

Министерство высшего и среднего специального образования  
РСФСР

Ордена Трудового Красного Знамени  
Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

Препринт № 125

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАБЕЛЬ-  
НЫХ ТРАСС ИНТЕРФЕРОМЕТРА

В.С. Беагон  
Н.А. Дугин  
А.А. Романычев  
В.И. Турчин

Горький - 1979 г.

### **А н н о т а ц и я**

Исследовалось влияние колебаний внешней температуры на фазовые характеристики различных кабельных линий интерферометра дециметрового диапазона с базой 420 метров. Рассмотрены методика, аппаратура и основные результаты проведенных исследований.

При создании малобазовых интерферометров (с передачей общего гетеродинного сигнала к смесителям) одной из основных проблем является обеспечение фазовой стабильности линий связи, по которым передаются частоты гетеродина и промежуточная. Обычно, чтобы обеспечить независимость фазы принимаемого сигнала от внешних условий, в частности, от колебаний температуры, кабельные линии стремятся разместить в закрытых галереях, закапывают в траншеи, подкачивают инертным газом при постоянной температуре и давлении и т.д. Большинство подобных мероприятий дорогостоящи, системы сложны в эксплуатации, а замена каких-либо элементов трассы весьма затруднительна. Кроме того, термостабилизация трасс часто оказывается недостаточной и приходится контролировать длину линий в процессе измерений или же создавать специальные системы передачи сигнала гетеродина (например, [1 - 6]).

Поэтому при проектировании двухэлементного интерферометра дециметрового диапазона (10 - 50 см) на радиоастрономическом полигоне НИРФИ в Старой Пустыни вопросы обеспечения стабильности фазы сигнала гетеродина были одним из основных. Разность высот установки антенн, равная 10 метрам на длине базы 420 метров, предопределяла неравномерность внешних условий на трассе, и прежде чем приступить к непосредственному строительству элементов интерфейса метрической

системы, требовалось исследовать фазовые характеристики имевшихся кабельных линий, а именно опенить уходы фазы сигналов при изменении внешней температуры для различных схем передачи частоты гетеродина. По полученным результатам необходимо было выбрать вариант защитной трассы и определить ритм работы системы калибровки, а также ее наиболее приемлемую схему.

Эксперименты проводились на частоте 600 мгц с использованием высокостабильного ( $\sim 10^{-8}$ ) генератора. Измерялись параметры двух однородных отрезков кабеля РКД-2-7/28 геометрической длиной 430 метров каждый и нескольких кабелей РК-75-17-31 и РК-50-11-13, имевших разрывы в центральном пункте. Все кабели были уложены в деревянный короб, поднятый над землей на 50 см и покрытый водонепроницаемым материалом. Такая защита исключала резкие перепады температуры, возникавшие в солнечные дни с редкой облачностью, но сохраняла плавные суточные колебания температуры исследуемых кабелей, которые в нашем случае были в пределах  $+5^{\circ}$  +  $+30^{\circ}$  С (июль-август).

В основном решались три задачи: 1) определялись величина изменения электрической длины кабелей при изменении их температуры и возможная максимальная скорость изменения; 2) определялись относительные изменения параметров линий, находящихся в одинаковых и различных условиях; 3) практически проверялась система калибровки линий, предложенная в работе [6]. Ниже приводятся методика и основные результаты измерений, а также описана аппаратура записи и обработки.

### 1. Определение зависимости электрической длины кабелей от температуры.

Измерялся коэффициент удлинения  $K$ , т.е. величина изменения электрической длины отрезка кабеля длиной 1 м

при изменении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$ ). Измерения проводились по схеме рис. 1. Приращение длины кабеля определялось по фазе сигнала, равного сумме "полезного" и опорного сигналов, одновременно подаваемых на фазометр (абсолютная длина линий измерялась независимым способом на частотах  $10 + 30$  мГц и считалась одинаковой на всех частотах до 600 мГц, т.к. коэффициент  $\xi$  в этом диапазоне практически постоянен). Коэффициент удлинения кабеля с однокордельной полиэтиленовой изоляцией РКД-2-7/28 получился равным  $3,3 \cdot 10^{-5}$  1/град ( $\lambda = 50$  см) с погрешностью 6-7%, коэффициент удлинения кабеля РК-50-11-13 со сплошной полиэтиленовой изоляцией примерно в 2 раза больше. Максимальное изменение кабеля РКД-2-7/28 общей длиной 1000 метров достигало 44 см при перепаде температур в  $12^{\circ}\text{C}$ .

