

# Применение матричного подхода к описанию антенны для определения ее влияния на точность пеленгации фазовым методом

И.Д. Павлов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО «Центральное конструкторское бюро автоматики»

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет

**Аннотация:** в настоящей работе предложен способ описания антенно-фидерного устройства с помощью волновых матриц. Рассмотрен физический смысл элементов указанных матриц, описаны способы их получения. С помощью предложенного подхода к описанию антенно-фидерного устройства определено их влияние на точность пеленгования фазовым методом.

**Ключевые слова:** антенно-фидерное устройство, волновая матрица, многополюсное устройство, фазовый пеленгатор, ошибки пеленгации

## 1. Введение

Обобщенная структурная схема устройства, реализующего фазовый метод пеленгации, содержит два и более [1] приемных канала, включающих в себя антенно-фидерные устройства (АФУ). В случае отсутствия внешних мешающих факторов [1] ошибки определения направления на источник излучения обуславливаются преобразованием сигнала в приемных каналах пеленгатора. Так как АФУ является частью приемного канала, определение его влияния на сигнал представляет интерес, поскольку учет этого влияния приводит к уменьшению ошибки определения направления на источник излучения.

Цель работы: Разработка подхода к описанию АФУ, позволяющего учесть влияние АФУ на точность определения направления на источник излучения.

## 2. Теория

Если рассматривать АФУ как преобразователь напряженности электрического поля в свободном пространстве в напряжение на разъеме, то, по аналогии с другими сверхвысокочастотными (СВЧ) устройствами, для его описания возможно использование аппарата волновых матриц, но с учетом некоторых особенностей. Рассмотрим их:

- для того, чтобы определить коэффициент передачи необходимо задать две отсчетные плоскости. Большинство антенн располагает только одним разъемом, в котором можно поместить указанную плоскость. Чтобы задать вторую отсчетную плоскость можно использовать следующий формальный способ: выделить в пространстве площадку бесконечно малой площади, перпендикулярную радиус-вектору, направление которого определено в системе координат, связанной с АФУ, а длина удовлетворяет расстоянию дальней зоны [2]. Выбранную площадку можно считать второй отсчетной плоскостью;

- поле произвольной поляризации можно представить как сумму двух ортогональных компонент [2]. Каждой из указанных компонент можно поставить в соответствие пространственную отсчетную плоскость. В общем случае, когда необходимо описать взаимодействие АФУ с полем произвольной поляризации, потребуется одновременно использовать обе отсчетных плоскости. Поэтому АФУ

следует рассматривать как шестиполюсное устройство;

- поскольку выбранная пара отсчетных плоскостей соответствует единственному направлению в пространстве, то для полного описания АФУ потребуется набор таких отсчетных плоскостей и, соответственно, набор волновых матриц.

Ниже приведена структура волновой матрицы АФУ (1):

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_o \\ \dot{E}_{\theta o} \\ \dot{E}_{\varphi o} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_п \\ \dot{E}_{\theta п} \\ \dot{E}_{\varphi п} \end{pmatrix} \quad (1)$$

где:

$\dot{U}_o$  и  $\dot{U}_п$  – отраженная и падающая волны в отсчетной плоскости разъема АФУ;

$\dot{E}_{\theta п}$  и  $\dot{E}_{\theta o}$  – падающая и отраженная волны пространственной отсчетной плоскости для вертикальной поляризации поля;

$\dot{E}_{\varphi п}$  и  $\dot{E}_{\varphi o}$  – падающая и отраженная волны пространственной отсчетной плоскости для горизонтальной поляризации поля;

$S_{11}$  – комплексный коэффициент отражения от разъема антенны. Этот параметр не имеет пространственной зависимости, поэтому для всех матриц АФУ остается неизменным;

$S_{22}$ ,  $S_{33}$  – комплексные коэффициенты отражения пространственных плоскостей для вертикальной и горизонтальной поляризации соответственно. В тех случаях, когда не нужно учитывать взаимное влияние АФУ, их можно принять равными нулю [3].

