#### ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2006. Т. LIX, № 1.

УДК 621.372

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

## В.Г. АВЕТИСЯН

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ В АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ДИАПАЗОНА КОРОТКИХ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Рассматриваются вопросы применения полых металлодиэлектрических сверхразмерных волноводов и элементов на их основе в линии передачи сигнала диапазона коротких миллиметровых волн (KMMB) и входных узлах аппаратуры при измерениях амплитудно – фазового распределения ближнего поля антенн диапазона КММВ.

*Ключевые слова:* антенные измерения, ближнее поле, металлодиэлектрические волноводы, квазиоптическое приближение.

Исследование Космоса, зондирование поверхности Земли, современная связь, радиолокация, радионавигация и т.д. требуют построения радиотехнических систем все более высокочастотных диапазонов, вплоть до инфракрасного. Это обусловлено существенным возрастанием информационной емкости и разрешающей способности радиотехнических систем, неотъемлемой частью которых является антенная система. Для проектирования перечисленных радиотехнических систем требуется точное определение характеристик антенных систем и их аттестация. Эту задачу для широкого класса радиолокационных, радионавигационных, связных наземных и бортовых антенных систем успешно решает прогрессирующий метод автоматических измерений по зоне раскрыва испытуемой антенной системы [1–3]. Суть метода заключается в измерении посредством сканируемого зонда амплитудно – фазового распределения (АФР) ближнего поля антенны в дискретных точках поверхности измерения и последующем восстановлении дальнего поля с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье.

Для таких измерений в диапазоне миллиметровых волн в [4] предложен сканер с подвижной линией передачи сигнала этого диапазона через участок <<сканируемый зонд – стационарная измерительная аппаратура>>. Цель – повышение точности измерения  $A\Phi P$  путем снижения нестабильностей передаточной характеристики подвижной линии по фазе  $\Delta \phi_{\rm H}$  и по мощности  $\Delta \eta_{\rm H}$ . Линия передачи состоит из отрезков полых сверхразмерных металлических волноводов прямоугольного сечения с рабочей модой  $H_{10}$  и содержит фильтры для поглощения высших паразитных мод. В процессе сканирования зонда на плоскости измерения линия передачи с помощью соответствующих механизмов сканера синхронно работает со сканером так, что ее общая геометрическая длина остается неизменной. Это достигается применением двух тромбонов, компенсирующих изменение длины линии. Они являются частями линии передачи и построены на тех же

сверхразмерных волноводах. Тромбоны поочередно работают при сканировании зонда вдоль координат X и Y по плоскости измерения. При перемещении зонда, установленного на подвижном конце линии передачи, вдоль одной из координат на расстояние L колено соответствующего тромбона одновременно перемещается на расстояние L/2 в направлении, требуемом для компенсации изменения в длине линии. Таким образом, общая геометрическая длина линии передачи в процессе сканирования зонда остается неизменной.

Существенными нерегулярностями предложенной линии являются стык зонда с линией, представляющий собой переход от открытого конца одномодового прямоугольного волновода к сверхразмерному многомодовому волноводу линии, 90<sup>0</sup> уголки сверхразмерных волноводов и подвижные сочленения последних. Конструкция подвижного сочленения изображена на рис.1а.



Рис. 1. Подвижное сочленение: 1 – внешний волновод, 2 – фторопластовые прокладки, 3 – внутренний волновод, 4 – поглотитель, 5 – рупорное окончание внутреннего волновода

Волноводы 1 и 3 соосно скользят относительно друг друга вдоль продольной оси Z благодаря прокладкам 2 из односторонне фольгированного фторопласта, напаянного фольгированной стороной на волновод 3 по внешнему периметру его сечения. Прокладки обеспечивают стабильность механических и электрических характеристик сочленения при относительном скольжении волноводов. За прокладками следует наклеенный также по периметру внешнего сечения внутреннего волновода 3 поглотитель 4 электромагнитной энергии. Он экранирует поле в волноводах от внешних полей и поглощает волны, возбужденные на нерегулярности сочленения и проникающие в пространство между внутренней поверхностью волновода 1 и внешней поверхностью волновода 3. Для снижения уровня возбуждаемых мод в сочленении конец внутреннего волновода 3 имеет рупорное окончание 5 с малым углом раскрыва  $2\phi_0 \leq 10^0$ , а щель между стенками рупорного

окончания 5 и внутренними стенками волновода 1 составляет величину  $S \le 0, 1\lambda$  ( $\lambda$  - длина рабочей волны).

