

Ц 707

Δ-72

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

29/10  
2013



ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

М.Н. Дражев

ПЕРЕМЕННАЯ ЛИНИЯ ЗАДЕРЖКИ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ В  
ПИКОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ

1965

2013

М.Н. Дражев

ПЕРЕМЕННАЯ ЛИНИЯ ЗАДЕРЖКИ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ В  
ПИКОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ



2032/2 чр.

Одной из основных тенденций развития методики современного эксперимента ядерной физики является увеличение быстродействия всех применяемых устройств. Это связано с измерением очень коротких временных интервалов - порядка сотен, десятков и единиц пикосекунды ( $10^{-12}$  сек).

В наносекундном диапазоне, как известно, при подобных измерениях с успехом применяются отрезки коаксиального кабеля, для которого скорость распространения сигнала заведомо известна. В измерениях временных интервалов меньше наносекунды ( $10^{-9}$  сек) использование этого метода уже связано с трудностями и существенными погрешностями из-за ограниченной точности, с которой можно определять и поддерживать постоянными задержки отрезков коаксиального кабеля.

Разрешение, которое можно получить, применяя переменные линии задержки спирального типа, в ряде случаев является неудовлетворительным (например,  $20-50 \cdot 10^{-12}$  сек) и часто бывает того же порядка, что и разрешение исследуемых установок.

Для измерения в пикосекундном диапазоне можно использовать и так называемые удлинительные линии, которые находят применение в радиотехнических СВЧ устройствах. К сожалению, распространенность этих линий в практике ядерно-физического эксперимента довольно ограничена. Притом их электрическая длина обычно недостаточна (например,  $\Delta t_{\max} \approx 330 \cdot 10^{-12}$  сек), и их применение связано с необходимостью производить дополнительные пересчеты, так как они проградуированы в см.

В связи с вышесказанным для исследования некоторых "быстрых" устройств<sup>/1/</sup> были сделаны расчеты и сконструирована воздушная переменная линия задержки для измерения в пикосекундном диапазоне.

Несмотря на некоторые преимущества переменных линий П-образного "тромбонного" типа (например, удобная система смещения), как более простой вариант<sup>/7/</sup>, была выбрана обычная прямая коаксиальная конструкция "телескопического" типа. При этом основная задача, которую необходимо было решить, включала в себя конструирование подвижных контактов, получение достаточной однородности волнового сопротивления в различных участках линии, а также и получение удовлетворительной механической стабильности.

Кроме вышеуказанных особенностей, при реализации линий подобного рода в лабораторных условиях не менее важным является и то наличие стандартных фасонных материалов, из которого надо исходить, чтобы обеспечить получение данного волнового сопротивления.

В связи с большей распространенностью лабораторных приборов ("быстрых" генераторов, "быстрых" осциллографов и т.д.) с характеристическим сопротивлением 75 ом целесообразно выбрать волновое сопротивление линии того же порядка.

Поскольку отношение распределенной индуктивности к распределенной емкости, которое определяет волновое сопротивление, связано с геометрическими соотношениями, для коаксиальной линии из немагнитного материала<sup>2,3/</sup> его можно представить в виде

$$Z \approx \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg \left( \frac{D}{d} \right) \text{ ом} . \quad (1)$$

Здесь  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды ( для воздуха  $\epsilon \approx 1$  );  $D$  - внутренний диаметр внешнего проводника, мм;  $d$  - диаметр внутреннего проводника линии, мм.

Так как линия переменная, она состоит из двух отдельных входящих друг в друга коаксиальных линий. Принцип конструкции показан на рис. 1. Очевидно, что здесь как для  $D$ , так и для  $d$ , получаются два значения:  $D_1, D_2$  и  $d_1, d_2$ .

Исходя из ряда соображений (сохранение волнового сопротивления в допустимых пределах - например,  $\pm 10\%$ , удобные габариты, особенности изготовления и т.д.), для  $D$  и  $d$  были выбраны следующие значения:

$$D_1 = 15,00 \text{ мм} ,$$

$$D_2 = 16,00 \text{ мм} ,$$

$$d_1 = 4,00 \text{ мм} ,$$

$$d_2 = 4,45 \text{ мм} .$$

При этом волновое сопротивление линии в разных ее участках (не принимая во внимание крепежных изоляторов) получается равным

$$\frac{D_1}{d_1} \rightarrow Z_1 \approx 79 \text{ ом} ; \quad \frac{D_1}{d_2} \rightarrow Z_2 \approx 73 \text{ ом} ; \quad \frac{D_2}{d_2} \rightarrow Z_3 \approx 76 \text{ ом} ,$$

т.е. изменяется в допустимых пределах.

