

В.Г. АВETИСЯН, М.В. МАРКОСЯН, А.А. ОГАНЕСЯН, С.Г. ЭЙРАМДЖЯН

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДУЛЕЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Сообщение 1. Методика тестирования

Предлагается методика тестирования модулей активной фазированной антенной решетки (АФАР). Модуль состоит из четырех элементарных приемо-передающих ячеек, каждая из которых содержит электронно-управляемые аттенуатор и фазовращатель, усилители мощности, маломощные усилители и излучатель, параметры которых достаточно просто тестируются по предлагаемой методике.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, приемо-передающая ячейка, методика тестирования.

В настоящее время в СВЧ радиотехнических системах различного рода широко применяются АФАР. Несомненным преимуществом АФАР является обеспечение ее высокой направленности вместе с возможностью оперативного управления параметрами АФАР в различных режимах работы радиотехнической системы [1]. Особенностью АФАР является наличие активных элементов в ее приемо-передающих ячейках, а именно: усилителей мощности в режиме передачи, маломощных усилителей для режима приема, аттенуаторов, фазовращателей и т.д.

Цель настоящей работы - рассмотреть вопрос тестирования параметров приемо-передающих модулей АФАР.

В нашем случае модуль АФАР состоит из четырех элементарных приемо-передающих ячеек, каждая из которых включает в себя узлы согласно приведенной на рис.1 блок-схеме.

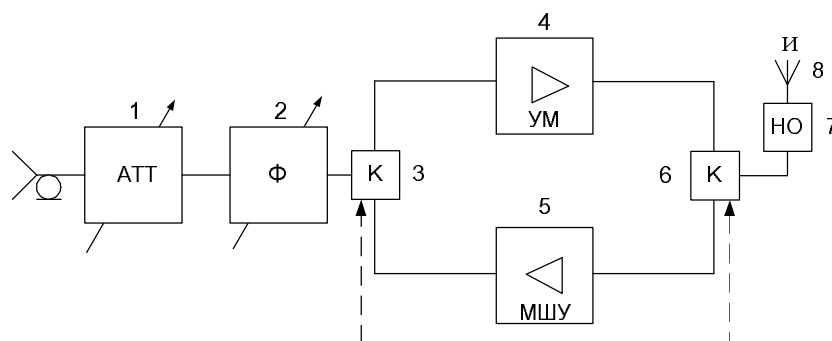


Рис.1. Блок-схема приемо-передающей ячейки: 1 - электронно-управляемый дискретный аттенуатор, 2 - электронно-управляемый дискретный фазовращатель, 3, 6 - синхронно-работающие коммутаторы, 4 - цепочка усилителей мощности, 5 - цепочка маломощных усилителей, 7 - направленный ответвитель, 8 - излучатель

Ослабление аттенюатора 1 управляется в определенном интервале и с определенным дискретом. Управляемый фазовращатель 2 осуществляет изменение фазы в определенном интервале углов и с определенным дискретом угла. В режиме излучения сигнал усиливается цепочкой балансных микрополосковых усилителей мощности 4. В режиме приема работает цепочка малошумящих усилителей (МШУ) 5. Переключение каналов приема и передачи осуществляется синхронно работающими коммутаторами 3 и 6. Направленный ответвитель 7 в виде моста Ланге [2] следует за коммутатором 6. Мост обеспечивает квадратурные сигналы для получения волны правой круговой поляризации, излучаемый квадратным микрополосковым излучателем 11 размерами $\lambda/2 \cdot \lambda/2$.

Методика тестирования включает проверку работоспособности вышеперечисленных узлов и соответствия их основных параметров техническому заданию (ТЗ) и паспортным данным. Параметры аттенюатора 1, фазовращателя 2, цепочки усилителей мощности 4 и излучателя 8 тестируются посредством определения амплитуд E_y , E_x и фаз φ_y , φ_x вертикальной $\vec{E}_y$ и горизонтальной $\vec{E}_x$ комплексных составляющих электрического поля $\vec{E}$ ($\vec{E} = \vec{x}\vec{E}_x + \vec{y}\vec{E}_y$) в дальней зоне излучателя 8 тестируемого модуля. Блок-схема тестирования E_y , E_x , φ_y , φ_x приведена на рис. 2.

