ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2005. Т. LVIII, № 3.

УДК 621.372.8.09

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

В.Г. АВЕТИСЯН

ПЕРЕДАЮЩИЕ ЛИНИИ ДИАПАЗОНА КОРОТКИХ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН С ПОДВИЖНЫМИ СОЧЛЕНЕНИЯМИ СВЕРХРАЗМЕРНЫХ ВОЛНОВОДОВ

Приводятся результаты экспериментального исследования нестабильности передаточных характеристик по фазе и по мощности низкочастотной модели линии передачи диапазона коротких миллиметровых волн (KMMB). Линия предназначена для использования в измерениях амплитудно-фазового распределения исследуемых электромагнитных полей на плоскости. Она состоит из отрезков сверхразмерных полых металлических волноводов, подвижных относительно друг друга, и в процессе измерений ее полная геометрическая длина остается неизменной.

Ключевые слова: сверхразмерные волноводы, короткие миллиметровые волны, низкочастотное моделирование.

В диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) для измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) поля на какой-либо поверхности в качестве линии передачи сигнала от сканируемого приемного зонда к стационарной измерительной аппаратуре используется отрезок коаксиального кабеля. В процессе измерений изменения геометрической формы кабеля вдоль его длины являются источниками нестабильности передачи сигнала по амплитуде и по фазе. В результате в измерение АФР вносятся дополнительные ошибки, которые обычно составляют по фазе несколько градусов, а по амплитуде – десятые доли децибела. При таких же измерениях в диапазоне КММВ вместо коаксиального кабеля используется отрезок гибкого диэлектрического волновода. При этом погрешность измерения по фазе из-за такой замены может составлять более 10⁰[1]. Это обусловлено как изменением геометрии диэлектрического волновода в процессе измерений, так и низкой величиной развязки полей различных участков диэлектрического волновода, а также поля самого волновода от внешних полей.

В антенных измерениях по зоне раскрыва антенн [2] опять же восстанавливается АФР ближнего поля антенны, но сканируемый зонд может быть как приемным, так и излучающим. Выполнение таких измерений в диапазоне КММВ, при условии обеспечения достаточной стабильности передачи сигнала по фазе и мощности, сопрягается с возрастающими трудностями. Например, в [3], где зонд является только излучающим, его выходной сигнал с частотой около 500 *ГГц* формируется следующим образом. Линия передачи к сканируемому зонду состоит из вращающихся относительно друг друга сочленений отрезков коаксиальных кабелей, которые тщательно теплоизолированы и заключены в оболочку на основе SiO₂ с низким коэффициентом расширения. На вход такой линии подается сигнал с частотой около 5 *ГГц*, а на выходе линии стоит умножитель частоты с коэффициентом умножения, равным 100. Выходной сигнал умножителя подается на вход излучающего сканируемого зонда. В результате среднеквадратичное отклонение фазовой передаточной характеристики такой линии на частоте 500 *ГГц* составляет 7⁰.

В [4] предложено устройство, где для стабильной передачи сигнала при сканировании либо приемного, либо излучающего зонда в раскрыве антенны применено иное решение. Передающая линия в этом случае предназначена для передачи сигнала непосредственно диапазона КММВ и построена на отрезках сверхразмерных полых металлических волноводов с подвижными сочленениями. Она работает на основной моде TE₁₀ и содержит фильтры для поглощения высших паразитных мод. В процессе сканирования зонда (в виде открытого конца прямоугольного одномодового волновода диапазона КММВ) предложенная линия передачи сигнала диапазона КММВ синхронно работает со сканером так, что общая геометрическая длина остается неизменной. Это достигается применением двух сверхразмерных тромбонов, работающих поочередно при сканировании зонда вдоль координат Х и У по плоскости измерений. При перемещении зонда вдоль одной из координат на расстояние L колено соответствующего тромбона одновременно перемещается на расстояние L/2 в таком направлении, чтобы скомпенсировать изменение геометрической длины передающей линии, сохраняя таким образом неизменной длину линии. Проблема обеспечения точности компенсации изменения длины решается применением соответствующих механизмов, изложенных в [4,5].

С точки зрения нестабильности передачи сигнала по предложенной линии, одним из наиболее ответственных узлов является подвижное сочленение сверхразмерных волноводов, конструкция которого представлена на рис.1.