Экспериментальное исследование макета низкочастотной модели такой линии передачи с одним компенсирующим тромбоном показало следующее. При внутреннем сечении волновода 1 -  $a \cdot b = 56 \cdot 32 \text{ мм}^2$  и волновода 3 -  $a \cdot b = 48 \cdot 24 \text{ мM}^2$ , размере щели S = длине линии около 2*м* на частоте измерений  $f = 33 \Gamma T \mu (\lambda \approx 9, 1 M M \mu)$ 0,4мм И соответствующие параметры квазиоптического приближения  $k = 2\pi a/\lambda$  равны 39 и 33) нестабильность передаточной характеристики такой линии по фазе  $\Delta \phi_{
m H}$  составляла  $\pm 7^{
m o}$ , по мощности  $\Delta \eta_{\rm H} - \pm 0.5 \, \mu$ , а величина потерь линии - 2,44  $\mu$ . Относительно большая величина потерь обусловлена частичным поглощением основной моды Н10 в фильтрах типов мод линии. Измерения проводились с помощью измерительной линии P1-12 (8 – мм диапазона) при различных положениях оконечного короткозамкнутого сверхразмерного волновода (его суммарное перемещение составляло 80мм с шагом в 1,0мм) и при неизменности длины линии, осуществляемой на каждом шаге компенсацией изменения путем соответствующего перемещения сверхразмерного длины линии колена компенсирующего тромбона (суммарное перемещение 40мм с шагом в 0,5мм).

На рис.1б изображено сечение сочленения в плоскости A – A. С левой стороны и снизу показаны известные диаграммы распределения электрического поля  $E = E_y \sim \sin \pi x/a$  основной рабочей моды H<sub>10</sub> вдоль осей X и Y [5]. Кружки охватывают области щели, наиболее эффективные с точки зрения возбуждения паразитных мод. В этих областях щели поле имеет максимальное или близкое к нему значение.

Из физических соображений ясно, что для достижения меньших значений  $\Delta arphi_{
m H}$  и  $\Delta\eta_{
m H}$  желательно выбрать такую рабочую моду, которая имела бы распределение поля, приближающееся к нулю на нерегулярности, в данном случае являющейся щелью между сочленяемыми волноводами. В качестве такой моды, при сочленяемых таким образом сверхразмерных круглых волноводах, может служить мода Но1. Она имеет лишь поперечную азимутальную компоненту электрического поля  $E = E_{a} \sim J_1(v_{11} r/a) (J_1 - функция Бесселя$ первого порядка, v ≈ 3,83 - первый корень J1, а – радиус круглого волновода). Сечение такого сочленения на сверхразмерных круглых волноводах в аналогичной плоскости А – А (рис.1а) показано на рис.2а, а внизу этого рисунка показана диаграмма распределения поля вдоль радиуса. Поле равно нулю в центре и у стенок волновода, где имеется щель. квазиоптического приближения, т.е. условия ka1>ka2 >>1 (a1 и a2 -Необходимость соответственно радиусы внешнего и внутреннего волноводов), следует из того факта, что в этом приближении мода Ногимеет весьма слабое затухание и малые потери преобразования на уголках круглого волновода [6]. Однако эффективность применения этой моды снижается двумя факторами. Первый фактор - сложность изготовления перехода от зонда в виде прямоугольного одномодового волновода с модой Н10 к сверхразмерному круглому с модой Но1.

Второй фактор – наличие вырожденной моды E<sub>11</sub>, имеющей ту же критическую частоту. Для поставленной задачи минимизации нестабильности, а также и фазовой передаточной характеристики  $\Delta \varphi_{\rm H}$  последний фактор существенно снижает эффективность применения моды H<sub>01</sub>. Потребуется наличие фильтров для подавления паразитных мод и, особенно, для вырожденной моды E<sub>11</sub>, что выполнить непросто.



Рис.2. Сечения подвижного сочленения в плоскости А – А при различных конфигурациях волноводов: 1 – внешний волновод, 2 – рупорное окончание внутреннего волновода, 3 – слой диэлектрика

Другой возможный путь снижения  $\Delta \phi_{\rm H}$  и  $\Delta \eta_{\rm H}$  предложенной квазиоптической линии – ее построение на сверхразмерных металлодиэлектрических волноводах (МДВ). В [7] показано, что в прямоугольных МДВ, покрытых изнутри слоем диэлектрика нерезонансной толщины ( kd  $\sqrt{\epsilon}-1 \neq \pi n/2$ , n=1,2,3...; d – толщина слоя, ε диэлектрическая проницаемость ), при квазиоптическом приближении ka>>1 продольная магнитная волна моды LM11 имеет только поперечное линейно – поляризованное электрическое поле вида  $E \sim (\sin \pi y/b) \cdot (\sin \pi x/a)$ . Для случая МДВ квадратного сечения диаграммы распределения электрического поля показаны на рис.2б. Следствием такого распределения поля является концентрация энергии волны в центральной области волновода и спадающее до нулевого значения электрическое поле у стенок, что в нашем случае обеспечивает практически нулевое значение электрического поля по всему периметру щели. Таким образом, будем иметь весьма низкий уровень возбуждаемых на щели паразитных мод. Вдобавок, мода LM11 имеет весьма низкие потери распространения, малые потери преобразования на уголках (в обеих плоскостях), простой в изготовлении возбудитель. Кроме этого, что