$S_{12} = S_{21}$ ,  $S_{13} = S_{31}$  – комплексные коэффициенты передачи от разъема антенны к пространственным отсчетным плоскостям для двух ортогональных поляризаций. Приведенные равенства выполняются в силу принципа взаимности.

$S_{23} = 0$ ,  $S_{32} = 0$  – комплексные коэффициенты передачи между пространственными отсчетными плоскостями, определенные для ортогональных поляризаций. Равенство нулю указанных коэффициентов обуславливает отсутствие передачи мощности между поляризационными каналами, что выполняется из-за их ортогональности.

Учитывая определения входящих коэффициентов, волновую матрицу АФУ (2) можно записать следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_o \\ \dot{E}_{\theta o} \\ \dot{E}_{\varphi o} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & 0 \\ S_{31} & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_п \\ \dot{E}_{\theta п} \\ \dot{E}_{\varphi п} \end{pmatrix} \quad (2)$$

После рассмотрения принципа построения и структуры волновой матрицы АФУ, необходимо привести методику получения входящих в нее коэффициентов.

Комплексный коэффициент отражения от разъема может быть определен с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ). Комплексный коэффициент передачи от разъема антенны к пространственной отсчетной плоскости может быть получен путем нескольких косвенных измерений. Поскольку указанные коэффициенты являются комплексными, то для каждого необходимо найти модуль и аргумент. Для этого требуется определить их через параметры, принятые для описания АФУ.

Физический смысл модуля комплексного коэффициента передачи соответствует такому параметру, как коэффициент калибровки [2], который в свою очередь может быть определен через коэффициент усиления АФУ [2].

Аргумент комплексного коэффициента передачи определяет фазовый набег, возникающий при прохождении сигналом области между пространственной отсчетной плоскостью и разъемом АФУ. Для получения значения возникающего

набега необходимо использовать измерительный комплекс с опорным фазовым каналом. Примером такого комплекса может служить измерительный комплекс фирмы «ТРИМ» «ТМСА12D8». Определенный с помощью предложенного измерителя фазовый набег можно считать аргументом комплексного коэффициента передачи. Пространственную зависимость указанного фазового набега называют [4] фазовой диаграммой направленности (ФДН).

Выяснить влияние АФУ на точность пеленгации фазовым методом можно с помощью следующего эксперимента.

Для серии однотипных АФУ сформировать волновые матрицы, соответствующие выбранному направлению в пространстве, после чего, для каждой из матриц найти  $l$  норму [5], определяемую как максимум абсолютных сумм каждого столбца. Несмотря на то, что все матрицы определены для однотипных АФУ, значения записанных в них коэффициентов будут отличаться. Указанные отличия связаны с неидентичностью излучающей структуры и других компонентов АФУ, обусловленной технологическими факторами. Из выше приведенных утверждений следует, что значения  $l$  норм каждой матрицы будут отличаться.

Из рассмотренной серии АФУ необходимо выбрать две пары, характеризующие наименьшей и наибольшей абсолютной разностью  $l$  норм волновых матриц. Выбранные пары АФУ по очереди установить в одни и те же приемные каналы фазометрической базы пеленгатора [1]. С каждой из выбранных пар АФУ провести измерения направления на источник излучения и определить ошибки этих измерений, после чего сравнить полученные результаты.

Разница значений полученных ошибок будет определяться отличиями между парами АФУ, которые устанавливались в приемные каналы фазометрической базы пеленгатора.

### 3. Результаты эксперимента

АФУ, примененное в эксперименте, описано в [6]. Общий вид приведен на рисунке 1.



Рисунок 1. Общий вид АФУ, примененного в эксперименте.