Чтобы уменьшить влияние флуктуаций электрических характеристик линий связи на разность фаз гетеродинных сигналов, в схеме передачи сигнала гетеродина, описанной в работе [3], используются две параллельные линии однородных кабелей, причем предполагается, что в одинаковых условиях изменение электрической длины одного кабеля должно быть равно изменению второго. Чтобы проверить возможность осуществления подобных схем на практике, были измерены коэффициенты относительного удлинения одного кабеля по сравнению с другим. Образцы кабелей одинаковой геометрической длины были плотно связаны друг с другом по всей длине трассы: это давало возможность предполагать, что основной вклад в коэффициент удлинения вносят неоднородности, возникшие при изготовлении, а не разность температур кабелей, вероятность кото-

---

<sup>+) Под электрической длиной понимается величина  $t_{\text{эл}}$   
 $= \xi \cdot t_{\text{геом}}$ , где  $\xi = \lambda_0 / \lambda_k$  - коэффициент укорочения длины волны  
 $\lambda_k$  - длина волны в кабеле,  $\lambda_0$  - длина волны в свободном пространстве, равна в данном случае 50 см.</sup>

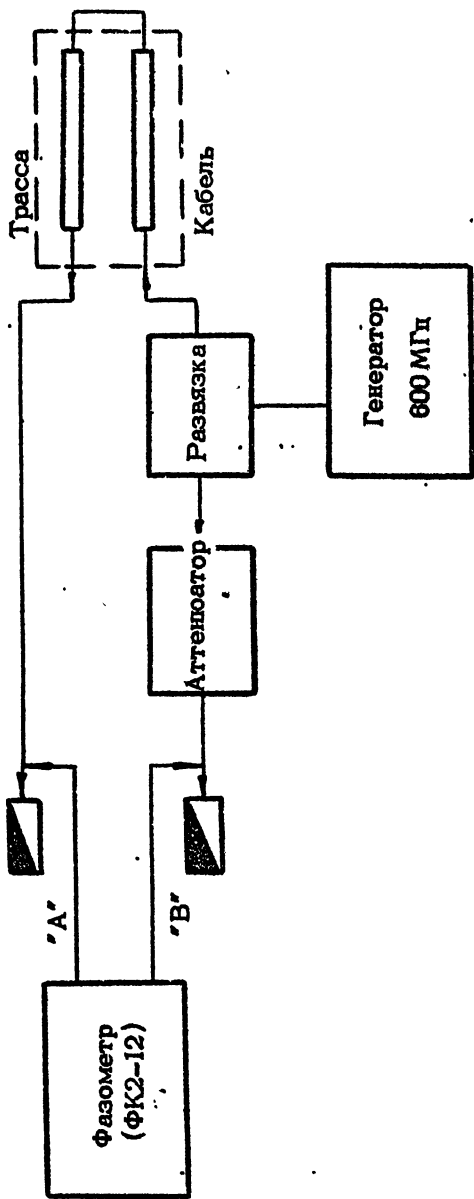


Рис. 1

рой нельзя было исключать. Измерения проводились по схеме рис. 2. Сигнал генератора разделялся в две параллельные линии, измерялась фаза одного сигнала относительно другого, принимаемого за опорный. Заметим, что такая схема позволяет использовать генераторы с обычной частотной нестабильностью ( $\sim 10^{-3}$ ).

Коэффициент относительного удлинения  $K_{\Delta}$  двух параллельных линий РКД-2-7/28 получился равным  $3 \cdot 10^{-6}$  1/град с погрешностью порядка 7%. Для кабеля РК-50-11-13 коэффициент относительного удлинения также был вдвое больше, чем для РКД-2-7/28. Два кабеля РК-75-17-31 с однокордельной полиэтиленовой изоляцией имели одно и два соединения на высокочастотных разъемах, что привело к значительным разбросам данных в различные дни наблюдений; в среднем значение коэффициента относительного удлинения неоднородной линии РК-75-17-31 почти вдвое превышало значение коэффициента удлинения одиночной линии РКД-2-7/28.