весьма существенно, такая линия на МДВ обладает свойством повышенной самофильтрации от высших мод.

Аналогичными свойствами будет обладать предложенная линия передачи, если ее построить на круглых МДВ, опять в квазиоптическом приближении ka>>1, с рабочей модой ЕН<sub>11</sub>. Электрическое поле этой моды является также поперечным и линейно поляризованным, но поле от центра волновода к краям спадает до нулевого значения по функции Бесселя J<sub>0</sub> нулевого порядка [8]. Диаграммы распределения поля Е моды ЕН<sub>11</sub> по осям X и Y в сечении круглого сверхразмерного волновода показаны на рис.2в. Слой диэлектрика опять же должен быть антирезонансной толщины. Затухание волны, как и в случае моды LM<sub>11</sub>, существенно возрастает в областях частот, ширина которых очень узка и составляет величину порядка (1/ka)<<1. Наконец, отметим высокую эффективность возбуждения мод LM<sub>11</sub> и EH<sub>11</sub> с помощью простых в изготовлении возбудителей с исходной модой H<sub>10</sub> прямоугольного одномодового волновода, которая составляет не менее 0,93.

Следует ожидать эффективным построение предложенной линии передачи на МДВ с модами LM<sub>11</sub> и EH<sub>11</sub> с точки зрения не только уменьшения потерь при передаче сигнала и улучшения стабильности передаточных характеристик, но и возможности исключения фильтров для высших мод благодаря отмеченному выше свойству повышенной самофильтрации рассматриваемых линий на МДВ. Дополнительное преимущество в применении сверхразмерных МДВ обусловлено повышенными характеристиками узлов и элементов на их основе [9,10], являющихся входными узлами радиоизмерительной аппаратуры при антенных измерениях по ближнему полю [11,12]. Это интерферометры Маха-Цандера, квазиоптические делители мощности, аттенюаторы и смесители.

На рис.3 изображена блок – схема исследования квазиоптического фазовращателя телескопического типа с предложенным подвижным сочленением квадратных МДВ с рабочей LM<sub>11</sub> модой [13].



Рис.3. Блок - схема исследования квазиоптического фазовращателя

Измерения проводились с помощью крестообразного ответвителя 5 С полуотражающей пластиной по методике, изложенной в [14], на частоте f=132 ГГц с применением возбудителя 3 моды LM11 и квазиоптического аттенюатора 4 [9], а также квазиоптической детекторной секции 6 [10]. В качестве генератора 1 применялась лампа обратной волны, чья мощность на измерительную схему подается через вентиль 2. Аттенюатором 4 измерялись значения А<sup>тах</sup>(дБ) и А<sup>тіп</sup>(дБ) интерференционной волны в неподвижной детекторной секции 6 в зависимисти от перемещения оконечного короткозамкнутого волновода 7 фазовращателя и соответствующего перемещения короткозамыкающего поршня 9. Одновременно индикатором перемещений 8 поршня 9 замерялись и смещения минимума интерференционной волны в секции 6. По значениям  $A^{max}(\mathcal{AB})$  и  $A^{min}(\mathcal{AB})$  вычислялись значения коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), а затем и потерь по мощности. Разброс значений последних определяет  $\Delta \eta_{\rm H}$ . Из разброса значений разности соответствующих перемещений волновода 7 и поршня 9 (при измерениях смещения минимума интерференционной волны) определяется  $\Delta arphi_{
m H}.$ Внутренние размеры волновода 10 фазовращателя - 14 · 14 мм<sup>2</sup>, волновода 7 - 16,5 · 16,5 мм<sup>2</sup>. Размер щели S = 0,15*мм*. Волноводы покрыты изнутри слоем фторопласта (ε = 2,07) с толщиной d=0,25 мм. Угол раскрыва рупорного окончания 11 составляет величину  $2 \varphi_0 \leq 10^0$ .

