

УДК 621.372.826

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЫВОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЩЕЛЕВОЙ ЛИНИИ

А. Г. Коваленко

Приведены результаты экспериментального исследования простейших неоднородностей, какие могут встретиться при соединении двух отрезков цилиндрической щелевой линии — разрыв по всему сечению линии, разрыв только по металлическому покрытию линии, разрыв только по диэлектрическому заполнению линии. Показано, что весьма малые разрывы порядка 0,001 длины волны могут привести к потерям до 0,1 дБ.

Одной из перспективных линий передачи миллиметрового диапазона является цилиндрическая щелевая линия (ЦЩЛ), ранее описанная в работах [1–6]. ЦЩЛ представляет собой (рис. 1) круглый диэлектрический стержень радиуса a , покрытый проводящим слоем, в котором вдоль образующей стержня прорезана узкая щель углового размера 2θ . Достоинствами ЦЩЛ по сравнению с известными линиями являются малые габариты (поперечный размер ЦЩЛ не превышает в типичном случае 0,3λ), достаточно низкие потери, механическая гибкость при широкополосности порядка двух октав в одномодовом режиме.

При практической реализации ЦЩЛ неизбежно возникнет проблема соединения отрезков линии между собой, так как ЦЩЛ является линией открытого типа и поэтому обладает излучающей способностью на неоднородностях. Кроме того, особенностью данной линии является наличие продольных токов [1], в результате возможны дополнительные потери за счет несовершенства омического контакта между линиями.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования простейших неоднородностей, встречающихся при соединении отрезков ЦЩЛ, — разрывов по всему сечению линии, разрывов только по металлическому покрытию линии, разрывов только по диэлектрическому заполнению при соосном расположении ЦЩЛ и совпадении краев щелей линий.

Несмотря на то, что применение ЦЩЛ наиболее перспективно в миллиметровом диапазоне, исследования проводились методом физического моделирования в диапазоне 10 ГГц. Выбор метода и диапазона исследований диктовался требованием получения наибольшей достоверности результатов исследований, поскольку в миллиметровом диапазоне значительно возрастает роль качества изготовления ЦЩЛ [2] и для измерений практически невозможно отобрать подходящие образцы. Далее, по своим функциональным возможностям и погрешностям измерений аппаратура 3-сантиметрового диапазона несравненно превосходит аналогичную аппаратуру миллиметрового диапазона. И, наконец, следует ожидать (и эти ожидания подтвердились), что в некоторых

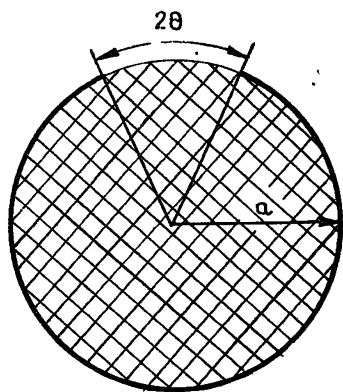


Рис. 1

случаях (разрыв по сечению ЦЩЛ) весьма малое изменение параметра — порядка $0,001\lambda$ — может привести к заметным потерям, достигающим 1 дБ. Величине $0,001\lambda$ в ЦЩЛ 8-миллиметрового диапазона соответствует линейное значение $0,005$ мм, что почти вдвое превышает точность изготовления, гарантируемую массовой технологией, к тому же измерение столь малых величин затруднено. В ЦЩЛ же 3-сантиметрового диапазона значению $0,001\lambda$ соответствует линейная величина $0,02$ мм, что легко поддается измерению простыми средствами, а размеры линии становятся такими, что допускают точное изготовление ЦЩЛ, и разбросом характеристик отдельных экземпляров линии можно пренебречь.

Для измерений были изготовлены образцы ЦЩЛ, размеры которых выбирались таким образом, чтобы рабочая полоса частот ЦЩЛ не превышала полосы прямоугольного волновода, а именно: внутренний диаметр линии $2a=8$ мм, толщина медного посеребренного покрытия — 1 мм, материал диэлектрического заполнения линии — полистирол ($\epsilon=2,56$), угол раскрыва щели 2θ составлял $28^{\circ},96$. Методика исследований состояла в измерении частотной зависимости коэффициента прохождения в ЦЩЛ без разрыва и с разрывом с помощью панорамных измерителей КСВ Р2-59 и Р2-61, затем по методике, аналогичной [5], определялись потери, вносимые неоднородностью, при этом суммарная погрешность установки не превышала 5%. Для исключения влияния ближнего поля волноводно-щелевых переходов, с помощью которых производилось подключение ЦЩЛ к панорамным измерителям, выбирались достаточно протяженные отрезки ЦЩЛ — более 15 длин волн, которые тщательно подгонялись до практически идентичных размеров. Подобная методика совместно с тщательной подгонкой образцов ЦЩЛ и переходов позволила также исключить влияние различия характеристик волноводно-щелевых переходов и получить частотную зависимость потерь, вносимых неоднородностью, в «чистом» виде.