Максимальное наблюдавшееся изменение фазы сигналов двух литок РКД-2-7/28 равнялось  $10^{\circ} - 11^{\circ}$  ( $\lambda = 50$  см) при  $\Delta T \sim 8^{\circ} - 10^{\circ}C$ , максимальная скорость изменения фазы достигала  $3^{\circ}$  в час, т.е. разность электрических длин кабелей менялась примерно на 4 мм в час. Если принять допустимую ошибку в фазе сигнала  $3^{\circ}$ , то при работе на волне 50 см необходимо проводить контроль разности длин линий связи 5 - 7 раз в сутки и не чаще, чем один раз в час; это можно считать вполне приемлемым, тем более, что не требуется специальной защиты кабелей. Однако, на волне 10 см количество калибровок увеличивается как минимум в пять раз и подобная схема передачи сигнала гетеродина, кроме систем калибровки, требует создания специальной теплозащитной трассы.

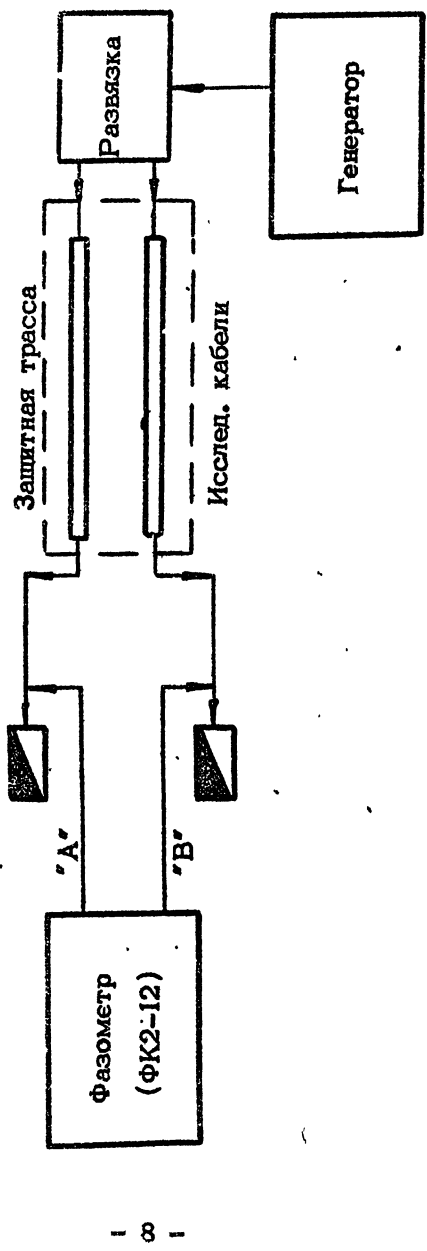


Рис. 2



## 2. Измерение разности электрических длин линий связи при расположении генератора в центральном пункте.

Если гетеродин расположен в центре трассы, то кабели в плечах интерферометра находятся, в общем случае, в различных условиях, что затрудняет количественную оценку возможных уходов разности фаз гетеродинных сигналов. Чтобы определить практически относительное изменение электрических длин кабельных линий была выбрана схема (рис. 3), аналогичная приведенной в работе [6]. Одно из преимуществ данной системы калибровки в том, что контролируется разность электрических длин сразу двух пар кабелей  $l_1 - l_2$  и  $L_1 - L_2$ , однако при этом необходимо иметь дополнительный кабель  $D$ , соединяющий две антенны и не имеющий разрыва в центре.

Необходимые данные о калибруемых кабелях накапливаются в течение одного цикла измерений, состоящего из четырех замеров фазы сигналов, направляемых от генератора к фазометру различными путями с помощью двух крайних переключателей:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= l_1 + L_1 & \Phi_3 &= l_2 + L_2 \\ \Phi_2 &= l_2 + D + L_1 & \Phi_4 &= l_1 + D + L_2 \end{aligned}$$

здесь  $\Phi_i$  - показания фазометра (целое число длин волн не определяется). Комбинируя эти уравнения различными способами, получим

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_1 - L_2 = \frac{1}{2} [\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 - \Phi_4], \\ \Delta l &= l_1 - l_2 = \frac{1}{2} [\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 + \Phi_4], \\ D &= \frac{1}{2} [-\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 + \Phi_4]. \end{aligned}$$

Очевидно, время одного цикла должно быть настолько малым, чтобы уходы электрической длины кабеля за время между отдельными измерениями в цикле не превышали ошибки измерений. Зависимость измерения всех трех величин  $\Delta l, \Delta L, D$  от температуры определяется относительно первого полученного значения.