Общая электрическая длина линии определяется на основании скорости распространения  $c \approx 3 \cdot 10^{10}$  см.сек<sup>-1</sup> и связана с измеряемыми временными интервалами: для измерения в пикосекундном диапазоне максимальное изменение должно составлять  $500 - 1000 \cdot 10^{-12}$  сек. Эта длина определяется не только электрическими требованиями, но и некоторыми технологическими трудностями ее изготовления на токарном станке.

Все проводящие детали линии выполнены из латуни и посеребрены электролитическим путем. Особое внимание необходимо уделить подвижным контактам, которые

сделаны разрезными и дополнительно усилены соответствующими пружинами. Точность изготовления должна быть достаточно высокой, и все токопроводящие поверхности должны быть тщательно обработаны (класс V 7).

Крепежные изоляторы сделаны из полистирола ( $\epsilon \approx 2,5$ ). Они облегчены, чтобы сохранить относительное постоянство волнового сопротивления в их районе. Для этой цели там же увеличено и отношение  $\frac{D}{d}$ . Таким образом, вводимая дополнительная неоднородность значительно уменьшается<sup>/3/</sup> и практически не сказывается в обычных рабочих условиях.

Конструктивный чертеж линии дан на рис. 2, а на рис. 3 показана ее фотография.

Анализ дополнительных погрешностей, которые могут иметь место, показывает, что они получаются пренебрежимо малыми. Так, можно показать<sup>/4,5/</sup>, что изменение электрической длины линии из-за ее конечной проводимости

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} \approx -0,5 \frac{R_1}{\omega L_1} - 0,125 \left( \frac{R_1}{\omega L_1} \right)^2, \quad (2)$$

где  $R_1$  - распределенное сопротивление, а  $L_1$  - распределенная индуктивность. Имея в виду, что для данного случая  $L_1 \approx 2,4 \cdot 10^{-12}$  Н/см, и пренебрегая потерями из-за поперечного затухания, для серебряных поверхностей получаем:

$$R_1 \approx 0,8 \cdot 10^{-8} \sqrt{F} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) \text{ ом.см}^{-1}, \quad (3)$$

где  $F$  - максимальная рабочая частота в Мгц, а  $d$  и  $D$  - диаметры внутреннего и внешнего коаксиального проводов в мм.

При этом для граничных частот порядка сотен Мгц

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} \approx \frac{\Delta t}{t} \leq 0,1\%.$$

Погрешность из-за термических изменений длины линий в интервале  $\pm 10^0$ С тоже пренебрежимо мала - она не превышает 0,05%, а погрешность из-за изменения диэлектрической проницаемости воздуха<sup>/4/</sup> (наличие водяных паров и изменение температуры) меньше 0,01%.

На практике источником наибольших ошибок можно считать наличие подвижных контактов и некоторой нестабильности из-за деформации соединительных коаксиальных кабелей, а также из-за механических смещений, связанных с ограниченной точностью изготовления. Тем не менее экспериментальные данные эксплуатации линии показывают, что воспроизводимость измерений вполне удовлетворительная. Так, например, при многократных измерениях с конверторными устройствами максимальные отклонения обычно не превышают  $2-3 \cdot 10^{-12}$  сек, а средняя квадратичная ошибка соответственно получается равной около  $1-1,5 \cdot 10^{-12}$  сек.

Здесь надо иметь в виду, что в подобных измерениях участвует не только линия, но весь измерительный комплекс (см. рис. 4) - включая импульсный генератор, соединительные кабели, конвертор, усилитель и многоканальный амплитудный анализатор.

Линейность измерительной линии иллюстрируется рис. 5 и рис. 6. Эти измерения сделаны согласно блок-схеме, данной на рис. 4. Они выполнены при сохранении всех рабочих условий сдвигом измерительной линии через каждые  $100 \cdot 10^{-12}$  сек.

Так как и здесь участвует весь измерительный комплекс, можно утверждать, что погрешность из-за неравномерности и нелинейности одной линии на самом деле меньше.

