



LUND UNIVERSITY

An Experience of Elementwise Calibration Methods Without Use of Phase Measurement Apparatus for Multi-Channel PAA Calibration

Bondarik, Alexander; Shitikov, Alexander; Shubov, Anatoly

Published in:
Antennas

2005

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Bondarik, A., Shitikov, A., & Shubov, A. (2005). An Experience of Elementwise Calibration Methods Without Use of Phase Measurement Apparatus for Multi-Channel PAA Calibration. *Antennas*, 92(1).

Total number of authors:
3

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

УДК 621.396.67

Бондарик А.В., Шитиков А.М., Шубов А.Г.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ ПОЭЛЕМЕНТНЫХ МЕТОДОВ КАЛИБРОВКИ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

AN EXPERIENCE OF ELEMENTWISE CALIBRATION METHODS WITHOUT USE OF PHASE MEASUREMENT APPARATUS FOR MULTI-CHANNEL PAA CALIBRATION

Рассмотрены известные поэлементные методы калибровки фазированных антенных решеток (ФАР), без применения фазометрической аппаратуры, и особенности использования указанных методов для калибровки многоканальных (сотни и тысячи каналов) антенных решеток. Предложена процедура калибровки, учитывающая эти особенности, которая заключается в разбиении каналов антенны на группы, калибровке каналов внутри групп, а затем фазировке групп между собой. Предложена методика установки начального фазового распределения, обеспечивающая должный уровень сигнала для калибровки. Описана процедура калибровки ФАР, содержащих 192 и 3600 каналов.

Some known elementwise methods of PAA calibration are considered, without use of phase measurement apparatus. Features of these methods are described for the case of multi-channel phased array antennas (several hundreds or thousands of channels). Calibration algorithm is suggested for this case, it consists of antenna channels grouping, in-group channel calibration and, finally, mutual calibration of groups. A method for initial phase distribution creation is suggested, to ensure proper level of common antenna signal. Calibration procedure for the cases of 192-channel and 3600-channel antennas is described.

Постановка задачи калибровки ФАР. Калибровкой фазированной антенной решетки принято называть процедуру определения характеристик ее каналов, для дальнейшего использования в диаграммоформирующих алгоритмах. Обычно это комплексные передаточные характеристики каналов при различных состояниях входящих в них фазовращателей. Основным интерес представляют "бесконтактные" методы калибровки, когда характеристики отдельных каналов определяются по результатам измерения суммарного поля антенны неподвижным зондом, в ближней или дальней зоне, при установке фазовращателей в различные состояния.

Подобные методы обычно называют коммутационными, или методами переключений. Эти методы различаются по алгоритмам переключения состояний фазовращателей, по способу измерения сигнала, по алгоритмам обработки результатов измерений. Им посвящен ряд работ, например, монография [1], опубликованная в России в 1988 г. В частности, в ней представлены как поэлементный метод, при котором перед каждым отсчетом поочередно изменяется состояние фазовращателя одного из каналов, так и алгоритм с переключением всех фазовращателей перед каждым отсчетом, основанный на применении функций Уолша. По существу, эта монография предвосхитила создание эффективных производительных методов переключений. ([2], [3], предложенных сравнительно недавно. Последние обеспечивают высокую точность определения начальных фаз в каналах ФАР при существенном сокращении времени измерений по сравнению с традиционными методами переключений.

Появление указанных выше высоко производительных методов не уменьшает полезности ранее предложенных поэлементных процедур. Несомненным их достоинством является простота и наглядность, что позволяет определить независимо амплитуду и фазу в любом

канале, выявить и устранить неисправности в отдельных элементах. Это особенно полезно на начальных этапах разработки при испытаниях экспериментальных образцов ФАР.

В настоящей работе рассматривается применение известных поэлементных методов МТЕ и REV калибровки ФАР, основанных на чисто амплитудных измерениях ([4][8]).

Ниже предполагается, что комплексные передаточные характеристики каналов антенны зависят только от состояния фазовращателей каналов и не зависят от состояний фазовращателей соседних каналов. Суммарное поле ФАР представляется линейной суперпозицией полей ее каналов.

Принципы калибровки ФАР с помощью методов МТЕ и REV. Возможные модификации. В первом приближении можно считать, что амплитуда передаточной характеристики канала не зависит от состояния фазовращателя, а фаза линейно растет с увеличением номера состояния. Такой канал может быть полностью охарактеризован амплитудой и начальной фазой, то есть электрической длиной канала, когда фазовращатель установлен в нулевое состояние.

Вычисление параметров по результатам измерений вначале рассмотрим для случая антенны, состоящей из двух каналов. Этот метод условно назван МТЕ ("Measurement of two elements", или измерение двух элементов). Для определения характеристик каналов, состояние фазовращателя опорного канала фиксируется, затем фазовращатель тестируемого канала последовательно устанавливается во все возможные $L = 2^n$ состояния и производится измерение мощности суммарного сигнала.

