

# Взаимное влияние элементов и ошибки пеленгации в антенной решетке

М. И. Сугак

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

sugakmi@yandex.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрены ошибки пеленгации, обусловленные эффектами взаимного влияния в двухэлементной антенной решетке, состоящей из тонких, идеально проводящих вибраторов, нагруженных на сосредоточенные комплексные сопротивления. Анализ выполнен на основе системы связанных интегральных уравнений относительно токовых распределений, которая решается в однододовом приближении.

**Ключевые слова:** решетка из симметричных вибраторных антенн; ошибки пеленгации; система связанных интегральных уравнений

## I. ВВЕДЕНИЕ

В ряде публикаций, в частности, в [1], [2] отмечено, что в антенных системах, предназначенных для

фазовой пеленгации, могут наблюдаться существенные ошибки, обусловленные взаимным электродинамическим влиянием элементов. Данная работа представляет собой попытку количественно оценить этот эффект в антенной решетке, состоящей из двух симметричных вибраторных антенн.

Электродинамическая постановка задачи следующая: на систему из двух параллельных симметричных вибраторных антенн (СВА) под произвольным азимутальным углом  $\alpha_0$  в горизонтальной плоскости ( $\theta = \pi/2$ ) падает плоская волна (ПВ) с вектором напряженности электрического поля, параллельным вертикальной оси (рис. 1). Требуется найти токовые распределения в СВА и определить закономерности поведения ошибок при фазовой пеленгации.

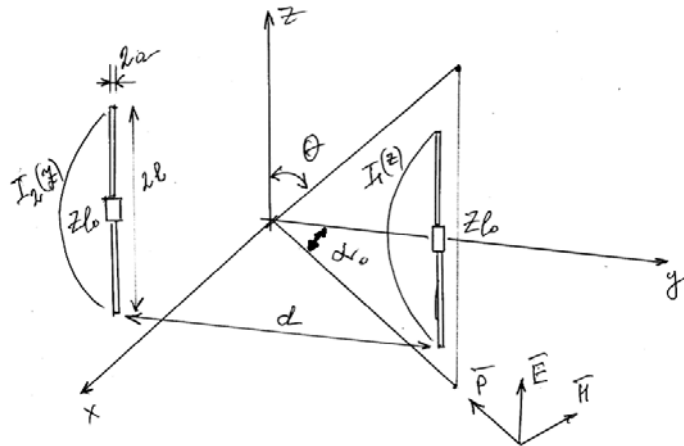


Рис. 1. Геометрия задачи. Расположение приемных антенн в двухэлементной решетке

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Система интегральных уравнений (СИУ) типа Поплингтона относительно неизвестных токов, как реализация граничных

условий для касательной компоненты электрического поля на поверхности каждой СВА запишется в виде (1):

$$\begin{cases} E_z^{cm1}(z) - I_1(z=0)z_{l0}\delta(z) = \int_{-l}^l I_1(z')K_{11}(z, z')dz' + \int_{-l}^l I_2(z')K_{12}(z, z')dz' \\ E_z^{cm2}(z) - I_2(z=0)z_{l0}\delta(z) = \int_{-l}^l I_1(z')K_{21}(z, z')dz' + \int_{-l}^l I_2(z')K_{22}(z, z')dz' \end{cases} \quad (1)$$

В СИУ (1) введены следующие обозначения:  $E_z^{cm1,2}(z)$  –  $z$ -составляющая стороннего электрического поля на 1-м и 2-м вибраторах,  $z_{lo}$  – комплексное сопротивление нагрузок,  $\delta(z)$  – дельта-функция,  $K_{11}(z, z') = K_{22}(z, z')$  – ядра СИУ, соответствующие собственному полю первой и второй СВА,  $K_{12}(z, z') = K_{21}(z, z')$  – ядра, обусловленные взаимным влиянием СВА друг на друга. Вид этих функций для тонких СВА хорошо известен [3], [4] и здесь не приводится.

Из решения СИУ (1) в одномодовом приближении с помощью процедуры Галеркина следует система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (2):

$$\begin{cases} E_{01}h - I_{01}z_{lo} = I_{01}z_{11} + I_{02}z_{12} \\ E_{02}h - I_{02}z_{lo} = I_{01}z_{21} + I_{02}z_{22} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь:  $I_{01}, I_{02}$  – амплитуды токов в центре каждого вибратора,  $z_{11}, z_{12}$  – собственные и взаимные импедансы в одномодовом приближении,  $h$  – действующая высота антенн. Учитывая связь между левыми частями системы (1), обусловленную электрической разностью хода между элементами АР, СЛАУ (2) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{cases} U_1 = I_{01}(z_{11} + z_{lo}) + I_{02}z_{12} \\ U_2 = U_1 \exp(-ikd \cos(\alpha_0)) = I_{01}z_{12} + I_{02}(z_{11} + z_{lo}) \end{cases} \quad (3)$$