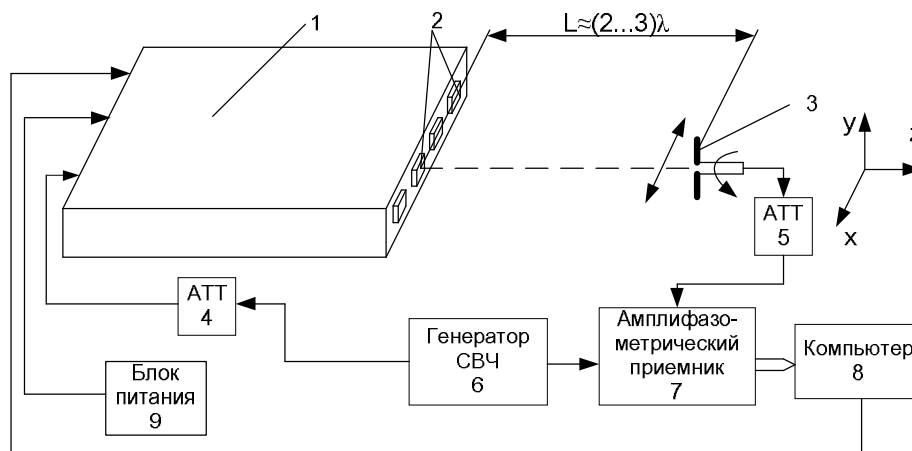


Рис.2. Блок-схема тестирования модуля АФАР: 1 - модуль АФАР, 2 - микрополосковый квадратный излучатель элементарной приемопередающей ячейки, 3 - измерительная антенна (полуволновой вибратор), 4, 5 - калибрующие аттенюаторы, 6 - СВЧ генератор, 7 - амплифазометрический приемник, 8 - компьютер, 9 - блок питания

Управление подачей рабочих напряжений от блока питания на приемо-передающие ячейки осуществляется компьютером через модуль. Расстояние $L \approx (2...3)\lambda$ между плоскостью расположения излучателей элементарных ячеек 2 модуля 1 и плоскостью, в которой перемещается измерительная антенна 3 в виде полуволнового вибратора, обеспечивает дальнюю зону излучателя ячейки [3]. Продольная ось Z измерительной антенны 3 совмещается с нормалью, проведенной через центр симметрии излучателя тестируемой ячейки. При этом остальные ячейки обесточены. Для определения составляющих $\dot{E}_y$ и $\dot{E}_x$ измерительная антенна 3 имеет возможность дискретного поворота вокруг продольной оси Z на 90° . Выходными сигналами амплифазометрического приемника 7 [4] являются амплифазные ортогональные компоненты U_{1y} , U_{2y} составляющей $\dot{E}_y$:

$$\dot{E}_y = U_{1y} + jU_{2y} = E_y \cos \varphi_y + jE_y \sin \varphi_y = E_y e^{j\varphi_y} \quad (1)$$

или амплифазные компоненты U_{1x} , U_{2x} составляющей $\dot{E}_x$:

$$\dot{E}_x = U_{1x} + jU_{2x} = E_x \cos \varphi_x + jE_x \sin \varphi_x = E_x e^{j\varphi_x} \quad (2)$$

в зависимости от ориентации полуволнового вибратора измерительной антенны 3. Причем амплитуды E_y , E_x и фазы φ_y , φ_x соответственно составляющих $\dot{E}_y$ и $\dot{E}_x$ поля $\vec{E}$ вычисляются компьютером 8 по измеренным амплифазным компонентам посредством очевидных выражений

$$E_x = \sqrt{U_{1x}^2 + U_{2x}^2}; E_y = \sqrt{U_{1y}^2 + U_{2y}^2}, \quad (3)$$

$$\varphi_x = \arctg \frac{U_{2x}}{U_{1x}}; \varphi_y = \arctg \frac{U_{2y}}{U_{1y}}. \quad (4)$$

Прежде чем описать методику тестирования параметров вышеотмеченных узлов, отметим, что важным из тестируемых параметров является заданный в ТЗ уровень излучаемой мощности $P_{\text{мод}}^0$ на входе излучателя 8 тестируемой ячейки. Он обеспечивается опять же заданными в ТЗ уровнем мощности $P_{\text{вх}}^0$ на входе ячейки и коэффициентом усиления $K_{\text{ум}}^0$ по мощности ячейки. Поэтому в процессе тестирования необходимо обеспечение заданных $P_{\text{вх}}^0$ и $P_{\text{мод}}^0$.

Уровень $P_{\text{вх}}^0$ калибруется показанием калибрующего аттенюатора 4 блок-схемы 2 путем измерения его выходной мощности. Предположим, что показанию ослабления G_{04}^0 (дБ) аттенюатора 4 соответствует $P_{\text{вх}}^0$.