На комплексной плоскости, сигналы каналов и антенны могут быть схематично представлены с помощью рис.1. При переключении фазовращателя фаза тестируемого канала совершает полный оборот, при этом суммарный сигнал описывает окружность вокруг радиус-вектора опорного сигнала. Мощность суммарного сигнала при этом изменяется. Соотношение фаз опорного и тестируемого сигналов может быть определено по положению максимума и минимума мощности, соотношение амплитуд – через отношение минимальной и максимальной амплитуды суммарного сигнала по следующим формулам:

$$\begin{aligned} 2E_{ref} &= E_{max} + E_{min} & \text{при } E_{ref} > E_{test}, & \text{или} & 2E_{ref} &= E_{max} - E_{min} & \text{при } E_{ref} < E_{test} \\ 2E_{test} &= E_{max} - E_{min} & & & 2E_{test} &= E_{max} + E_{min} & \end{aligned} \quad (1)$$

Функция зависимости измеренной амплитуды суммарного сигнала от фазы в тестируемом канале по своей сути является табличной, поэтому для большей точности ее интерполируют. Например, в [6] положение минимума сигнала определяется методом наименьших квадратов, в [7] используется разложение в ряд Фурье. Пользуясь методом наименьших квадратов, можно получить характеристики модельного фазовращателя, "наилучшим образом" соответствующего результатам измерений мощности.

Пусть $P_l, l = 0..L-1$ - набор мощностей сигнала, полученных в результате измерений. Пусть, далее, канал с искомым идеализированным фазовращателем имеет модуль коэффициента передачи E_{test} , начальную фазу φ_0 и шаг переключения фазы $\Delta_d = \frac{2\pi}{L}$. Модуль коэффициента передачи опорного канала равен E_{ref} . Тогда мощность излучаемого сигнала, согласно теореме косинусов, равна

$$E^2 = E_{test}^2 + E_{ref}^2 + 2E_{test}E_{ref} \cos(\varphi_0 - \Delta_d l) \quad (2)$$

С точки зрения метода наименьших квадратов, необходимо минимизировать величину

$$\sum_{l=0}^{L-1} (E^2 - P_l)^2 = \sum_{l=0}^{L-1} (E_{test}^2 + E_{ref}^2 + 2E_{test}E_{ref} \cos(\varphi_0 - \Delta_d l) - P_l)^2$$

Для удобства, перепишем сумму в виде

$$\sum_{l=0}^{L-1} (E_{test}^2 + E_{ref}^2 + 2E_{test}E_{ref} \cos(\varphi_0) \cos(\Delta_d l) + 2E_{test}E_{ref} \sin(\varphi_0) \sin(\Delta_d l) - P_l)^2$$

или

$$\sum_{l=0}^{L-1} (A + B \cos(\Delta_d l) + C \sin(\Delta_d l) - P_l)^2$$

где

$$A = E_{test}^2 + E_{ref}^2, \quad B = 2E_{test}E_{ref} \cos(\varphi_0), \quad C = 2E_{test}E_{ref} \sin(\varphi_0) \quad (3)$$

Коэффициенты A , B , C должны быть подобраны так, чтобы сумма квадратов была минимальной. Для этого, необходимо решить уравнения

$$\begin{aligned} \sum_{l=0}^{L-1} (A + B \cos(\Delta_d l) + C \sin(\Delta_d l) - P_l) &= 0 \\ \sum_{l=0}^{L-1} (A + B \cos(\Delta_d l) + C \sin(\Delta_d l) - P_l) \cos(\Delta_d l) &= 0 \\ \sum_{l=0}^{L-1} (A + B \cos(\Delta_d l) + C \sin(\Delta_d l) - P_l) \sin(\Delta_d l) &= 0, \end{aligned}$$

полученные дифференцированием суммы квадратов по коэффициентам A , B и C .

Воспользовавшись тем, что для $L = 2^n$, $n > 1$

$$\sum_{l=0}^{L-1} \cos(\Delta_d l) = \sum_{l=0}^{L-1} \sin(\Delta_d l) = 0, \quad \sum_{l=0}^{L-1} \cos(\Delta_d l) \sin(\Delta_d l) = 0, \quad \sum_{l=0}^{L-1} \cos(\Delta_d l)^2 = \sum_{l=0}^{L-1} \sin(\Delta_d l)^2 = \frac{L}{2},$$

получим, что для минимизации должны выполняться соотношения

$$LA = \sum_{l=0}^{L-1} P_l, \quad LB = 2 \sum_{l=0}^{L-1} P_l \cos(\Delta_d l), \quad LC = 2 \sum_{l=0}^{L-1} P_l \sin(\Delta_d l),$$

то есть, коэффициенты A , B и C являются первыми коэффициентами дискретного преобразования Фурье, примененного к набору данных $P_l, l = 0..L-1$. Этот результат вполне закономерен, так как из теоремы косинусов следует, что суммарная мощность антенны при переключении фазового состояния канала должна меняться по синусоиде.

