = \Gamma_2 = 0.1$ ($\text{КСВН} = 1.22$) $\Delta\varphi_{\max} = \pm 1.5^\circ$. С учетом точности фазометрического метода $\sigma_m \geq 1\%$ ($\geq 3.6^\circ$) отклонение от линейного закона изменения фазы в процессе измерений можно ожидать $4\text{--}5^\circ$ и более.

В использованном для измерений фазометрическом методе наличие модуляции потерь при изменении поля в феррите не отразится на фазовой характеристике.

Оценка спектра фазомодулированного сигнала. Для оценки качества спектра фазомодулированного сигнала, как и ранее, вычислим спектр $d(t)$. На рис. 10, a

приведена экспериментальная запись сигнала $d_3(t)$ и восстановленная зависимость $\varphi_n(t) = \arccos [d_3(t)]$. Рассчитанный спектр колебания $d_3(t)$ дан на рис. 10, б.* Уровень нежелательных кратных гармоник в спектре фазомодулированного сигнала не превышает -40 дБ. Сравнение спектров сигналов $d(t)$, полученных с помощью моделирования и экспериментально, и соответствующих коэффициентов гармоник дает оценку максимального отклонения от линейного закона изменения фазы $1-2\%$ в зависимости от вида функции, аппроксимирующей нелинейность. Эта совокупная ошибка включает как собственную нелинейность, вызванную в основном переотражением волн в феррите или «моду-

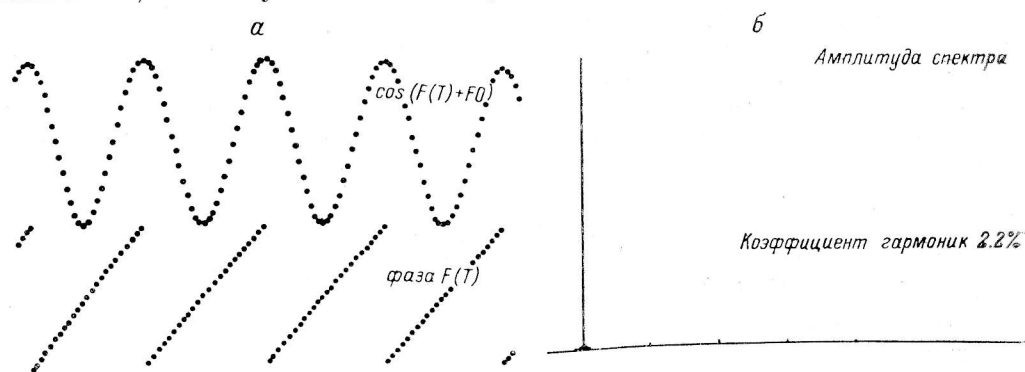


Рис. 10. Запись полученного экспериментально колебания вида $d_3(t)$ и восстановленная зависимость $\varphi_n = \arccos [d_3(t)]$ (а). Спектр колебания $d_3(t)$ (б).

Начальная фаза 0° . Нелинейность фазовой характеристики 1.0% . Обратный ход 0% .

ляцией фазы», так и принесенную в результате модуляции потерь при изменении управляющего поля. Вклад в фазовую ошибку нелинейности управляющего тока можно здесь не учитывать. «Ответственность» за появление высших кратных гармоник в спектре (рис. 10, б) лежит на паразитных эффектах, приводящих к кратному сдвигу фазы, и конечности обратного хода «пилы». Низкочастотные составляющие вблизи основной гармоники спектра могут быть вызваны: нестабильностью фазовращателя, низкочастотной амплитудной модуляцией фазомодулированного сигнала (биения) и конечностью длины взятой реализации. Уровень нежелательных составляющих, опасность появления которых особо отмечалась при рассмотрении паразитных эффектов и связанных с ними искажений, не превышает -36 дБ. Прямые потери в фазовращателе ~ 1 дБ. Паразитная модуляция потерь, измеренная прямыми методами (см. таблицу) менее 0.05 дБ.

Полученные характеристики фазовращателя позволяют надеяться на хорошее качество радиоголографических изображений поверхности радиотелескопа РАТАН-600 по H_2O -мазерам.

Литература

1. Пинчук Г. А., Стоцкий А. А. Применение радиоголографии для исследования радиотелескопа РАТАН-600 // *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО). 1982. 16. С. 135—145.
2. Сиянский В. И., Стоцкий А. А. Аппаратура для радиоголографических измерений на радиотелескопе РАТАН-600 на волне 8.7 мм // *Радиоастрономическая аппаратура XVII Всесоюз. радиоастрон. конф.*: Тез. докл. Ереван, 1985. С. 176—177.
3. Сиянский В. И., Стоцкий А. А., Хайкин В. Б. Радиоголографические измерения на волне 8.8 мм на радиотелескопе РАТАН-600 // *Радиотелескопы и интерферометры. XVIII Всесоюз. радиоастрон. конф.*: Тез. докл. Иркутск, 1986. Ч. 1. С. 36—37.
4. Pinchuk G. A., Khaikin V. B. Investigation and adjustment of the reflecting surface of the RATAN-600 radio telescope by radioholographic method // *Comm. SAO*. 1985. 46. P. 91—97.
5. Ryle M. // *Proc. R. Soc. London A*. 1952. 211. P. 351.
6. Scott P. F., Ryle M. A rapid method for measuring the figure of a radio telescope reflector // *Mon. Not. R. Astr. Soc.* 1977. Vol. 178. P. 539—545.

* Измерения фазомодулированного сигнала и их обработка проводились на двухуровневом измерительном комплексе радиотелескопа РАТАН-600 [13]. Фотографии сделаны с видео-контрольных устройств комплекса.

7. Радиоспектрометр с шумовым пилот-сигналом и импульсной компенсацией / А. П. Венгер, В. Г. Грачев, Г. Н. Ильин и др. // XIV Всесоюзная радиоастрономическая конференция, октябрь, 1982 г.: Тез. докл. Ереван, 1982. С. 149.
8. Leith E. N., Upatnieks J. Recent advances in holography // Progress in Optics / Ed. E. Wolf. 1967. 6. P. 1—52.
9. Микаэлян А. Л., Тейтельбаум И. Г. Управление частотой электромагнитных волн при помощи ферритов // Радиотехника и электроника. 1959. 12. С. 2077—2086.
10. Линейный ферритовый фазовращатель для получения радиоголографических изображений поверхности радиотелескопа / Г. И. Романов, В. И. Синянский, О. В. Треховицкий, В. Б. Хайкин // Радиотелескопы и интерферометры. XVIII Всесоюз. радиоастрон. конф.: Тез. докл. Иркутск, 1986. С. 49.
11. Расчет прямоугольного волновода методом собственных функций при наличии продольно-намагниченного феррита / В. В. Никольский, В. Г. Сухов, Д. И. Корниенко, В. П. Орлов // Радиотехника и электроника. 1965. 4. С. 618—625.
12. Бова Н. Т., Каплан Э. Н., Лайхтман И. Б. Расчет однородной линии с произвольным числом сосредоточенных неоднородностей // Изв. вузов. Радиотехника. 1962. 3.
13. Двухуровневый аппаратно-программный измерительный комплекс на радиотелескопе РАТАН-600 / В. В. Витковский, Б. Л. Ерухимов, М. Л. Моносов и др. // Радиоастрономическая аппаратура. XVIII Всесоюз. радиоастрон. конф.: Тез. докл. Ереван, 1985. С. 23—24.

Поступила в редакцию 4 марта 1987 г.