Рабочий диапазон частот ЦЩЛ ограничен сверху — первой волной квази- H_{11} -типа, с длиной волны — $\lambda_{огр}$, а снизу — длиной волны $\lambda_{кр}$, начиная с которой замедление в линии становится меньше единицы и происходит излучение энергии из щели. Поэтому для удобства все результаты приведены в зависимости от относительной длины волны ξ :

$$\xi = (\lambda - \lambda_{огр}) / (\lambda_{кр} - \lambda_{огр}),$$

что позволяет экстраполировать полученные результаты на ЦЩЛ с другими параметрами.

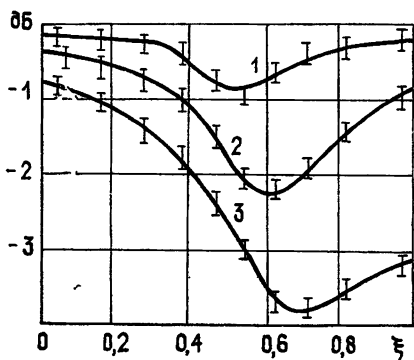


Рис. 2

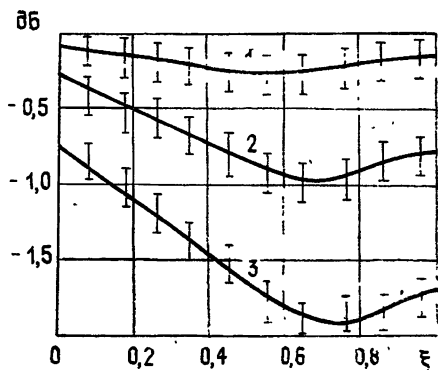


Рис. 3

На рис. 2 показана частотная зависимость потерь, вносимых разрывом ЦЩЛ по всему сечению, где кривая 1 соответствует величине разрыва $1,1 \cdot 10^{-3} \lambda_{кр}$, кривая 2 — $5,6 \cdot 10^{-3} \lambda_{кр}$, кривая 3 — $1,1 \cdot 10^{-2} \lambda_{кр}$. Как видно, имеют место две характерные особенности: с увеличением длины волны потери растут и приблизительно в середине частотного диапазона

наблюдается слаборезонансный максимум потерь, который сдвигается в сторону более длинных волн при увеличении разрыва. Увеличение потерь в длинноволновом участке объясняется уменьшением замедления в линии и, следовательно, повышенной излучательной способностью ЦЩЛ на неоднородностях. В то же время причины появления максимума потерь не вполне ясны.

Для выяснения распределения общих потерь на разрыве между разрывом по металлическому покрытию и диэлектрическому заполнению линии было проведено исследование разрыва только по металлическому покрытию и разрыва только по диэлектрическому заполнению ЦЩЛ. На рис. 3 показана частотная зависимость потерь, вносимых разрывом только по металлическому покрытию ЦЩЛ, где кривая 1 соответствует величине разрыва $2,2 \cdot 10^{-3} \lambda_{кр}$, кривая 2 — $6,7 \cdot 10^{-3} \lambda_{кр}$, кривая 3 — $1,33 \cdot 10^{-2} \lambda_{кр}$. Как видно, общий ход частотной зависимости потерь имеет тот же вид, что и при разрыве по всему сечению, однако потери в данном случае примерно вдвое меньше, чем при разрыве по всему сечению, что объясняется наличием в линии неразрывного диэлектрика, поддерживающего распространение электромагнитных волн.

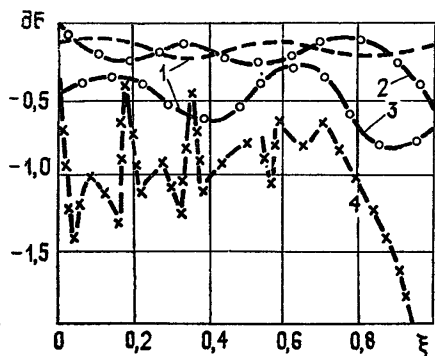


Рис. 4.

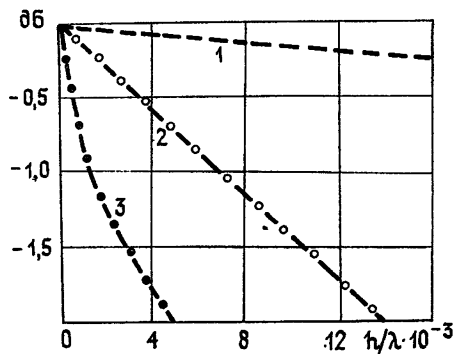


Рис. 5.