Разность начальных фаз опорного и тестируемого сигналов может быть определена по формуле $\varphi_0 = \arg(B, C)$. Для определения амплитуд каналов можно из (2) получить следующие соотношения для максимальной и минимальной амплитуды:

$$E_{\max}^2 = A + \sqrt{B^2 + C^2}, \quad E_{\min}^2 = A - \sqrt{B^2 + C^2}$$

Последующей подстановкой в (1) можно получить коэффициенты передачи каналов.

Методом МТЕ можно непосредственно пользоваться в случае, когда есть возможность "выключать" каналы антенны, оставляя только пару, как, например, в активной АР. Используя в качестве опорного один и тот же канал антенны, остальные каналы можно откалибровать по нему. При этом следует помнить о неоднозначности, возникающей в (1), для различных соотношений амплитуд опорного и тестируемого каналов.

В случае если каналы отключить не удастся, для калибровки АР используется метод, получивший в литературе название REV ("The rotating-element electric field vector" method, или метод вращения вектора электрического поля элемента) [4, 5]. В этом случае в качестве опорного сигнала выступает суммарный сигнал всех каналов антенны, кроме тестируемого.

В [4, 5] приведены соотношения для расчета амплитуд и фаз каналов по результатам измерений. Эту же процедуру можно выполнить, не прибегая к указанным соотношениям, алгоритмическим путем. С этой целью воспользуемся соотношением (1). В данном методе следует учитывать, что при переходе от канала к каналу амплитуда и фаза опорного сигнала меняется, поэтому полученные результаты необходимо приводить к общему значению. Для

этого можно использовать тот факт, что в исходном положении сумма опорного и тестируемого сигнала каждый раз одинакова и представляет собой суммарный сигнал всей антенны. Алгоритм определения относительных амплитуд и начальных фаз каналов тогда может быть представлен следующим образом:

- 1) установить фазовращатели каналов в исходное положение
- 2) последовательно переключая фазовращатель первого канала в сторону увеличения фазового состояния, устанавливая его во все возможные состояния и производить измерение мощности суммарного сигнала антенны
- 3) повторить пункты 1), 2) для всех каналов антенны
- 4) Используя (1) определить амплитуды и фазы тестируемых каналов E_l , и опорных сигналов \hat{E}_l для каждого канала $l = 0..L-1$
- 5) вычислить комплексные суммы $E_l^\Sigma = E_l + \hat{E}_l$ для каждого канала $l = 0..L-1$
- 6) доворотом фазы и масштабированием амплитуды привести комплексные величины E_l^Σ к одному значению, например, (1,0). Синхронно с E_l^Σ доворачивать и масштабировать E_l, \hat{E}_l
- 7) полученные в результате доворота и масштабирования величины E_l представляют собой относительные амплитуды и начальные фазы каналов антенны

Необходимо отметить, что метод REV работоспособен и в том случае, когда наряду с сигналами каналов антенны присутствует и паразитный сигнал (например, возникающий из-за отражения поля от элементов крепления в отражательной решетке). Управлять фазой этого сигнала невозможно, поэтому его нельзя "прокрутить" относительно суммарного сигнала антенны, для определения его характеристик. Вместо этого, фаза суммарного сигнала может быть "прокручена" относительно паразитного. Для этого, синхронно переключаются все фазовращатели антенны.

Особенности применения метода для многоканальных антенн. При применении метода для калибровки многоканальных фазированных антенных решеток возникают следующие проблемы:

Во-первых, суммарный сигнал антенны должен быть достаточно большим. Для применения формул метода МТЕ (1) необходимо заранее знать, превосходит ли тестируемый сигнал опорный по амплитуде или наоборот. Поскольку при переходе от канала к каналу соотношение амплитуд меняется, необходимо обеспечить достаточно высокий уровень суммарного сигнала, чтобы для всех каналов гарантировалось $E_{ref} < E_{test}$.

Во-вторых, суммарный сигнал антенны должен быть достаточно малым, поскольку с ростом количества каналов (и амплитуды суммарного сигнала) возникает ситуация, когда вариация суммарного сигнала при управлении тестируемым каналом незаметны на фоне шумов измерения. В [7] приведен пример зависимости ошибки в определении фазы, рассчитанный для фазовращателя с восемью состояниями. Ошибка растет с увеличением уровня шума и уменьшается с увеличением вариации сигнала, (то есть, чем меньше суммарный сигнал, тем точнее определяется фаза). Указано, что для успешного определения начальных фаз, суммарный сигнал в начальном состоянии должен соответствовать сигналу примерно (5-10)-канальной антенны.