Для проведения эксперимента была использована серия из четырех АФУ. Характеристики, необходимые для формирования волновых матриц всех АФУ из рассматриваемой серии, сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Характеристики АФУ, применяемые для формирования волновой матрицы

Характеристики	АФУ №1	АФУ №2	АФУ №3	АФУ №4
Модуль коэффициента отражения, дБ	-18,8	-31	-29,7	-20,6
Фаза коэффициента отражения, °	12	112	-115	79
Модуль коэффициента калибровки, вертикальная поляризация, дБ	58,7	58,5	58,7	58,9
Значение ФДН, вертикальная поляризация, °	64	90	95	163
Модуль коэффициента калибровки, горизонтальная поляризация, дБ	58,6	58,6	58,8	58,8
Значение ФДН, горизонтальная поляризация, °	141	139	-8	-14

3 Характеристики, сведенные в таблицу 1, получены на частоте (3):

$$f_{\text{изм}} = 1.9f_{\text{min}} \quad (3)$$

где  $f_{\text{изм}}$  – частота, на которой производились измерения;  $f_{\text{min}}$  – нижняя частота рабочего диапазона.

Все значения параметров в таблице 1 (кроме модуля и фазы коэффициента отражения) определены для направления  $\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$  в системе координат, связанной с АФУ.

Модуль и фаза коэффициентов отражения были измерены с помощью ВАЦ. Коэффициенты калибровки для вертикальной и горизонтальной поляризаций облучающего поля получены путем пересчета коэффициентов усиления рассматриваемых АФУ.

Фазовые диаграммы направленности для вертикальной и горизонтальной поляризации получены с помощью измерительного комплекса «ТМСА12D8».

На основе значений характеристик, приведенных в таблице 1, для выбранного направления и частоты были сформированы 4 волновых матрицы. Для каждой из полученных матриц были найдены значения  $l$  норм.

Указанные матрицы и значения их норм сведены в таблицу 2.

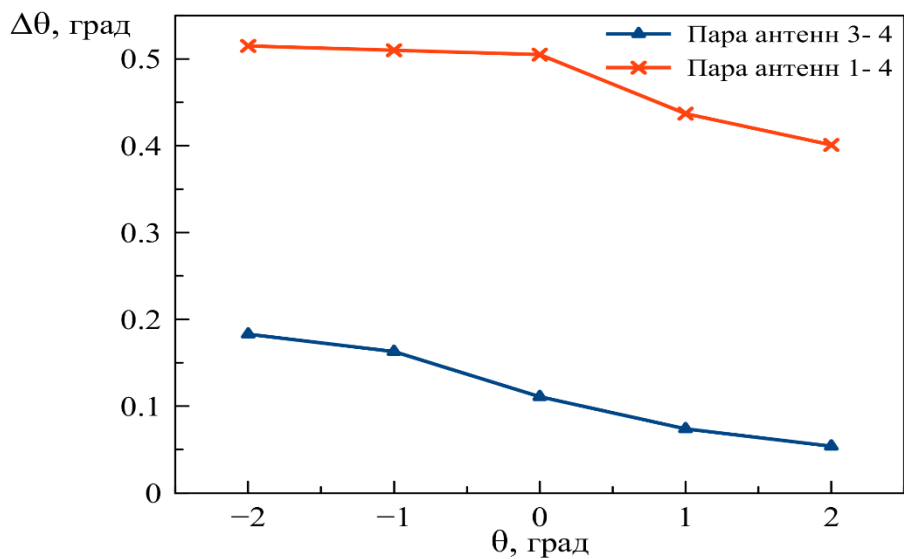
Таблица 2. Волновые матрицы АФУ и их  $l$  нормы