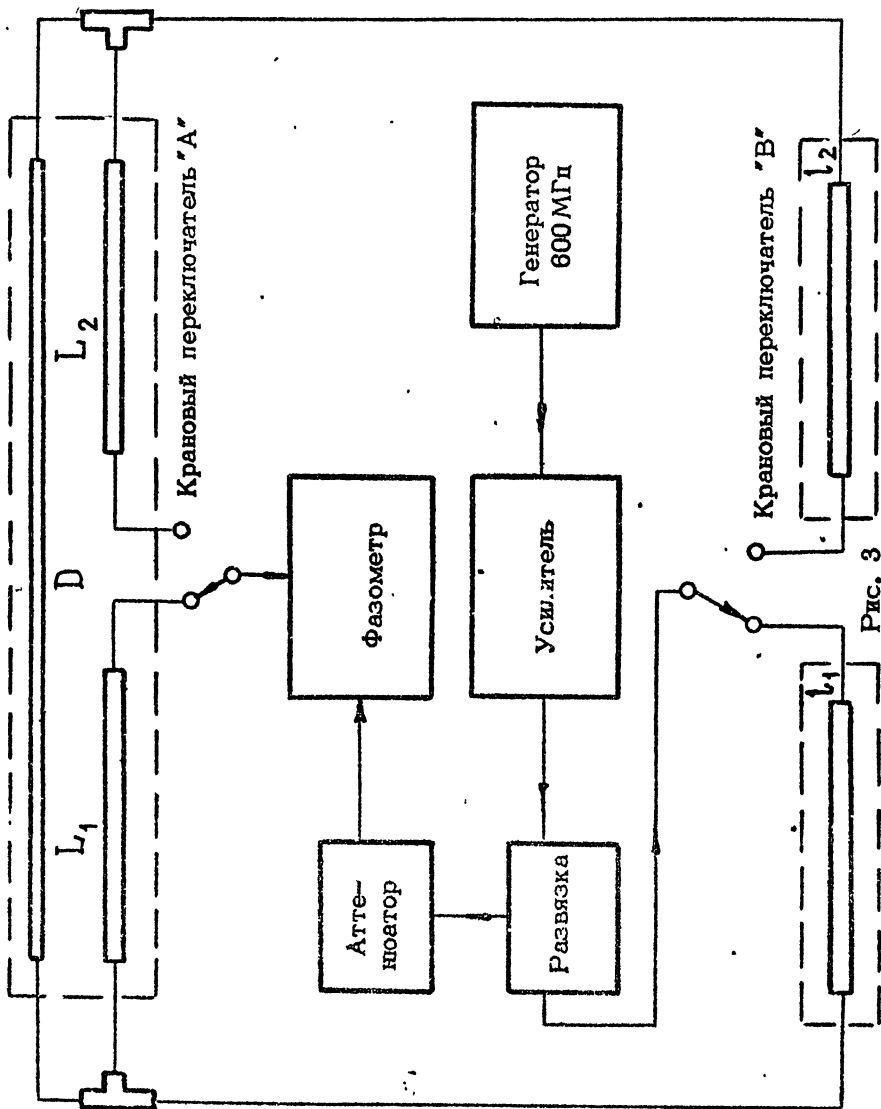


Рис. 3

В качестве калибровочной нитки „D” использовался кабель РКД-2-7/28. Исследовались две пары РК-75-17-31, причем одна пара состояла из новых кабелей, другая же находилась на воздухе несколько лет. Средний коэффициент относительного удлинения одного кабеля в сравнении с другим таким же, но лежащим в противоположном плече трассы, получился равным  $3 \cdot 10^{-5}$  1/град с ошибкой около 5%. Отдельно для старых и новых кабелей эти коэффициенты равны 2,9 и  $3,2 \cdot 10^{-5}$  1/град соответственно, т.е. отличаются примерно на 10%. Можно предположить, что кабели, находившиеся длительное время на воздухе, прошли своего рода термотренировку, улучшившую их характеристики (аналогичный результат приводится в работе [7]). Коэффициент удлинения  $K$  кабеля РК-75-17-31 оценен величиной  $5,5 \cdot 10^{-5}$  1/град.<sup>+</sup>), т.е. относительное удлинение двух линий, находящихся в нетождественных условиях, всего в 1,5 - 2 раза меньше удлинения отдельной линии, а не на порядок, как это получено при исследовании кабелей РКД-2-7/28 и РК-50-11-13. Представим коэффициент относительного удлинения  $K_{\Delta}$  двух нетождественных линий в виде  $K_{\Delta} = K \left( \frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\delta T}{\Delta T} \right)$ , где  $\Delta l$  и  $\delta T$  - разность электрических длин и температуры измеряемых отрезков кабеля,  $\Delta K$  - вариации коэффициента удлинения, зависящие от индивидуальных характеристик отдельных образцов кабеля. Как сказано выше, величина  $\Delta K/K$  равна примерно 0,1. Примем, что  $\Delta l/l$  и  $\delta T/\Delta T$  имеют тот же порядок величин (это максимальная оценка). Тогда  $K_{\Delta} \leq 0,3 K$ , т.е. как минимум вдвое меньше измеренного значения.  $K$  увеличению  $K_{\Delta}$  привело, по-видимому, несовершенство исполнения некоторых элементов измерительной схемы, а