Таким образом, перед калибровкой антенны методом REV необходимо установить фазовращатели в состояние, обеспечивающее достаточный – не очень высокий и не очень низкий – уровень суммарного сигнала. Для этого иногда можно использовать априорную информацию о начальных фазах каналов, полученную, например, путем калибровки отдельных блоков антенны до того, как они будут собраны в единую конструкцию.

Зачастую, однако, такой информации нет, и для подбора начального состояния необходимо использовать специализированные алгоритмы, как правило, использующие особенности конструкции и системы управления антенны.

Наконец, что особенно важно для многоканальных (несколько тысяч каналов) антенных решеток, калибровка всей решетки поэлементным методом может занять очень много времени – до несколько часов или даже рабочих дней. При этом возможны уходы параметров измерительной аппаратуры, в связи с чем калибровку необходимо проводить по частям. При этом каналы антенны разбиваются на группы (группы, возможно, на подгруппы), производится калибровка каналов между собой в группе, затем групп между собой. Для группировки каналов и взаимной калибровки групп между собой (взаимной фазировки) необходимо использовать специализированные алгоритмы, обычно зависящие от конструкции калибруемой антенны. Как правило, фазировка выполняется также REV или МТЕ методом, при этом группы каналов переключаются синхронно и выступают как отдельные каналы.

Ниже представлены два примера использования методов для калибровки многоканальных антенн.

Опыт калибровки 192-канальной ФАР. Применение методов REV и МТЕ может быть показано на примере пассивной проходной ФАР, состоящей из 192 каналов. ФАР включала в себя 36 модулей, каждый из которых содержал 6 каналов. Сложение принимаемого сигнала вначале происходило в модулях, затем суммировались сигналы модулей. Диаграммоформирующая система обеспечивала формирование в раскрыве спадающего к краям амплитудного распределения, симметричного в обеих плоскостях. В режиме калибровки любой фазовращатель мог быть установлен в любое положение независимо от остальных фазовращателей.

При калибровке использовались приближенные значения начальных фаз модулей, полученные в результате измерения их характеристик до установки в антенну и подключения излучателей. Вначале производилась фазировка каналов в модулях, затем модулей между собой. Для выделения сигнала модуля, производилась расфазировка всех модулей антенны, кроме калибруемого.

На Рис.2 слева показана апертура антенны на первом этапе калибровки. У всех модулей кроме третьего верхние три фазовращателя установлены в состояния, обеспечивающие синфазное сложение сигналов в направлении оси антенны (на рисунке показано белыми кругами), а нижние три – в противофазное им состояние (на рисунке показано серыми кругами). Фазовые состояния были рассчитаны на основе априорной информации. Такая расфазировка обеспечивает, в первом приближении, противофазное сложение сигналов каналов антенны в осевом направлении. Полностью подавить сигнал модулей при этом не удастся, однако метод REV позволяет работать и в условиях наличия паразитного сигнала.

Затем производилась калибровка выбранного модуля методом REV, с определением начальных фаз его каналов. На рис.2 слева показано, что фазовые состояния модуля номер три выбраны с целью увеличения суммарного сигнала каналов этого модуля (показано кругами различного оттенка серого). Для повышения точности, калибровка проводилась для нескольких начальных состояний фазовращателей модуля, с последующим усреднением. Описанным образом проводилась калибровка всех модулей антенны.

На следующем этапе проводилась калибровка модулей между собой с использованием метода МТЕ. Для этого, расфазировались все модули антенны, кроме калибруемого и опорного. В качестве опорного выбирался модуль с достаточно большим суммарным коэффициентом передачи, чтобы его сигнал был заведомо больше сигнала любого тестируемого модуля. Затем на опорном модуле устанавливалось фазовое распределение,

обеспечивающее синфазное сложение его сигналов, то же производилось и для тестируемого (рис.2 справа). Затем производилась фазировка каналов методом МТЕ.

Поскольку на втором этапе установка фазовых распределений производилась с учетом уточненных сведений начальных фазовых длин в модулях, полученных на первом этапе, происходило глубокое подавление сигналов всех модулей, кроме опорного и тестируемого. Это обеспечивало высокую точность при определении взаимных фаз модулей.

Поскольку начальное состояние для фазировки антенны было подобрано на основе априорной информации о начальных фазах каналов антенны, а также с учетом особенностей конструкции антенны, для его получения использовался весьма простой алгоритм. Особенностью этого алгоритма являлось то, что он позволял подавить не просто суммарный сигнал всей антенны, но и сигнал каждого модуля в отдельности, что позволяло "включать" и "выключать" модули и производить их взаимную калибровку методом МТЕ. Сравнительно небольшое количество каналов позволило откалибровать антенну в один проход, без перенастройки аппаратуры.