Для обеспечения $P_{\text{мод}}^0$ производится следующая начальная калибровка. Выход аттенюатора 4 подсоединяется к входу коаксиально-волноводного перехода (КВП), который располагается перед измерительной антенной 3 так, чтобы их продольные оси симметрии совмещались, а расстояние от плоскости волноводного фланца КВП до измерительной антенны равнялось L . Затем измерителем мощности и вторым КВП, подсоединенным к первому КВП, ручкой аттенюатора 4 устанавливается

уровень мощности $P_{\text{мод}}^0/2$ на выходе фланца первого КВП. После этого второй КВП убирается, аттенюатор 5 выводится из закрытого состояния, ручкой аттенюатора 5 устанавливается ослабление $G_5^0(\text{дБ})$, необходимое для нормальной работы амплифазометрического приемника, и фиксируется вычисляемая компьютером 8 амплитуда E_{y0} , соответствующая вертикальной составляющей поля в точке расположения измерительной антенны 3, ориентированной вдоль оси Y. Ясно, что при тестировании элементарной ячейки модуля по блок-схеме, изображенной на рис.2, величина E_{y0} с учетом круговой поляризации волны, излучаемой излучателем ячейки, будет фиксироваться при входной мощности излучателя, равной $P_{\text{мод}}^0$, и показании 0G_5 аттенюатора 5, равном

$$^0G_5 = G_5^0 + (G_{\text{изл}} - G_{\text{КВП}}), \quad (5)$$

где $G_{\text{изл}} = G_{\text{изл}}(\text{дБ})$ - коэффициент усиления излучателя, а $G_{\text{КВП}} = G_{\text{КВП}}(\text{дБ})$ - коэффициент усиления открытого конца КВП.

Таким образом, после начальных калибровок тестирование итогового коэффициента усиления $K_{\text{ум}}$ по мощности ячейки модуля в режиме передачи сводится к следующему: а) ручка аттенюатора 5 устанавливается на показание ослабления 0G_5 ; б) ручка аттенюатора 4 устанавливается на показание ослабления в районе величины G_4^0 ; в) определяется отклонение $\Delta K_{\text{ум}}(\text{дБ})$ коэффициента усиления по мощности от величины $K_{\text{ум}}^0$, заданной в ТЗ, согласно выражению

$$\Delta K_{\text{ум}}(\text{дБ}) = K_{\text{ум}}(\text{дБ}) - K_{\text{ум}}^0(\text{дБ}) = G_4 - G_4^0, \quad (6)$$

где $G_4(\text{дБ})$ - показания аттенюатора 4, при котором компьютер 8 выдает величину E_{y0} , которая свидетельствует о наличии на входе излучателя тестируемой ячейки уровня мощности $P_{\text{мод}}^0$. Очевидно, что результаты вычислений фаз φ_y при такой процедуре тестирования ячеек определяют разброс фазовых передаточных характеристик ячеек в режиме излучения.

После вышеупомянутых процедур (величин $K_{\text{ум}}^0$ и φ_y) процедура тестирования фазовращателя 2 и аттенюатора 1 (рис.1) тестируемой ячейки сводится к следующему. На электронно-управляемый аттенюатор 1 подается управляющее напряжение, и при неизменном значении E_{y0} путем отсчета разности показаний $(G_5 - ^0G_5)$ аттенюатора 5 определяются вводимые аттенюатором 1 дискрет и интервал ослабления. Тестирование же электронно-управляемого фазовращателя 2 осуществляется путем отсчета изменения фазы φ_y , вычисляемой компьютером 8.

Следующими тестируемыми параметрами в режиме излучения являются поляризационные характеристики волны, излучаемой излучателем. Для их тестирования измерительная антенна 3 поворачивается на угол 90° вокруг своей продольной оси Z, и при показаниях G_4 и 0G_5 соответственно калибрующих аттенюаторов 4 и 5 компьютером 8 вычисляется амплитуда E_{x0} и фаза φ_x горизонтальной составляющей поля $\vec{E}$. Затем компьютер 8

последовательно вычисляет угол наклона α поляризационного эллипса излучаемой волны [5]:

$$\alpha = \arctg \frac{2(E_{x0}/E_{y0})\cos(\varphi_y - \varphi_x)}{(E_{x0}/E_{y0})^2 - 1}, \quad (7)$$

коэффициент эллиптичности m этой волны:

$$m = \frac{\sqrt{1 - (E_{x0}/E_{y0})^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}}{\sqrt{(E_{x0}/E_{y0})^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha}} \quad (8)$$

и, наконец, уровень кросс-поляризации Δ_k волны паразитной круговой левой поляризации:

$$\Delta_k (\text{дБ}) = 20 \lg \frac{E_{\text{л}}}{E_{\text{п}}} = 20 \lg \frac{1 - m}{1 + m}, \quad (9)$$

где $E_{\text{л}}$ и $E_{\text{п}}$ - амплитуды волн соответственно левой и правой круговых поляризаций волны.