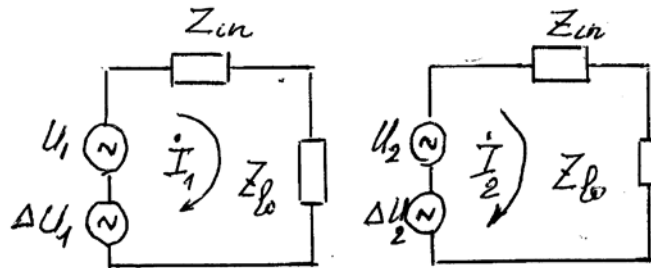


Рис. 2. Эквивалентная схема взаимодействующих приемных антенн в составе АР

Из приведенной схемы следует, что взаимная связь в приемных СВА сказывается двояко:

Во-первых, изменяется комплексная амплитуда эквивалентного источника ЭДС на величину  $\Delta U$ . На схемах эта добавка нарисована как отдельный самостоятельный источник с амплитудой:

$$\Delta U_{1,2} = -U_{2,1} \frac{z_{12}}{z_{11} + z_{lo}}$$

Во-вторых, изменяется внутреннее сопротивление каждой цепи, оно становится равным собственному сопротивлению уединенной одиночной антенны и добавки, обусловленной взаимной связью между антеннами:

$$z_{in} = z_{11} - \frac{z_{12}^2}{z_{11} + z_{lo}}$$

Здесь  $kd$  – электрическое расстояние между СВА,  $\alpha_0$  – заданный угол падения ПВ (рис. 1).

Главный и вспомогательные определители системы (3) равны:

$$\begin{aligned} \Delta &= (z_{11} + z_{lo})^2 - z_{12}^2 \\ \Delta_1 &= U_1(z_{11} + z_{lo}) - U_2 z_{12} \\ \Delta_2 &= U_2(z_{11} + z_{lo}) - U_1 z_{12} \end{aligned}$$

Решение системы (3) для комплексных амплитуд токов можно записать по правилу Крамера через найденные определители таким образом:

$$\begin{aligned} I_{01} &= \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{U_1 - U_2 \frac{z_{12}}{z_{11} + z_{lo}}}{z_{lo} + z_{in}} = U_1 \frac{1 - \exp(-ikd \cos(\alpha_0)) \frac{z_{12}}{z_{11} + z_{lo}}}{z_{lo} + z_{in}} \\ I_{02} &= \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{U_2 - U_1 \frac{z_{12}}{z_{11} + z_{lo}}}{z_{lo} + z_{in}} = U_1 \frac{\exp(-ikd \cos(\alpha_0)) - \frac{z_{12}}{z_{11} + z_{lo}}}{z_{lo} + z_{in}} \end{aligned} \quad (4)$$

За величину:  $z_{in} = z_{11} - \frac{z_{12}^2}{z_{11} + z_{lo}}$  в (4) обозначено

входное сопротивление первой (или второй) антенны в режиме передачи с учетом влияния соседней антенны. Совокупность формул (4) для токов в центре каждой СВА позволяет сформулировать эквивалентную схему АР с учетом эффектов взаимного влияния (рис. 2).

Оба этих фактора оказывают влияние на амплитуду и фазу тока, протекающего через нагрузки в антеннах. Отсюда следует, что взаимная связь может оказывать существенное влияние на токи и, следовательно, породить ошибку при пеленгации сигнала.

Заметим, что при стремлении взаимной связи между СВА к нулю, например, в силу увеличения расстояния между антеннами: ( $d \rightarrow \infty$ ,  $z_{12} \rightarrow 0$ ), эквивалентная схема взаимодействующих приемных антенн (рис. 2) перетекает в две независимые (без взаимного влияния) классические схемы, которые можно найти в учебниках.