Важным вопросом при калибровке антенны является ее достигаемая точность. В [6] приведены результаты компьютерного моделирования ФАР с учетом случайных ошибок в каналах антенны, отражающихся на результатах калибровки. При численном моделировании отклонения амплитуд и фаз в различных каналах задавались с помощью псевдо-случайных чисел, вырабатываемых в компьютере. Исходя из этого, находились ошибки при расчете параметров каждого канала и определялось снижение КИП антенны в целом из-за ошибок калибровки. На рис. 4 приведены расчетные диаграммы направленности (ДН), соответствующие идеальным каналам при отсутствии случайных ошибок (кривая 2) и при наличии ошибок (кривая 1). Экспериментальные ДН показаны на рис. 5. Здесь кривая 1 соответствует выставлению начальных фаз в соответствии с априорной информацией на основании измерений параметров каждого канала в закрытом фидерном тракте. Кривая 2 получена при калибровке с помощью комбинированного REV и МТЕ методов. Отличие расчетных и экспериментальных данных обусловлено тем, что уровень боковых лепестков (УБЛ) зависит от конкретной реализации случайных ошибок, между тем как максимальный УБЛ изменяется сравнительно меньше. КИП антенны в результате калибровки соответствует расчетной величине.

Опыт калибровки ФАР, включающей в себя 3600 каналов. В этом разделе применение метода показано на примере пассивной отражательной ФАР [9], состоящей из 3600 каналов. ФАР включает в себя 108 модулей, каждый из которых содержит либо 30, либо 40 каналов, выполненных с использованием волноводно-диэлектрических излучателей. Возбуждение антенны производится оптическим путем, при этом сигнал отражается от контррефлектора и полотна антенны. Форма контррефлектора подобрана так, чтобы обеспечить заданное амплитудное распределение в раскрытии ФАР.

Следует указать, что в первых экспериментальных образцах аналогичных ФАР калибровка осуществлялась зондовым методом, с помощью специальной насадки, которая надвигалась на диэлектрический излучатель. При этом использовался фазометр. Измерение по такой схеме является чрезвычайно трудоемким, поскольку автоматизация процесса измерений возможна только при самом отсчете и записи результатов. Автоматизировать операцию передвижения и установки насадки весьма сложно. Кроме того, такие измерения осуществляются, по существу, в закрытом тракте, без учета взаимного влияния излучателей, которое в данном случае является важным фактором, обеспечивающим формирование секторной ДН элемента решетки.

Эти недостатки устраняются при использовании метода переключений.

В режиме настройки и калибровки ФАР, возможна была установка любого фазовращателя антенны в любое положение независимо от остальных фазовращателей. В связи с

особенностями системы управления, установка фазовращателей антенны возможна была только помодульно, т.е. для установки необходимо было переслать в ФАР состояния фазовращателей целого модуля.

Из-за большого количества каналов, фазировка антенны не могла быть произведена "в один проход". В связи с этим, вначале производилась фазировка каналов внутри модулей. До начала калибровки, фазовые состояния фазовращателей антенны подбирались так, чтобы обеспечить уровень суммарного сигнала равным сигналу примерно десяти каналов. При калибровке антенны априорная информация о начальных фазах каналов не использовалась.

Для формирования начального фазового распределения использовался следующий способ. Вначале фазовое распределение подбиралось так, чтобы максимально подавить сигнал в направлении оси антенны. Затем выбиралась группа из пяти каналов, и их состояния подбирались так, чтобы обеспечить максимальный уровень суммарного сигнала. Подбор производился последовательной установкой каждого фазовращателя в состояние, обеспечивающее максимум сигнала.

В отличие от максимизации сигнала, для его подавления, очевидно, нельзя манипулировать состоянием единственного фазовращателя – изменение суммарного сигнала будет незаметным. Поэтому в алгоритме подавления синхронно изменялись состояния половины фазовращателей антенны, до достижения минимального уровня сигнала. Затем производилось перераспределение каналов по группам, и повторная минимизация. Процесс повторялся до достижения приемлемого уровня сигнала.

Для разбиения каналов на группы использовался набор функций Уолша. Свойство ортогональности функций позволяет успешно делить каналы пополам – при каждом последующем разбиении в каждой группе остается примерно половина каналов, находившихся в ней при предыдущем разбиении. Остальные переходят в нее из другой группы. Вычисление набора функций Уолша для всего набора из 3600 фазовращателей по ряду причин неудобно, поэтому разбиение на группы производилось внутри каждого модуля. На рисунках 5 и 6 показаны варианты разбиения на группы. На левой половине рисунка кружками схематично показаны фазовращатели всей антенны, на правой – трех модулей крупным планом. Фазовращатели, относящиеся к разным группам, выделены цветом.