Рис.1: 1 - внешний сверхразмерный волновод, 2 - фторопластовые прокладки, 3 - внутренний сверхразмерный волновод, 4 - поглотитель, 5 - рупорное окончание внутреннего волновода

Подвижное сочленение является сочленением двух электрически разомкнутых по постоянному току сверхразмерных волноводов 1 и 3, способных перемещаться друг относительно друга в направлении продольной оси волноводов. Соосность волноводов при их взаимном перемещении обеспечивают прокладки 2 из односторонне фольгированного фторопласта, которые напаяны фольгированной стороной по внешнему периметру сечения внутреннего волновода. За прокладками следует наклеенный также по

периметру поглотитель 4 электромагнитной энергии, который экранирует поле в волноводе от внешнего поля и поглощает волны, возбужденные на нерегулярности сочленения и проникающие в пространство между внутренней 1 и внешней 3 поверхностью волновода. Прокладки 2 также способствуют стабильности электрических и механических параметров сочленения в процессе взаимного перемещения волноводов 1 и 3. Для снижения уровня возбуждаемых паразитных мод в сочленении конец внутреннего волновода имеет рупорное окончание с малым углом раскрыва $2\varphi_0 \leq 10^0$, а зазор S между стенкой рупорного окончания 5 и внутренней стенкой внешнего волновода 1 составляет величину S $\leq 0,1\lambda$ (λ - длина рабочей волны).

Для экспериментальной проверки описанной выше линии передачи, с целью использования ее в диапазоне КММВ, была изготовлена низкочастотная модель макета линии с одним тромбоном в соответствии с принципом электродинамического подобия [6]. Измерения на модели проводились на частоте $f_1 = 33 \Gamma \Gamma \mu$ ($\lambda_1 = 9, 1 \, \text{мм}$). В модели размеры составляли: внутренний волновод - a · b = 48 · 24 мм², внешний волновод - 56 · 32 мм², S = 0,4 мм ($S/\lambda_1 \approx 0,04 < 0,1$). Электрический вектор рабочей моды TE_{10} перпендикулярен широким стенкам волноводов, относительные размеры которых a/λ_1 равны соответственно 5,3 и 6,2, а параметры квазиоптического приближения $2\pi a/\lambda_1$ - 33 и 39. Согласно теории моделирования [6], результаты, полученные при измерениях на такой модели, будут почти совпадать с результатами измерений на образце такой линии при частоте измерений $f_2 = 330 \, \Gamma \Gamma \mu \, (\lambda_2 \approx 0.91 \, \text{мм})$, если в линии – образце размеры элементов, составляющих электродинамическую систему образца, уменьшены в $f_2/f_1 = 10$ раз, и при условии стенок бесконечной проводимости волноводов диэлектрические И магнитные проницаемости тел и среды в случае модели равны соответственным проницаемостям тел и среды в случае испытания образца. Таким образом, в линии - образце должны иметь S = 0,04 мм, сечение внутреннего волновода - 4,8 · 2,4 мм², а сечение внешнего волновода -5,6 · 3,2 мм². На рис.2 изображена блок-схема измерения низкочастотной модели линии передачи с одним тромбоном.

Входное сечение возбудителя моды $TE_{10} - 7, 2 \cdot 3, 4 \text{ мм}^2$, длина возбудителя – 300 мм. Пятипластинчатые фильтры 10 подобны фильтрам, описанным в [7]. Для подавления близких паразитных мод TE_{20} и TE_{30} , которые почти не подавляются в пятипластинчатых фильтрах из-за взаимной перпендикулярности плоскости пластин и векторов электрического поля этих мод, сконструирован комбинированный фильтр 8. При этом добавлены две слюдяные пластины, также напыленные нихромом. Однако плоскости этих пластин параллельны вектору \vec{E} основной моды и находились на расстоянии $a/12 \approx 4 \text{ мм}$ от ближайших узких стенок волновода.