Пример измерения малых временных интервалов (с подобным же комплексом) показан на рис. 7. Отдельные пики, которые видны на рисунке, получены путем сдвига линии через  $20 \cdot 10^{-12}$  сек, при сохранении остальных условий эксперимента.

В связи с дальнейшим прогрессом экспериментальной техники в области овладения пикосекундным диапазоном, можно ожидать, что применение описанной линии в лабораторной практике окажется полезным.

#### Л и т е р а т у р а

1. Н.Кашукеев, М.Дражев, Т.Драгиев и др. Материалы I симпозиума по ядерной радиоэлектронике, 1963 г. Препринт ОИЯИ, 1877, Дубна, 1964.
2. H.Meinke. Elektr. Nachr. Techn., 17 (1940).
3. R.Cornes PIRE, 37 (1949).
4. Ф.Тишер. Техника измерений на сверхвысоких частотах. ГИФМЛ (1963).
5. O.Zinke. Hochfrequenzmesstechnik, Leipzig, 1947.
6. В.Клеен. Введение в электронику сверхвысоких частот. "Советское радио", М., 1963.
7. Л.Моругия, Г.Глебович. Наносекундная импульсная техника. "Советское радио", М., 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел  
20 февраля 1965 г.



Рис. 1. Принцип устройства переменной линии задержки. Пунктиром показана внешняя оболочка, которая обеспечивает необходимую механическую устойчивость.

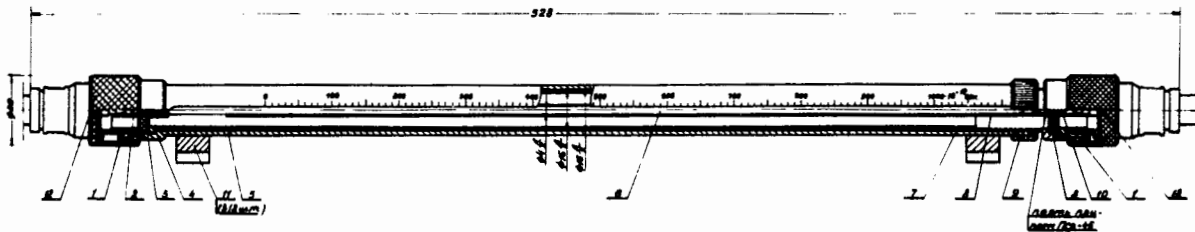


Рис. 2. Общий конструктивный (сборочный) чертеж переменной линии задержки.

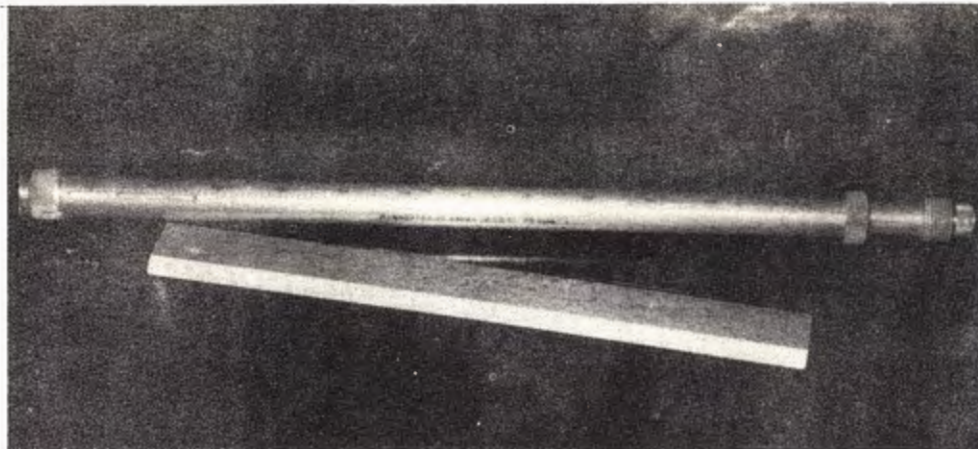


Рис. 3. Фотография переменной линии задержки.