После определения начального состояния и калибровки каналов внутри модулей, производилась калибровка модулей между собой. В отличие от 192-канальной антенны, здесь не удалось разработать алгоритм "выключения" каждого модуля. В первую очередь это связано с амплитудным распределением в апертуре антенны. Оно является осесимметричным если рассматривать апертуру в целом, но не имеет симметрии в пределах любого отдельно взятого модуля. Это, а также наличие неисправных фазовращателей в ряде модулей делает невозможным разделение каналов модуля на две группы с равным уровнем сигнала. Поэтому, фазировка модулей между собой производилась методом REV.

Из-за большого количества каналов фазировка производилась в несколько приемов, с остановками для подстройки измерительной аппаратуры. Фазировка всей антенны была произведена за один рабочий день и позволила получить хорошие характеристики ФАР (подробное описание полученных результатов см. [9]).

В целом, можно отметить, что, в отличие от алгоритмов калибровки 192-канальной антенны, активно использующих особенности конструкции антенны, алгоритмы для случая 3600-канальной антенны более универсальны и могут применяться для широкого спектра ФАР.

Алгоритмы были разработаны с максимально возможной автоматизацией измерений. Так, при калибровке ФАР из 192 каналов, вмешательство оператора требовалось лишь в самом начале при запуске и при переходе от 1-го этапа определения параметров всех модулей ко 2-му этапу взаимной калибровки модулей. При калибровке 3600-канальной антенны вмешательство оператора требовалось лишь несколько раз – для остановки процесса в связи

с подстройкой измерительной аппаратуры и при переходе от этапа определения параметров канала к этапу взаимной калибровки модулей.

Заключение. Опыт работы с поэлементными методами показывает, что они могут быть успешно применены для калибровки средних и больших фазированных антенных решеток, в первую очередь с целью отработки первых экспериментальных образцов. Предложенные в работе алгоритмы могут быть применены для калибровки широкого спектра типов ФАР. Методы хорошо автоматизируются и обладают свойством масштабируемости – то есть, при переходе к антеннам с большим числом элементов требуется минимальная доработка алгоритмов.

Авторы выражают благодарность Ганину С.А, и Николаеву А.М. за помощь в организации экспериментов,, без которых данная работа была бы невозможной, Денисенко В.В., Макоте В.А. и Шишлову А.В за постоянное внимание к работе и поддержку.

Литература

- [1] Г.Г. Бубнов, С.М. Никулин, Ю.Н. Серяков, С.А. Фурсов. Коммутационный метод измерения характеристик ФАР. Москва, "Радио и связь", 1988
- [2] Ya. Shifrin and U. Liepin "Phaseless method of phased antenna array diagnostics". *Proc. of the Millennium Conference on Antennas and Propagation, Paper 0491*, 2000.
- [3] A. J. Hood, B. Murray, and D. Purdy "Lockheed Martin lightsar phased array antenna". *Ibid.*, Paper 1419, 2000.
- [4] Seiji Mano, Rumiko Yonezawa, Isamu Chiba, and Takashi Katagi. "Beam pointing method in a deployable phased array antenna". *Proceedings of the XXVIII Moscow International Conference on Antenna Theory and Technology, pp.295-298, 22-24 September 1998*.
- [5] Rumiko Yonezawa, Yoshihiko Konishi, Isamu Chiba, and Takashi Katagi. "Beam-Shape Correction in Deployable Phased Arrays". *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL.47, NO.3, MARCH 1999*.
- [6] A. G. Shubov, A. V. Shishlov. "Determination of electrical lengths of active phased array antenna channels. Algorithm and simulation results for a uniform array". *Proceedings of the XXVIII Moscow International Conference on Antenna Theory and Technology, pp.299-302, 22-24 September 1998*.
- [7] A.M. Shitikov, A.V. Bondarik. Multi-Element PAA Calibration with REV Method. Proceedings of the Ivth International Conference on Antenna Theory and Techniques. Sevastopol, Ukraine, 2003.
- [8] A.G. Shubov, S.A. Ganin, A.M. Shitikov, A.V. Shishlov. Limit of Accessible Antenna Array Efficiency Under Their Calibration by Means of Switching Method. Proceedings of Nordic Antenna Symposium, Lund, Sweden, 2000
- [9] В.А. Макота, В.В. Денисенко, Ю.Б. Корчемкин, А.М. Николаев, А.А.Толкачев, А.М.Шитиков, А.В.Шишлов, А.Г.Шубов. Многоэлементная ФАР Ка диапазона. В настоящем сборнике.