№ АФУ	Волновая матрица направление $\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$ , частота $f_{\text{изм}}$	$l$ норма
1	$\begin{pmatrix} -18,8e^{12i} & 58,7e^{64i} & 58,6e^{141i} \\ 58,7e^{64i} & 0 & 0 \\ 58,6e^{141i} & 0 & 0 \end{pmatrix}$	183,195
2	$\begin{pmatrix} -31e^{112i} & 58,5e^{90i} & 58,6e^{139i} \\ 58,5e^{90i} & 0 & 0 \\ 58,6e^{139i} & 0 & 0 \end{pmatrix}$	181,426
3	$\begin{pmatrix} -29,7e^{-115i} & 58,7e^{95i} & 58,8e^{-8i} \\ 58,7e^{95i} & 0 & 0 \\ 58,8e^{-8i} & 0 & 0 \end{pmatrix}$	169,427
4	$\begin{pmatrix} -20,6e^{79i} & 58,9e^{163i} & 58,8e^{-14i} \\ 58,9e^{163i} & 0 & 0 \\ 58,8e^{-14i} & 0 & 0 \end{pmatrix}$	169,015

Наименьшей абсолютной разностью  $l$  норм обладают волновые матрицы АФУ с номерами 3 и 4, а наибольшей матрицы АФУ с номерами 1 и 4. Выбранные пары антенн по очереди использовались в приемных каналах одной фазометрической базы пеленгатора. Длина фазометрической базы составляет 9,5 длин волн на частоте измерения.

Поскольку указанный размер фазометрической базы превышает длину волны на частоте измерения, полученные отсчеты разности фаз будут укладываться в один период в узком угловом секторе – секторе однозначности [1]. Оценка влияния АФУ на точность пеленгации проводилась только в первом секторе однозначности, который в рассматриваемом случае находится в диапазоне углов  $\theta$  от  $2^\circ$  до минус  $2^\circ$ .

Зависимости ошибок пеленгации от углового положения фазометрической базы для случаев, когда в приемные каналы установлены сначала АФУ 3 и 4, а затем 1 и 4 приведены на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Зависимости ошибки пеленгации от углового положения фазометрической базы.

Зависимости, приведенные на рисунке 3, показывают, что в случае применения в приемных каналах АФУ с номерами 1 и 4 ошибки пеленгации будут больше, чем в случае применения АФУ с номерами 3 и 4.

### 3. Заключение

Предложенный матричный подход к описанию АФУ позволяет определять различия между ними. Зависимости, приведенные на рисунке 2, показывают, что применение в приемных каналах фазового пеленгатора АФУ, различия между которыми минимальны, позволяет уменьшить ошибку пеленгации и увеличить точность. В настоящей работе рассмотрен простейший случай фазового пеленгатора с одной измерительной базой, но предложенный способ сравнения может быть применен и для более сложных многобазовых систем.

Кроме того, предложенный матричный подход к описанию АФУ применим для построения баз данных антенных откликов для корреляционных пеленгаторов или для составления модели каналов распространения в системах связи с пространственным разделением каналов.

#### Список литературы

1. Виноградов А. Д., Востров А.Ю., Дмитриев И.С. Обобщенная структура радиопеленгатора и основные термины, используемые в теории радиопеленгования //Антенны. – 2018. – №5. – С. 5-20.
2. Антохина Ю. А., Крячко А. Ф., Ковалев А. С. [и др.]. Синтез характеристик антенн по измерениям в ближней зоне: моногр. – СПб: ГУАН, 2016. – 309 с.
3. Виноградов А. Д., Михин А. Ю., Никитенко Е. П., Пошивалова Г. В., Шипилова Т. И. Методические ошибки скалярных радиопеленгаторов с антенными решетками из ненаправленных антенн //Антенны. – 2020. – №3. – С. 6-31.
4. Калинин Ю. Н. Измерение координат фазового центра антенны //Антенны. – 2014. – №4. – С. 54-62.
5. Пупков К. А., Егупов Ю. Л., Лукашенко Ю. Л. [и др.]. Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 664 с.
6. Павлов И. Д. Электродинамическое моделирование и расчет широкополосной малогабаритной спиральной антенны миллиметрового диапазона //Омский научный вестник. – 2017. – №5. – С. 152-158.