Рис.2: 1 – генератор Г4-156, 2 – вентиль, 3 – аттенюатор ДЗ - 36А, 4 – измерительная линия Р1-12, 5 – индикаторы перемещений, 6 – микровольтметр В6 - 9, 7 – пирамидальный возбудитель рабочей моды ТЕ ₁₀, 8 – комбинированный фильтр, 9 – колено тромбона, 10 – пятипластинчатый фильтр, 11 – короткозамкнутый оконечный волновод

Были выполнены три серии измерений. Во всех сериях производились измерения уровней (в децибелах) минимума A_i^{min} (*дБ*) и максимума A_i^{max} (*дБ*) стоячей волны в измерительной линии 4, а также смещение Δl_i минимума стоячей волны. В первой серии производились измерения вышеотмеченных величин при перемещении короткозамкнутого оконечного волновода 11 на $\Delta l^0 = 40$ *мм* с шагом $\Delta l_i^0 = 0,2$ *мм* при неизменном положении колена 9 тромбона; во второй серии – при перемещении $\Delta l^T = 20$ *мм* колена 9 тромбона; во второй серии – при перемещении $\Delta l^T = 20$ *мм* колена 9 тромбона с шагом $\Delta l_i^0 = 1$ *мм* и компенсации изменения длины тракта на каждом шаге Δl_i^0 с помощью перемещения колена 9 тромбона с шагом $\Delta l_i^T = \Delta l_i^0/2 = 0,5$ *мм*. Отметим, что длина тракта равнялась приблизительно 2 *м*. Разброс значений A_i^{max} (*дБ*) составлял менее 0,5 *дБ* и в третьей серии измерений лежал в пределах 32,1...32,5 *дБ*. Разброс значений A_i^{min} (*дБ*) был более значителен. График A_i^{min} (*дБ*) при третьей серии измерений представлен на рис.3.



Для каждого шага перемещения Δl_i^0 и соответствующей компенсации изменения длины тракта вычислялись коэффициенты K_i стоячей волны в измерительной линии и величины η_i потерь тракта, которые включают также потери на преобразование. Расчет этих величин выполнялся по соотношениям [8]

(1)
$$K_{i} = 10^{\frac{A_{i}^{mx} - A_{i}^{mn}}{20}},$$
$$\eta_{i} = 10 \ln \frac{K_{i} - 1}{K_{i} + 1}.$$

Разброс значений η_i определяет нестабильность коэффициента передачи по мощности $\Delta \eta_H$ исследуемого подвижного тракта при его неизменной геометрической длине. При средней величине потерь тракта в 2,44 *дБ* нестабильность $\Delta \eta_H$ не превышала $\pm 0,5$ *дБ*. Большое затухание в тракте при его длине в 2 *м* объясняется наличием комбинированного фильтра, частично поглощающего также и основную моду TE₁₀.

Нестабильность фазовой передаточной характеристики определялась следующим образом. При описанной выше процедуре измерений с компенсацией изменения геометрической длины тракта каждому измеренному значению смещения $\Delta {f l}_i$ выбранного минимума стоячей волны в измерительной линии 4, регистрируемого зондом и микровольтметром 6 измерительной линии, сопоставлялся фазовый набег $\Delta \phi_i = 2 \beta_0 \Delta l_i = 4 \pi \Delta l_i / \Lambda_{BO}$ (Λ_{BO} - длина волны в одномодовом волноводе измерительной линии). Разброс значений $\Delta \phi_{
m i}$ определяет нестабильность коэффициента передачи по фазе $\Delta \phi_{
m H}$. При цене деления индикатора перемещения в 0,01 *мм* смещение $\Delta {
m l}_{
m i}$ от исходного положения (в одну или другую сторону) определяется количеством делений σ_i смещения стрелки

индикатора часового типа как $\Delta l_i = 0.01\sigma_i$ (*мм*). При сечении волновода измерительной линии 7,2·3,4 *мм*² и частоте измерений $f_1 = 33 \Gamma T \mu$ имеем $\Lambda_{BO} = 11,722 \, \text{м}$ м и $\Delta \varphi_i = 4 \pi \times 0.01 \sigma_i / \Lambda_{BO} = 0.614^0 \sigma_i$ со знаком "плюс" или "минус" в зависимости от знака σ_i . График σ_i при третьей серии измерений представлен на рис.4.



Рис.4

Разброс значений σ_i лежит в интервале приблизительно от -14 до +8, т.е. 22 деления, что соответствует нестабильности по фазе $\Delta \varphi_{\rm H} \approx \pm 7^{0}$.