При перемещении волновода 7 на расстояние 10*мм* с шагом 0,1*мм* суммарные погрешности по фазе не превосходили  $\pm 3,2^{\circ}$ , по мощности -  $\pm 0,25$  *дБ*. Эти результаты косвенно подтверждают целесообразность и эффективность применения сверхразмерных МДВ при построении предложенной линии передачи, предназначенной для измерения параметров испытуемых антенн диапазона КММВ по их ближним полям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Herouni P.M. History of NF-FF and Holography in the USSR // Trans. of X<sup>2</sup>V ESA Symp. on Antenna Measurements, ESTES, Netherlands, 1991. - P. 5-18.
- 2. Joy E.B. Near field testing of radar antennas // Microwave Journal. January 1990. P. 119 130.
- 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.
- 4. Патент N 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. N 14.
- 5. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973. 480 с.
- 6. Anderson T.N. State of the waveguide art // Microwave Journal. December 1982. P. 28-48.
- Казанцев Ю.Н., Харлашкин О.А. Прямоугольные волноводы класса "полый диэлектрический канал" // Радиотехника и электроника. - 1978. – N 10. - С. 2060 – 2068.

- Казанцев Ю.Н., Харлашкин О.А. Круглые волноводы класса <<полый диэлектрический канал>> // Радиотехника и электроника. – 1984. – N 8. - С. 1441 – 1450.
- Айвазян М.Ц. Функциональные элементы волноводных трактов на основе волноводов класса <<полый диэлектрический канал>> квадратного сечения для коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн: Дис... канд.техн. наук. - М., 1985. - 176 с.
- Агабабян К.Р. Функциональные элементы радиоприемных устройств коротковолновой части миллиметрового диапазона на основе квадратных металлодиэлектрических волноводов: Дис.... канд. физмат. наук. – Ереван, 1992. - 123 с.

Аветисян В.Г. К измерению параметров антенн коротковолновой части миллиметрового диапазона // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1995. - Т. 49, N2. - С.114 - 119.

- Արտոնագիր N 1013, Հայաստանի Հանրապետություն, ՄԱԴ G01R 29/08.// Անտենայի բացվածքում դաշտի բաշխվածությունը չափող սարք / Վ.Հ. Ավետիսյան (ՀՀ)։ Առաջնության թվ. 29 08 2000։ Հրապարակման թվ. 17.02.2001։ ՊՏ N 3.
- Արտոնագիր N 366, Հայաստանի Հանրապետություն, ՄԱԴ H01Q 15/06 // Քվազիօպտիկական Ֆազաշրջիչ / Կ.Ռ. Աղաբաբյան, Ռ.Ս. Ավագյան, Վ.Հ. Ավետիսյան (ՀՀ)։ Առաջնության թվ. 01.07.96։ Հրապարակման թվ. 08.08.97։ ՊՏ N 1։
- Bled J., Bresson A., Popoular P., Wegrowe J.G. Nouvelles techniques d'utilisation des ondes millimetriques et submillimetriques // L'onde Electrique. - 1964. - N 442, Janvier. - P. 26-35.
- ЗАО "РАО МАРС". Материал поступил в редакцию 16.08.2004.

#### Վ.Հ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

## ՄԵՏԱՂԱՄԵԿՈՒՍԻՉ ԱԼԻՔԱՏԱՐՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ ԿԱՐՃ ՄԻԼԻՄԵՏՐԱՆՈՑ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ԱՆՏԵՆԱՅԻՆ ՉԱՓՈՒՄՆԵՐՈՒՄ

Քննարկվում է սնամեջ մետաղամեկուսիչ գերչափ ալիքատարների և դրանց վրա հիմնված տարրերի կիրառումը կարձ միլիմետրանոց ալիքների տիրույթի ազդանշանի փոխանցման գծում և ապարատուրայի մուտքային հանգույցներում, որոնք օգտագործվում են կարձ միլիմետրանոց ալիքների տիրույթի անտենաների մոտակա դաշտի ամպլիտուդա-փուլային բաշխվածության չափումներում։

*Առանցքային բառեր*. անտենային չափումներ, մոտակա դաշտ, մետաղամեկուսիչ ալիքատարներ, քվազիօպտիկական մոտավորություն։

## V. H. AVETISYAN

### APPLICATION OF METAL-DIELECTRIC WAVEGUIDES IN SHORT MILLIMETER WAVEBAND ANTENNA MEASUREMENTS

Problems of hollow metal-dielectric superdimensional waveguides and elements on their basis in short millimeter waveband transmission line and in input units of the apparatus for measuring near-field amplitude-phase distribution of short millimeter waveband antennas are discussed.

Keywords: antenna measurements, near-field, metal-dielectric waveguides, quasi-optical approximation.