Тестирование заданного в ТЗ итогового коэффициента усиления $K_{\text{МШУ}}^0$ цепочки малошумящих усилителей выполняется в приемном режиме элементарной ячейки модуля. Для этого опять применяется блок-схема рис.2, но в ней модуль 1 и измерительная антенна 3 переставляются местами.

В этом случае также производятся начальные калибровки. Однако, прежде чем описать выполнение калибровок, отметим следующее. При блок-схеме рис.2 в режиме приема элементарной ячейки модуля мощность $P_{\text{вх}}^{\text{МШУ}}$ на входе цепочки МШУ 5 (см рис.1), с учетом деления мощности пополам мостом Ланге, определится, согласно [6], соотношением

$$P_{\text{вх}}^{\text{МШУ}} = 0,5 \times P_0^{\text{ИА}} G_{\text{ИА}} G_{\text{изл}} \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2 G_6, \quad (10)$$

где $P_0^{\text{ИА}}$ - мощность на входе измерительной антенны 3; $G_{\text{ИА}}$ - коэффициент усиления измерительной антенны 3; G_6 - коэффициент передачи коммутатора 6; λ - длина рабочей СВЧ волны.

Мощность на выходе ячейки $P_{\text{вых}}^0$ (на входном разъеме аттенюатора 1 рис.1) определяется выражением

$$P_{\text{вых}}^0 = P_{\text{вх}}^{\text{МШУ}} K_{\text{МШУ}}^0 G_3 G_2 G_1 = 0,5 \times P_0^{\text{ИА}} G_{\text{ИА}} G_{\text{изл}} \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2 K_{\text{МШУ}}^0 G_6 G_3 G_2 G_1, \quad (11)$$

где G_1 и G_2 - коэффициенты передачи соответственно обесточенных аттенюатора 1 и фазовращателя 2 схемы рис.1; G_3 - коэффициент передачи коммутатора 3.

Если принять $G_{\text{ИА}} G_{\text{изл}} G_6 G_3 G_2 G_1 \approx 1$ ($G_{\text{изл}} \leq 6\text{дБ}$, $G_{\text{ИА}} \approx 2\text{дБ}$), усиление цепочки усилителей $K_{\text{МШУ}}^0 \approx 30\text{дБ}$, $L \approx (2...3)\lambda$ и $P_{\text{вых}}^0 \approx 10\text{мВт} \approx 0,1P_{\text{нас}}$, где $P_{\text{нас}}$ – выходная мощность насыщения МШУ, из (11) получим $P_{\text{ИА}}^0 \approx 10...26\text{мВт}$. Выберем $P_{\text{ИА}}^0 = 10\text{ мВт}$ и при конкретных величинах, входящих в (11), рассчитаем величину $P_{\text{вых}}^0$.

Далее производим первую начальную калибровку. Она заключается в калибровке уровня выбранной мощности $P_{\text{ИА}}^0$ на входе измерительной антенны 3. Для этого выход аттенюатора 4 подсоединяется к измерителю мощности, и ручкой аттенюатора 4 устанавливается ослабление, соответствующее выбранному уровню $P_{\text{ИА}}^0 = 10\text{мВт}$. Предположим, что показание ослабления G_4^{01} аттенюатора 4 соответствует этому уровню.

Вторая начальная калибровка заключается в следующем. К выходу аттенюатора 4 (рис.2) подключается измеритель мощности, и ручкой аттенюатора 4 на его выходе устанавливается расчетный уровень мощности $P_{\text{вых}}^0$. Измеритель мощности убирается, и к выходу аттенюатора 4 подключается вход закрытого аттенюатора 5. Ручкой аттенюатора 5 устанавливается показание ослабления G_5^{01} , обеспечивающее нормальную работу амплифазометрического приемника 7, и фиксируется величина E^{01} , вычисляемая компьютером 8 при установленных ослаблениях аттенюаторов 4 и 5. На этом процесс второй начальной калибровки завершается.