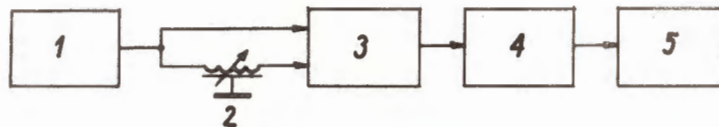


Рис. 4. Экспериментальная установка для измерения малых временных интервалов; 1 - импульсный генератор коротких импульсов релейного типа, 2 - переменная линия задержки, 3 - конвертор время-амплитуды с высоким разрешением, 4 - малошумящий усилитель, 5 - многоканальный амплитудный анализатор



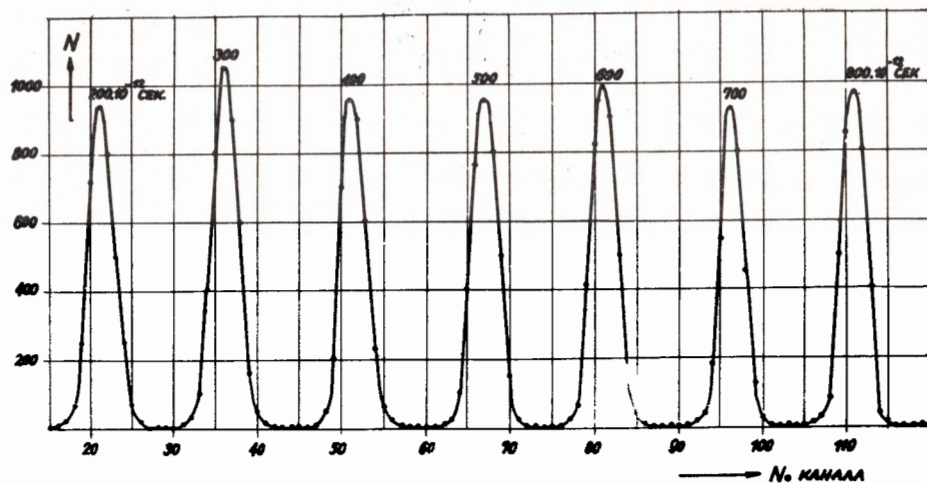


Рис. 5. Результаты измерений получены с помощью установки, показанной на рис. 4. Отдельные пики устанавливались путем сдвига линии через каждые  $100 \cdot 10^{-12}$  сек.

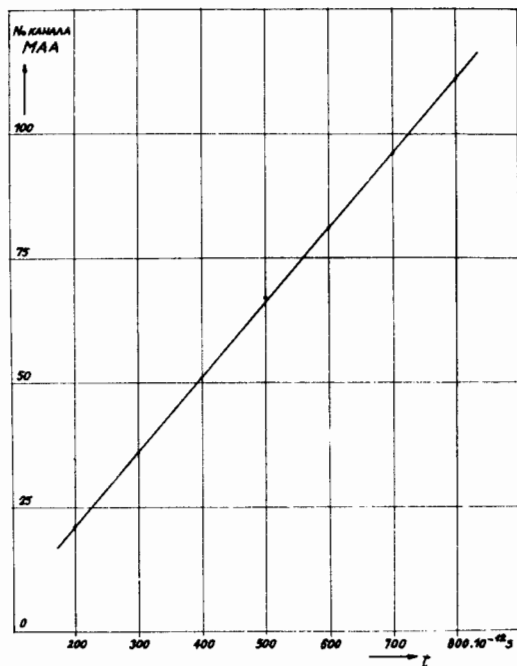


Рис. 6. К линейности переменной линии задержки. Результаты получены с помощью того же метода, что и результаты, показанные на рис. 5.

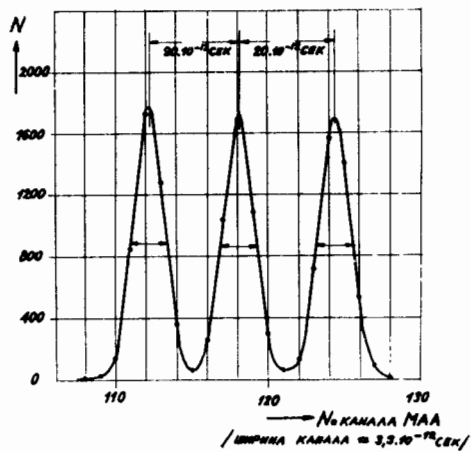


Рис. 7. К измерению малых временных интервалов. Отдельные пики, получены путем сдвига переменной линии через 20.10<sup>-12</sup> сек.