

УДК 621.396.96

О.О.Дробахин, А.В.Доронин, Д.Ю.Салтыков

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ
КАЛИБРОВКИ ДЕТЕКТОРОВ В ТРЕХЗОНДОВОМ
ВОЛНОВОДНОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ КОМПЛЕКСНОГО
КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ**

Введение. Применение волн СВЧ диапазона для бесконтактных измерений в свободном пространстве требует использования волноводной техники. Наиболее полная информация об объекте при одностороннем доступе содержится в комплексном коэффициенте отражения (КО). Современные измерители КО базируются на концепции 12-полюсного преобразователя на основе мостов [1], что при использовании волноводных элементов приводит к достаточно громоздким конструкциям. В этом отношении зондовые волноводные секции имеют существенные преимущества. По сути, традиционная 4-х зондовая секция представляет собой 12-полюсный преобразователь. Для целей измерения комплексного КО достаточно использовать 3-х зондовую измерительную секцию [2]. Для получения искомого значения КО решается система квадратных уравнений, которые графически представимы в виде двух окружностей. В классических работах решение находили графически на диаграмме Вольперта-Смита [2], в настоящее время, естественно, применяются компьютерные технологии. Все указанные измерительные устройства могут быть рассмотрены с единых позиций голографии с тремя опорными сигналами [3,4]. Эффективность работы указанного класса измерителей зависит от эффективности проведения калибровки

Постановка задачи. Целью данной работы является построение на основе данных реального эксперимента математической модели выхода детектора с применением нейросетевых технологий [5] для обеспечения калибровки диодных датчиков мощности, т.е. обеспечения максимально строгого выполнения квадратичности характеристик.

Построение математической модели измерителя. Рассмотрим случай, когда зонды с детекторами расположены в волноводе

эквидистантно на расстоянии $\Lambda/8$ друг от друга (Λ – длина волны в волноводе), причем детекторы имеют квадратичные характеристики. Выходной сигнал, полученный с детекторов, в этом случае будет иметь вид:

$$P_m = k_m \left| \exp\left(-j \frac{2\pi}{\Lambda} \frac{\Lambda}{8} (m-1)\right) + \dot{\Gamma} \exp\left(j \frac{2\pi}{\Lambda} \frac{\Lambda}{8} (m-1)\right) \right|^2, \quad (1)$$

где $m=1,2,3$. При этом сигналы $\exp\left(-j \frac{2\pi}{\Lambda} \frac{\Lambda}{8} (m-1)\right)$ имеют смысл опорных, а сигналы $\dot{\Gamma} \exp\left(j \frac{2\pi}{\Lambda} \frac{\Lambda}{8} (m-1)\right)$ содержат информацию об исследуемом комплексном коэффициенте отражения $\dot{\Gamma} = \Gamma' + j\Gamma''$. Коэффициенты пропорциональности k_m для каждого из детекторов устраняются из окончательных выражений путем деления результатов измерений (1) на результат измерений в режиме бегущей волны, то есть при согласованной нагрузке. Таким образом, имеем систему трех нормированных величин:

$$p_1 = |1 + \dot{\Gamma}|^2; p_2 = \left| e^{-j\frac{\pi}{2}} + \dot{\Gamma} \right|^2; p_3 = \left| e^{-j\pi} + \dot{\Gamma} \right|^2. \quad (2)$$

Далее согласно методу голографии с тремя опорными сигналами [3] необходимо сформировать величины $p_1 - p_2$ и $p_1 - p_3$, при этом процедура вычитания сигнала при согласованной нагрузке из каждого из P_m может быть опущена. В результате получим систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 2 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma' \\ \Gamma'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 - p_2 \\ p_1 - p_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Число обусловленности данной системы в метриках l_1, l_2 , эвклидовой и чебышевской равно 3, 2,618, 3, 3, для сравнения число обусловленности для 4-х зондового измерителя равно 1, 2, 1, 1. Следует отметить, что число обусловленности не зависит от значений коэффициента отражения, в то время как решение системы квадратных уравнений классическим методом приобретает большие погрешности при коэффициенте отражения, приближающемся к единице. Решение системы (3) может быть записано в явном виде:

$$\Gamma' = 0.25(p_1 - p_3); \quad \Gamma'' = 0.25(p_1 - 2p_2 + p_3) \quad (4)$$

Интересно отметить, что первое выражение в (4) пропорционально первой разности, а второе – второй разности нормированных значений детекторов.