После выполнения описанных калибровок производится тестирование итогового коэффициента усиления $K_{\text{МШУ}}$ ячейки модуля в режиме приема по блок-схеме рис.2. Для этого: а) ручкой аттенюатора 4 устанавливается показание ослабления G_4^{01} ; б) аттенюатор 5 выводится из закрытого состояния, его ручкой устанавливается показание ослабления в районе величины G_5^{01} ; в) определяется отклонение $\Delta K_{\text{МШУ}}$ (дБ) коэффициента усиления $K_{\text{МШУ}}$ цепочки малошумящих усилителей ячейки от заданного в ТЗ значения $K_{\text{МШУ}}^0$ по выражению

$$\Delta K_{\text{МШУ}} (\text{дБ}) = K_{\text{МШУ}} (\text{дБ}) - K_{\text{МШУ}}^0 (\text{дБ}) = G_5 (\text{дБ}) - G_5^{01} (\text{дБ}), \quad (12)$$

где $G_5 (\text{дБ})$ - показание ослабления аттенюатора 5, при котором значение вычисляемой компьютером 8 величины амплитуды равно E^{01} .

Ясно, что результаты вычисления компьютером φ_y или φ_x (в зависимости от ориентации измерительной антенны) при этой процедуре тестирования ячеек определяют разброс фазовых передаточных характеристик ячеек в режиме приема.

В результате предлагаемая методика позволяет просто осуществить проверку работоспособности узлов, входящих в элементарные приемо-передающие ячейки модуля АФАР, и тестирование на соответствие с ТЗ и с паспортными данными следующих параметров входящих узлов:

- дискреты и интервалы ослаблений, вводимых электронно-управляемыми аттенюаторами;
- дискреты и интервалы фазовых сдвигов, вводимых электронно-управляемыми фазовращателями;
- разбросы комплексных передаточных характеристик ячеек как в режиме передачи сигнала, так и в режиме его приема;

- поляризационные характеристики волн, излучаемых элементарными ячейками.

Предметное описание стенда тестирования, анализ погрешностей и экспериментальные результаты тестирования модулей АФАР будут приведены в Сообщении 2 данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / Под ред. **Г.А.Ерохина**. - М.: Радио и связь, 1996.-352 с.
2. **Edwards T.C., Steer M.B.** Foundations of interconnect and microstrip design, Third edition, Hardcover, 2000.
3. **Фрадин А.З., Рыжков Е.В.** Измерения параметров антенно-фидерных устройств.- М.: Связь, 1972.-352с.
4. **Эйрамджян С.Г., Оганесян А.А., Саакян Г.Б.** Разработка и испытание миниатюрных амплифазометров для измерительных систем // Труды 5-й Международной конференции по компьютерным наукам и информационным технологиям (CSIT-2005).- Ереван: Изд. НАН РА, 2005. – С. 624 – 627.
5. **Драбкин А.Л., Зуенко В.Л., Кислов А.Г.** Антенно-фидерные устройства. - М.: Сов.радио, 1974. – 536 с.
6. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Под ред. **Н.М. Цейтлина**. – М.: Радио и связь, 1985. – 368с.

АОЗТ “ЕрНИИСС”. Материал поступил в редакцию 27.09.2006.

**Վ.Հ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Մ.Վ. ՄԱՐԿՈՍՅԱՆ, Ա.Ա. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ,
Ս.Գ. ԷՅՐԱՄՅԱՆ**

**ԱԿՏԻՎ ՓՈՒԼԱՎՈՐՎԱԾ ԱՆՏԵՆԱՑԻՆ ՑԱՆՑԻ ՄՈՂՈՒԼՆԵՐԻ ԹԵՍԹԱՎՈՐՈՒՄԸ
Հաղորդում 1. Թեստավորման եղանակ**

Առաջարկվում է ակտիվ փուլավորված անտենային ցանցի (ԱՓԱՑ) մոդուլների թեստավորման եղանակ: Մոդուլը բաղկացած է չորս տարրական ընդունող-հաղորդող բջիջներից, որոնցից յուրաքանչյուրը պարունակում է էլեկտրոնային դեկավարվող մարիչ և փուլաշրջիչ, հզորության ուժեղարարներ, սակավադմկող ուժեղարարներ և ճառագայթիչ, որոնց պարամետրերը բավականին պարզ թեստավորվում են առաջարկվող եղանակով:

Առանցքային բառեր. ակտիվ փուլավորված անտենային ցանց, ընունող-հաղորդող բջիջ, թեստավորման եղանակ:

**V.H. AVETISSYAN, M.V. MARKOSYAN, A.A. HOVHANNISYAN,
S.G. EYRAMJYAN**

**ACTIVE PHASED ARRAY MODULE TESTING
Report 1. Testing methodology**

The methodology of active phased array module testing is suggested. The module consists of four elementary receiving-transmitting cells, each of which contains an electronically controlled attenuator and phase shifter, power amplifiers, low-noise amplifiers and radiator, parameters of which are tested sufficiently simply by the suggested methodology.

Keywords: active phased array, receiving-transmitting cell, testing methodology.