<sup>+</sup>) Точное значение коэффициентов удлинения кабелей по изменению отдельных фаз сигналов  $\Phi_1 \div \Phi_4$  не могло быть определено, т.к. в данной схеме не проводилась калибровка Фазометра, которая при измерении основных величин  $\Delta l, \Delta l, D$  не обязательна.

именно применение обычных тройников для соединения кабелей на концах трассы и коаксиальных крановых переключателей для коммутации линий.

Пример записи уходов измеряемой фазы со временем при изменении внешней температуры приведен на рис. 4. Максимальное зарегистрированное изменение разности фаз сигналов в двух линиях РК-75-17-31 составило  $90^\circ$ , т.е. уход разности электрических длин был порядка 12,5 см за дневной цикл измерений. Пересечение фазовых кривых указывает на то, что скорость изменения разности фаз не обязательно равномерна, а может увеличиваться или уменьшаться в каких-либо температурных зонах. Максимальная скорость изменения разности электрических длин кабелей достигала 4 см в час. Приняв допустимую ошибку в фазе  $3^\circ$ , получим, что калибровка должна проводиться каждые 5-6 минут при длине волны 50 см. Работа на волне 10 см с данной схемой передачи сигнала без принятия защитных мер уже не представляется возможной.

### 3. Аппаратура записи, обработки и управления.

Блок-схема регистрирующей аппаратуры приведена на рис. 5. Основным элементом схемы является специализированное управляющее вычислительное устройство 15 ВСМ-5.

Значения сигнала с цифрового вольтметра считываются в память ЭВМ каждые 0,2 сек в течение времени единичного измерения, задаваемого в программе. Время вводится в машину с кварцевого синхронизатора. По истечении времени измерения вычисляется среднее значение и дисперсия сигнала. Далее ЭВМ выдает команду на включение моторов крановых переключателей в порядке, определяемом выполняемой задачей. После окончания одного цикла измерений данные либо печатаются на ленту ЭПМ "Консул", либо выводятся на ленту самописца (в этом случае сразу вычерчивается график изменения фазы). Одновременно с печатью данных включается лентопротяжной механизм