Сведения об авторах

Шитиков Александр Михайлович	1970	к.т.н, с.н.с	Область научных интересов– теория и техника антенных решеток	Москва, 117639, Балаклавский проспект, д.4 кор.7 кв. 476. тел. 494-95-65
Шубов Анатолий Григорьевич	1930	к. т. н. ведущий научный сотрудник	Область научных интересов– теория и техника антенных решеток	
Бондарик Александр Викторович	1980	аспирант	Область научных интересов – теория и техника антенных решеток	Москва, 117303 ул. Керченская, д. 1а, корп. 1, к. 606

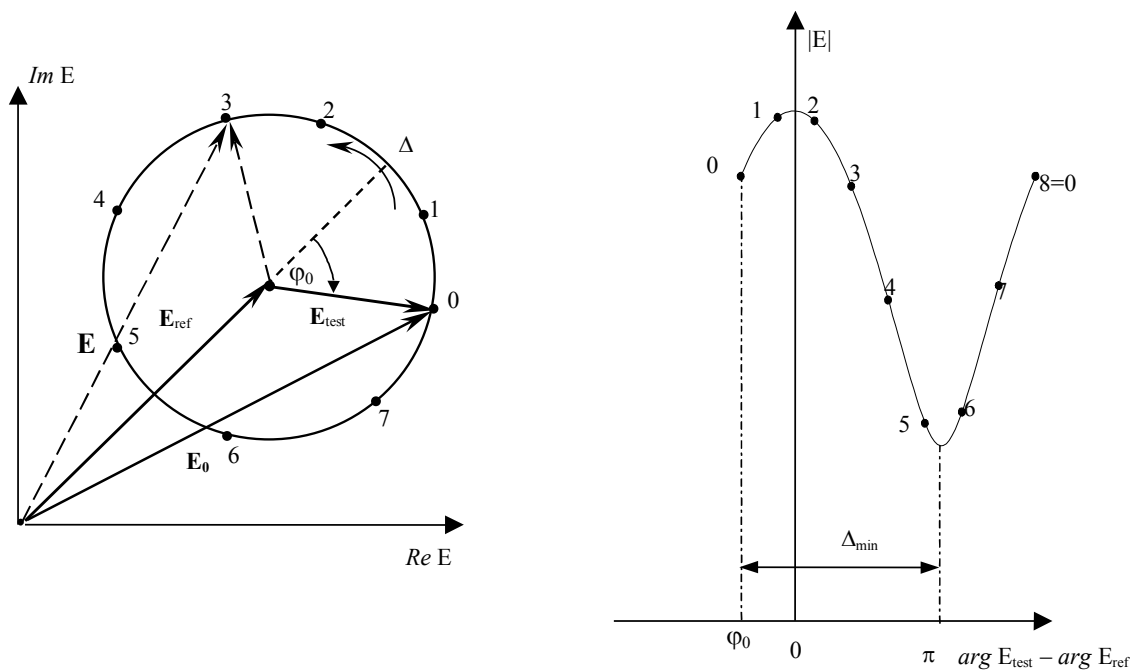


Рис.1. График изменения модуля коэффициента передачи ФАР при калибровке с использованием канального управления

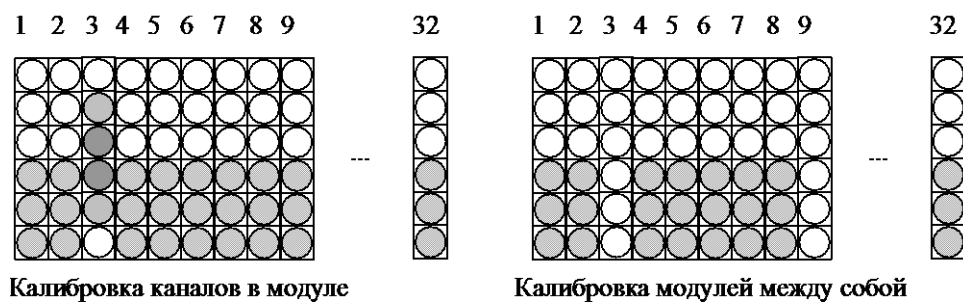


Рис.2. Два этапа калибровки 192-канальной антенны.