Из решения СЛАУ (4) для комплексных токов можно установить связь между истинным углом прихода плоской волны  $\alpha_0$  и его измеренным значением  $\alpha_{mes}$ . Для этого запишем отношение токов в нагрузках обеих приемных антенн из (4) с учетом взаимодействия элементов:

$$\frac{I_{01}}{I_{02}} = \frac{U_1(z_{11} + z_{1o}) - U_2 z_{12}}{U_2(z_{11} + z_{1o}) - U_1 z_{12}} = \frac{(z_{11} + z_{1o}) - \exp(-ikd \cos(\alpha_0)) z_{12}}{\exp(-ikd \cos(\alpha_0))(z_{11} + z_{1o}) - z_{12}} \quad (5)$$

Наконец, из (5) при фазовом методе пеленгации окончательная оценка измеренного угла прихода ПВ  $\alpha_{mes}$  и его связь с истинным углом  $\alpha_0$  определится следующим соотношением:

$$\alpha_{mes} = \arccos \left( -\frac{1}{kd} \arg \left( \frac{(z_{11} + z_{1o}) \exp(-ikd \cos(\alpha_0)) - z_{12}}{z_{11} + z_{1o} - \exp(-ikd \cos(\alpha_0)) z_{12}} \right) \right) \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что при  $z_{12} \rightarrow 0$  (т.е. при уменьшении взаимной связи до нуля), имеем равенство:  $\alpha_{mes} = \alpha_0$ , т.е. в этом случае погрешность измерения угла прихода ПВ стремится к нулю. Другой интересный частный случай соответствует азимутальному углу падения ПВ  $\alpha_0 = 0$ . Из формулы (6) в этом случае также следует точное выполнение равенства

$\alpha_{mes} = \alpha_0$ , но при любом  $\alpha_{mes}$  уровне связи между элементами. Это физически понятно, т.к. в этом случае разность хода лучей от источника на оба элемента равна нулю, несмотря на взаимное влияние. Во всех остальных случаях значения  $\alpha_{mes}$  и  $\alpha_0$  не совпадают. Результаты расчета по формуле (6) приведены на рис. 3.

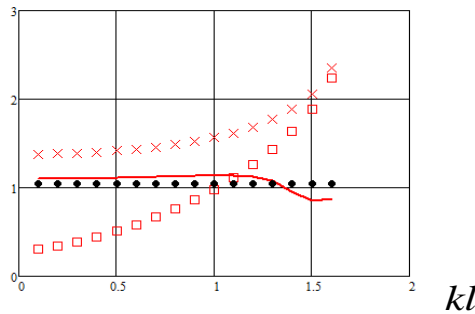


Рис. 3. К оценке ошибки измерения угла прихода ПВ с учетом взаимного влияния. Зависимость измеренного азимутального угла от электрической длины элементов при разном расстоянии между СВА в АР. Сопротивление нагрузок  $z_{1o} = 50 \Omega$

Рис. 3. показывает соотношение истинного угла прихода ПВ (в данном случае:  $\alpha_0 = \pi/3$ , черные кружочки) и результат его измерения для разных расстояний между элементами, с учетом эффекта взаимного влияния. При относительно малых междуэлементных расстояниях:  $kd = kl/2$ ,  $kd = kl$  (квадратики и крестики, соответственно) наблюдается значительная погрешность пеленгации в широком интервале частот. В частности, как видно из рис. 3, при расстоянии между элементами равном длине плеча антенны ( $kd = kl$ ), ошибка в определении угла прихода ПВ в полосе частот составляет от 35 до 100 процентов. При увеличении расстояния между элементами до  $kd = 2kl$  и ослабления связи между элементами (сплошная кривая на рис. 3), наблюдается заметное улучшение точности.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Помимо констатации ошибок пеленгации, обусловленных эффектами взаимовлияния элементов в АР, большой интерес представляет возможность их компенсации. Из СЛАУ (3) легко получается соотношение, позволяющее по измеренным комплексным токам в элементах, с учетом внутренних связей, т.е. при известных элементах матрицы импедансов, сформировать выражение, позволяющее

восстановить истинный (скорректированный) угол прихода ПВ:

$$\alpha_{corr} = \arccos \left( -\frac{1}{kd} \arg \left( \frac{I_1 z_{12} + I_2 (z_{11} + z_{1o})}{I_1 (z_{11} + z_{1o}) + I_2 z_{12}} \right) \right) \quad (7)$$

Вычисления по формуле (7) показывают, что во всей полосе частот условие:  $\alpha_{corr} = \alpha_0$  выполняется с высокой точностью.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает признательность Ю.Г. Антонову за полезные критические замечания при подготовке данного материала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Балландович С.В., Костиков Г.А., Любина Л.М., Сугак М.И. Анализ характеристик кольцевой пеленгаторной антенной решетки // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2018;(6):20-29.
- [2] S.V. Ballandovich, G.A. Kostikov, L.M. Liubina, M.I. Sugak, V.N. Ushakov, Antenna Factor of the Circular Antenna Array // Proceedings of European Microwave Conference in Central Europe, EuMCE 2019.
- [3] Марков Г.Т., Сазонов Д.М.. Антенны: Учебник для вузов. Изд. 2е, М.: «Энергия», 1975 г.
- [4] John D. Kraus. Antennas. Second Edition. 1997.