Синтез нейронной сети. Была создана математическая модель трехслойной нейронной сети с обратной связью [5]. Первый слой имел 1 нейрон, что определялось входным отсчетом диодного датчика мощности для конкретного положения x зонда в измерительной линии. Третий слой имел 1 нейрон, что соответствовало выходному значению нормированной величины $100\sin^2(2\pi x/\Lambda)$, где Λ – длина волны в волноводе измерительной линии. Первый и второй слои (входной и скрытый) нейронной сети имели сигмоидальную функцию (S – функция) активации слоёв нейронов, третий (выходной) слой – линейную.

Была проведена серия тренировок математической модели нейронной сети с применением ряда алгоритмов (Левенберга - Маркварда, сопряженных градиентов, Флетчера - Пауэлла, классический алгоритм обратного распространения, алгоритм обратного распространения ошибки с использованием метода секущих, алгоритм масштабируемых сопряженных градиентов, алгоритм Полака - Рибера) и различным числом нейронов во внутреннем слое (от 8 до 12 с шагом 1, и от 10 до 80 с шагом 10). Следует отметить, что для каждого выбранного числа нейронов во внутреннем слое было предпринято, по крайней мере, 3 попытки подбора весов. Качество сформированной сети проверялось путем предъявления набора входных данных.

Наилучшие результаты показала модель нейронной сети, имеющая 10 нейронов в скрытом слое, при этом был использован алгоритм масштабируемых сопряженных градиентов. Следует отметить, что число нейронов в скрытом слое превышало расчетные значения. Линейная модель нейронной сети, также не показала хороших результатов, несмотря на явный линейный характер связи зависимости входных данных и целевого вектора нормированных данных. Точность обучения составляла 10^{-4} .

Результаты реального эксперимента. Реальные измерения были проведены для подвижного короткозамыкающего поршня (идеальное значение модуля коэффициента отражения 1,0) при его смещении от

первоначального положения с шагом 5 мм. Изменение модуля коэффициента отражения было обеспечено использованием аттенюатора, включенного между короткозамыкающим поршнем и измерительной секцией. Данные измерений для случая проведения калибровки и в ее отсутствие приведены в таблице 1. Применение нейронных сетей для калибровки демонстрирует существенное превосходство в точности оценок как модуля КО, так и местоположения отражателя по сравнению со случаем отсутствия такой процедуры.

Таблица 1

Оценки комплексного КО методом голографии с тремя опорными сигналами

Оценка модуля КО после калибровки, отн. ед.	Оценка модуля КО без калибровки, отн. ед.	Оценка местоположения отражателя после калибровки, мм	Погрешность оценки местоположения, мм	Оценка местоположения отражателя без калибровки, мм	Погрешность оценки местоположения, мм
Данные для короткозамыкающего поршня					
0,97	0,78	0	0	0	0
0,99	0,73	5,03	0,03	4,88	0,12
0,97	0,75	10,10	0,10	9,70	0,30
0,96	0,80	15,05	0,05	14,83	0,17
Данные для короткозамыкающего поршня при наличии аттенюатора с затуханием 6 дБ					
0,49	0,41	0	0	0	0
0,52	0,39	5,11	0,11	4,93	0,07
0,50	0,40	10,34	0,34	9,85	0,15
0,47	0,41	15,24	0,24	14,91	0,09
Данные для короткозамыкающего поршня при наличии аттенюатора с затуханием 30 дБ					
0,03	0,02	0	0	0	0
0,03	0,02	4,95	0,05	4,94	0,06
0,03	0,02	9,99	0,01	9,88	0,12
0,02	0,01	14,58	0,42	14,49	0,51

Выводы. Данные эксперимента показывают, что калибровка позволяет существенно уточнить значения модуля КО, однако оценки местоположения поршня, а, значит, оценки фазы коэффициента отражения, могут в ряде случаев быть получены более точными в отсутствие калибровки. В целом, метод обработки, принятый в голографии с тремя опорными сигналами, при условии построения математической модели выхода детекторов на основе нейросетевых технологий, показал, что он обеспечивает возможность измерения комплексного КО как близкого к единице, так и близкого к нулевому значению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рейзенкинд Я.А., Следков В.А. Состояние и перспективы развития методов измерения параметров двухполюсников и четырехполюсников на СВЧ. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1988. – №8. – С. 30-60.
2. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах. – М.: Физматлит, 1963. – 364 с.
3. Бейтс Р., Мак-Доннел М. Восстановление и реконструкция изображений. – М.: Мир, 1989. – 336 с.
4. Drobakhin O.O., Karlov V.A. Holographic Approach to Microwave Measurements // Proc. of the 16th URSI Int. Symp. on Electromagnetic Theory. – Vol. 1. – Thessaloniki (Greece). – 1998. – P.109-111.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006.–1104 с.

Получено 21.11.2007 г.