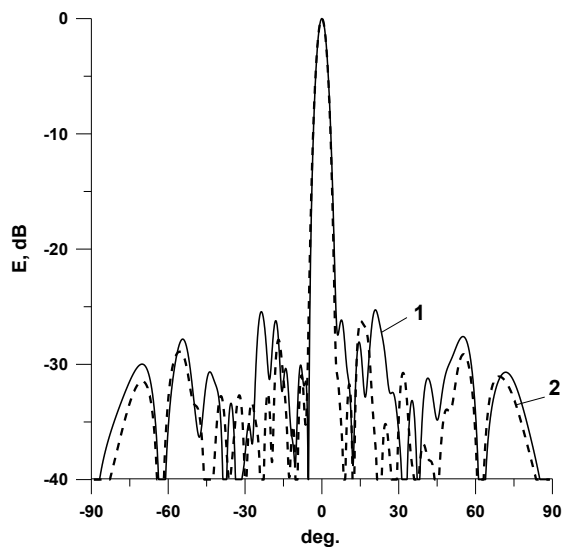


Рис. 3. Расчетные ДН ФАР из 192 каналов

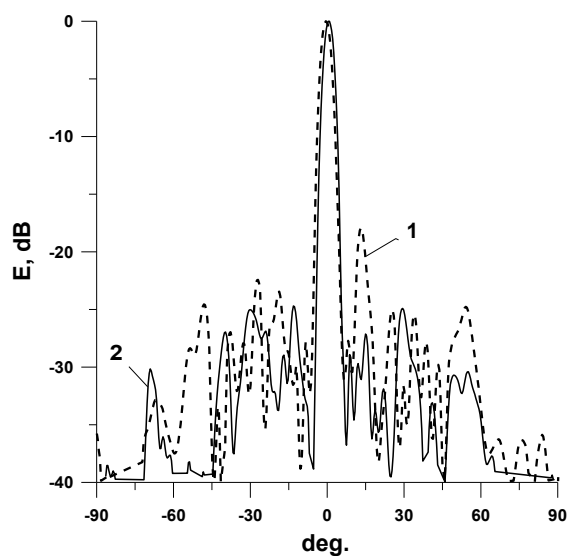


Рис. 4. Экспериментальные ДН ФАР из

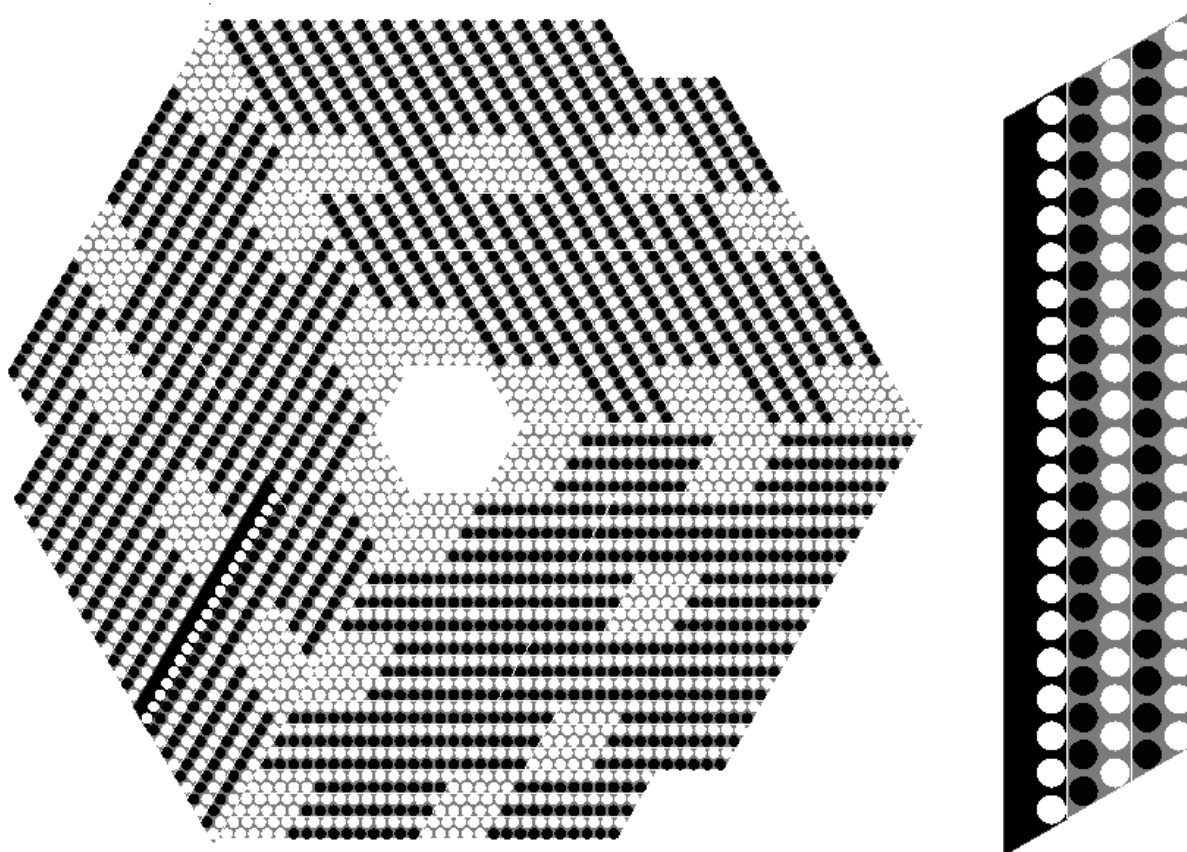


Рис.5. Разбиение каналов на группы – вариант 1.



Рис.6. Разбиение каналов на группы – вариант 2.