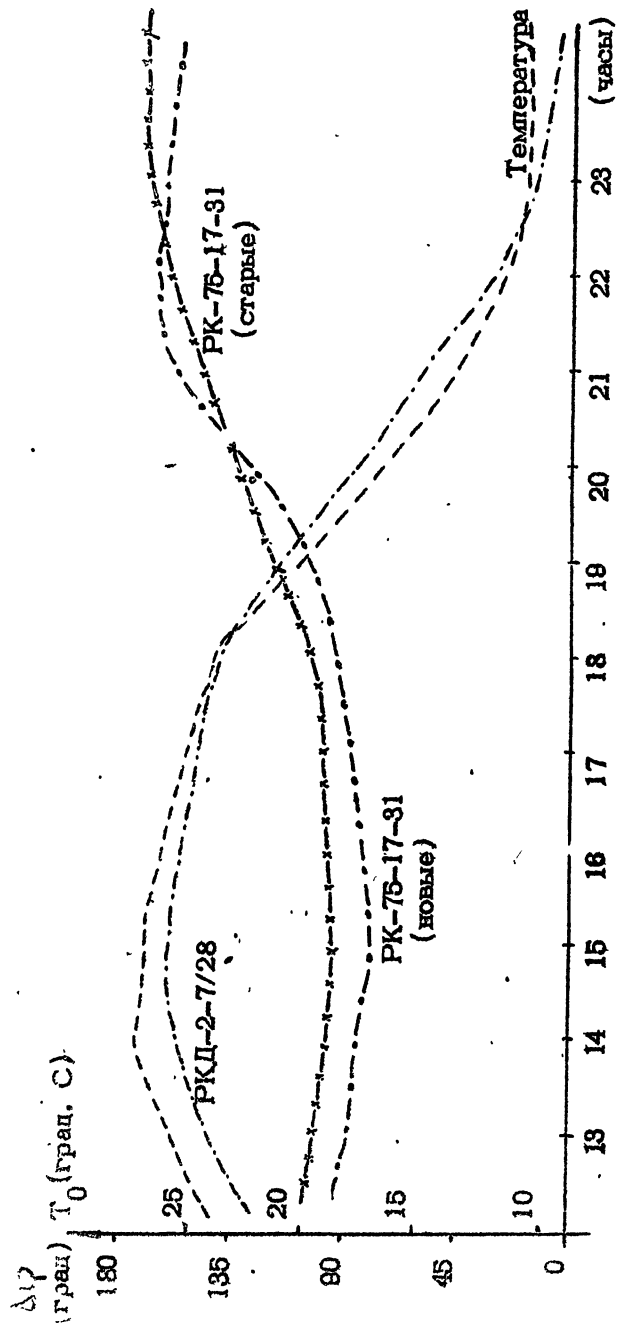


Рис. 4

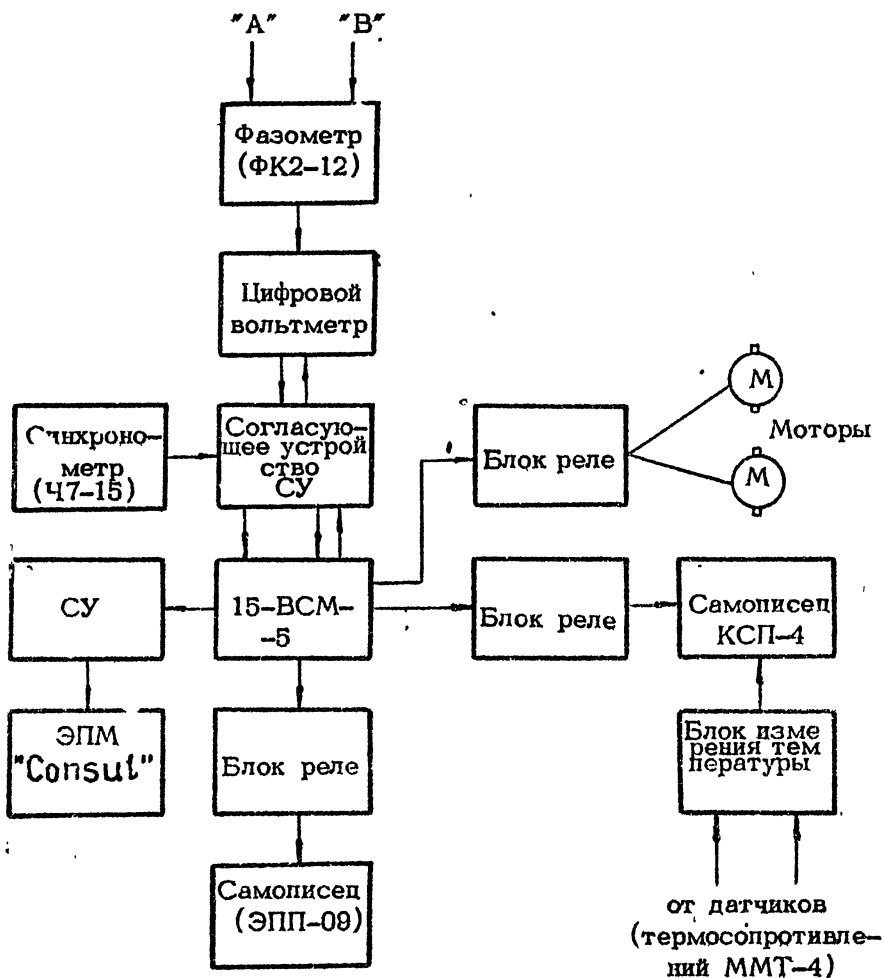


Рис. 5

двенадцатиканального самописца, на ленте которого вычерчиваются графики измерения внешней температуры и температуры внутри кабельной трассы.

В нашем случае температура трассы измерялась только в одной точке: по схеме рис. 1 и 2 — у нижнего конца, по схеме рис. 3 — в центре. При контроле температуры в центре наблюдалось практически полная корреляция уходов фазы с уходами температуры (рис. 4), а при контроле температуры конца трассы в части измерений наблюдалось запаздывание уходов фазы от уходов температуры на время от одного до двух часов. Это объясняется неравномерным измерением температуры по трассе, что может привести к ошибкам при обработке данных; поэтому измерение температуры кабелей должно проводиться не менее, чем в 3-5 точках по всей длине трассы, включая обе крайние точки.

Один цикл измерений по схемам рис. 1 и 2 состоял из 5-минутного замера фазы сигнала и 1-минутной калибровки фазометра; переключение крайнего переключателя и запись температуры занимали 10-20 секунд. Цикл измерений по схеме рис. 3 состоял из 4 замеров фазы сигналов длительностью 1,5 минуты каждый, разделенных 10-секундными промежутками для работы моторов. При определении влияния качества контактов переключателей на фазу сигнала длительность отдельных замеров составляла 20 секунд.

Полное время работы аппаратуры достигало 13 часов. Режим работы автоматический.

#### 4. Выводы.

1. Коэффициент относительного удлинения двух параллельных линий однородного кабеля на порядок меньше общего коэффициента удлинения отдельных линий такого же кабеля.

2. Контактные соединения в кабельных трассах нежелательны из-за возможности значительного возрастания и нестабильности коэффициента удлинения при любом расположении кабелей в трассе.