Измерения по оценке погрешностей, вносимых при определении $\Delta \varphi_{\rm H}$ и $\Delta \eta_{\rm H}$, обусловленных непостоянством связи зонда измерительной линии с полем в линии при различных положениях зонда, а также вносимых собственным коэффициентом отражения измерительной линии, были выполнены согласно методике, изложенной в [9]. Вносимая погрешность по фазе составляет $\pm 2,5^{\circ}$, по мощности $\pm 0,1\,\mu$ Б. Погрешность по фазе, вносимая нестабильностью генератора по частоте, при длине тракта около 2 *м* и частотной нестабильности генератора около 10^{-5} составляет $\pm 1,5^{\circ}$.

Приведенные результаты подтверждают перспективность применения предложенной линии передачи в диапазоне КММВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах / Под ред. **Р.А. Валитова и Б.И. Макаренко.** - М.: Радио и связь, 1984.- 295 с.

- Herouni P.M. History of NF-FF and holography in the USSR // Trans. of XIV ESA Symp. on Antenna Measurements, ESTES, Netherlands, 1991. - P. 5-18.
- 2. Slater D. A 550 GHz near-field antenna measurement system for the NASA submillimeter wave astronomy satellite // Antenna Measurement Techniques Association Conference. October 3-7, 1994.

- Патент No 2017164, Российская Федерация, МКИ G01R 29/08. Устройство для измерения распределения поля в раскрыве антенны / В.Г. Аветисян (РА). Приоритет изобретения 30.04.91. Опубл. 30.07.94. Бюл. No 14. – 7 с.
- Патент No 1012, Республика Армения, МКИ G01R 29/08. Устройство для измерения распределения поля в раскрыве антенны / В.Г. Аветисян (РА). Приоритет изобретения 29.08.2000. Опубл. 17.09.2001. Бюл. No 3. – 11 с.
- 5. Sinebair G. Theory of models of electromagnetic systems // Proc. of the IRE. 1948. V. 36, No11.
- 6. Anderson T.N. State of the waveguide art // Microwave Journal. December, 1982. P. 22-48.
- 7. Ваганов Р.Б., Матвеев Р.Ф., Мериакри В.В. Многоволновые волноводы со случайными нерегулярностями. М.: Сов. радио, 1972. 231 с.
- Стариков В.Д. Методы измерения на СВЧ с применением измерительных линий. М.: Сов.радио, 1972. 202 с.

ЗАО "РАО МАРС". Материал поступил в редакцию 22.06.2004.

Վ.Հ. ԱՎԵՏԻՍՅՄՆ

ԳԵՐՉԱՓ ԱԼԻՔԱՏԱՐՆԵՐԻ ՇԱՐԺԱԿԱՆ ՄԻԱԿՑՈՒՄՆԵՐՈՎ ԿԱՐՃ ՄԻԼԻՄԵՏՐԱՆՈՑ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ՓՈԽԱՆՑՄԱՆ ԳԾԵՐ

Բերվում կարմ միլիմետրանոզ փոխանզման են ալիքների տիրույթի գծի մոդելի հզորությամբ ցածրհամախականային փուլով և փոխանցման բնութագրերի անկայունության փորձարարական հետագոտության արդյունքները։ Գիծը նախատեսված է հարթության վրա հետազոտվող էլեկտրամագնիսական դաշտերի ամպլիտուդա-փուլալին բաշխվածության չափումներում օգտագործելու համար։ Այն բաղկացած է գերչափ սնամեջ մետաղական ալիքատարների հատվածներից, որոնք միմյանց նկատմամբ շարժական են, սակայն չափման ընթացքում գծի ամբողջական երկրաչափական երկարությունը մնում է անփոփոխ։

V.H. AVETISSYAN

THE SHORT MILLIMETER WAVEBAND TRANSMISSION LINES WITH MOBILE JOINTS OF SUPERDIMENSIONAL WAVEGUIDES

The experimental investigation results of transmission characteristic instabilities in phase and in power of low-frequency model in short millimeter waveband transmission lines are presented. The line is intended for using at amplitude-phase distribution measurements for investigating electromagnetic fields over a plane. It consists of superdimensional hollow metallic waveguide pieces, which are mobile relative to each other, however, a total geometrical path length of the line is invariable in a measurement process.