В случае же разрыва только по диэлектрическому заполнению линии наблюдаемые явления несколько сложнее — см. рис. 4, где кривая 1 соответствует величине разрыва $2,2 \cdot 10^{-2} \lambda_{кр}$, кривая 2 — $4,4 \cdot 10^{-2} \lambda_{кр}$, кривая 3 — $2,2 \cdot 10^{-1} \lambda_{кр}$, кривая 4 — $5,6 \cdot 10^{-1} \lambda_{кр}$. Так как линии тока при этом не разорваны, то потери незначительны, а в связи с тем, что диэлектрическое заполнение сильно влияет на постоянную распространения в ЦЩЛ [1, 3, 4], то потери в полосе частот линии изменяются практически по периодическому закону. С увеличением величины разрыва (кривые 2, 3) наблюдаемые явления качественно не изменяются, но происходит увеличение амплитуды пульсации потерь. При больших же разрывах (кривая 4) в высокочастотном участке происходит резкий рост потерь, а в высокочастотном участке осцилляции перерождаются в резонансные изменения, причем глубина и добротность резонансов увеличиваются с возрастанием частоты. Наблюдаемые явления объясняются тем, что такой большой разрыв можно рассматривать как резонатор, а частотная зависимость резонансов происходит из-за изменения замедления в линии. В самом деле: в высокочастотном участке замедление в линии возрастает, концентрация поля в щели увеличивается, что приводит к увеличению добротности резонатора, образующегося при разрыве по диэлектрику; в то же время в низкочастотном участке ЦЩЛ становится запредельной для распространяющихся типов волн, из-за чего потери резко растут. Необходимо отметить, что в практических случаях при соединении двух ЦЩЛ вряд ли будет образовываться столь большой разрыв по диэлектрическому заполнению линии ($5,6 \cdot 10^{-1} \lambda_{кр}$), однако исследованное явление может найти полезное применение для построения различных резонансных устройств на основе ЦЩЛ.

Для сравнения потерь, вносимых различными разрывами, на рис. 5 построены зависимости максимальных потерь в диапазоне частот ЦЩЛ от величины разрыва. Кривая 1 соответствует разрыву по диэлектрическому заполнению ЦЩЛ, кривая 2 — разрыву по металлическому покрытию, кривая 3 — разрыву по всему сечению линии. Как видно, на возрастание потерь наиболее сильно влияет разрыв по всему сечению ЦЩЛ, разрыв по диэлектрическому заполнению влияет наиболее слабо, а разрыв по металлическому покрытию по своему влиянию занимает промежуточное положение между разрывом по всему сечению и разрывом по диэлектрическому заполнению.

Приведенные на рис. 5 зависимости позволяют оценить максимально допустимую величину разрывов различных типов для обеспечения приемлемых потерь при соединении ЦЩЛ. Очевидно, что разрыв по всему сечению линии недопустим, так как при этом происходит очень быстрое возрастание потерь, но в то же время такой тип разрыва может встретиться реже всего, поскольку в практических случаях всегда можно обеспечить либо электрическое соединение между линиями, либо неразрывное диэлектрическое заполнение. Однако чаще всего может встретиться неплотное соединение линий по металлическому покрытию, и здесь следует иметь в виду, что весьма малые разрывы — порядка $0,001 \lambda_{кр}$ — могут привести к потерям примерно $0,1 \text{ дБ}$, т. е. к заметным потерям.

Проведенное экспериментальное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1) При практической реализации устройств на основе ЦЩЛ необходимо стремиться к наиболее плотному и совершенному электрическому соединению линий, пусть даже ценой ухудшения диэлектрического заполнения в месте контакта, поскольку разрыв по металлическому покрытию приводит к сильным потерям, а разрыв по всему сечению ЦЩЛ вообще недопустим.

2) Максимальная величина разрыва по металлическому покрытию для обеспечения потерь на более $0,1 \text{ дБ}$ не должна превышать $1 \cdot 10^{-3} \lambda_{кр}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носич А. И., Шестопапов В. П. — Радиотехника и электроника, 1979, 24, № 10, с. 1949.
2. Глотов Ю. И., Кечиев О. А., Филатов О. И., Хлопов Г. И., Шестопапов В. П. Тезисы докладов Всесоюзной конференции по диэлектрическим волноводам и резонаторам. — Саратов, 1983.
3. Глотов Ю. И., Носич А. И., Коваленко А. Г., Хлопов Г. И., Шестопапов В. П. Препринт ИРЭ АН УССР № 255. — Харьков, 1984.
4. Носич А. И., Шестопапов В. П. — ДАН УССР, 1978, 241, № 2, с. 341.
5. Bianco Bruno, Parodi Mauro, Ridella Sandro, Selvaggi Franco. — IEEE Trans. Instrumentation Measurement, 1976, 25, № 4, p. 320.
6. Коваленко А. Г., Носич А. И., Хлопов Г. И., Шестопапов В. П. В кн.: Распространение и дифракция радиоволн в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. — Киев: Наукова думка, 1983, с. 190.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
23 января 1985 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF GAPS IN THE CYLINDRICAL SLOT LINE

A. G. Kovalenko

The results of experimental investigation of the simplest inhomogeneities are given which may take place when connecting two segments of the cylindrical slot line which are as follows: a gap in the whole cross-section of the line; a gap in the metal line coating only; a gap in the dielectric line filling only. It is shown that a rather small gap of order of $0,001$ the wavelength may result in losses up to $0,1 \text{ dB}$.