3. Для достижения высокой точности результатов исследований фазовых характеристик кабельных трасс необходимо обеспечить такую длительность измерений, чтобы измерения температуры и фазы имели по меньшей мере два экстремума. В естественных условиях требуемый период измерений превышает 12 часов (смена температур от дня к ночи). Измерение температуры кабелей необходимо проводить в нескольких точках, включая обе конечные точки трассы.

4. Величины коэффициентов удлинения кабелей РКД-2-7/28, РК-75-17-31 и РК-50-11-13 лежат в пределах  $(3 + 6) \cdot 10^{-5}$  1/град на длине волны 50 см в диапазоне температур  $(+5^{\circ} + +30^{\circ})$ .

5. Примененная схема калибровки разности электрических длин кабелей (рис. 3) достаточно эффективна при условии высокой стабильности характеристик элементов схемы.

Проведенные исследования позволили определить требования к схеме передачи сигнала гетеродина, схеме контроля электрической длины кабельных линий и к защитной трассе при подготовке к работе интерферометра дециметрового диапазона. Однако следует заметить, что для получения более точных данных о фазовых характеристиках кабелей необходимы дополнительные измерения с учетом всех требований, выявленных в процессе данных исследований.



## ЛИТЕРАТУРА

1. ТИИЭР, 61, № 9, 1973.
2. В.А.Алексеев, В.Д.Кротиков, Изв. ВУЗов, "Радиофизика", XII, 1969.
3. Г.А.Озолиньш, Аппаратура и методы обработки радионаблюдений, Рига, 23, 1972.
4. Т.Н. Legg, IEEE Trans. Ant. & Prop. AP-13, 428, 1965.
5. G. Swarup, K.S. Yang, IRE Trans. Ant. & Prop., AP-9, N81, 75, 1961.
6. M. Marimoto, Electronics Letters, Sept., I, N87, 192, 1965.
7. В.П.Фролова, Д.Я.Гальперович, Кабели связи и радиочастотные. М., Информстандартэнерго, стр. 212, 1967.