

Семенихина Диана Викторовна

Технологический институт Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: airpu@tsure.ru.

347900, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1.

Тел.: 88634371733.

Маркина Юлия Ивановна

E-mail: jmarkina@gmail.com.

347900, г. Таганрог, Мариупольское шоссе, 27/2.

Тел.: 889281565244.

Semenikhina Diana Viktorovna

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: airpu@tsure.ru.

1, Engels, Taganrog, 347900, Russia.

Phone: 88634371733.

Markina Yulia Ivanovna

E-mail: jmarkina@gmail.com.

27/2, Mariupol'skoe road, Taganrog, 347900, Russia.

Phone: 889281565244.

УДК 621.396.677

В.Н. Колесников

**УСЛОВИЯ РЕАЛИЗУЕМОСТИ В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА АНТЕНН
С КОМПЕНСАЦИЕЙ ПОМЕХ***

Для задачи синтеза антенной решетки с компенсацией помех определяются условия выполнимости требований к диаграмме направленности основной антенны. Условия реализуемости основаны на сопоставлении максимальных производных диаграмм направленности основной и компенсационной антенн. Проверка сформулированных условий осуществляется на примере решения задачи синтеза линейной антенной решетки изотропных точечных излучателей с учетом характеристик направленности компенсационной антенны из двух элементов.

Антенна; антенная решетка; диаграмма направленности; задача синтеза; изотропный излучатель; условия реализуемости.

V.N. Kolesnikov

**REALIZED CONDITIONS IN THE SYNTHESIS PROBLEMS
OF THE ANTENNAS WITH COMPENSATION FOR INTERFERENCE**

For the synthesis problem of antenna array with interference compensation determined by the condition of feasibility requirements for the radiation pattern of the main antenna.

Terms of feasibility based on a comparison of the maximum derivatives of the directional patterns of primary and compensatory antennas. Checking the conditions set forth is carried on the example of solving the problem of synthesis of linear antenna array of isotropic point radiators with the characteristics of directional antennas the compensation of two elements.

Antenna; antenna array; radiation pattern; synthesis problem; isotropic radiators; conditions of realization.

* Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ в рамках программы государственной поддержки молодых российских ученых (грант № МД-1145.2009.8).

Для задачи синтеза антенной решетки с компенсацией помех определяются условия выполнимости требований к диаграмме направленности основной антенны. Условия реализуемости основаны на сопоставлении максимальных производных диаграмм направленности основной и компенсационной антенн. Проверка сформулированных условий осуществляется на примере решения задачи синтеза линейной антенной решетки изотропных точечных излучателей с учетом характеристик направленности компенсационной антенны из двух элементов.

Введение. Классический метод компенсации помех [1, 2] основан на применении двух антенн: основной и компенсационной. Основная антенна является остронаправленной и принимает сигнал и помеху. Компенсационная антенна должна принимать только помеху. При этом в идеале компенсационная антенна должна иметь «нуль» диаграммы направленности (ДН) в направлении на сигнал, а в области боковых лепестков ее ДН должна совпадать с ДН основной антенны [1, 2]. На практике выполнение этих требований невозможно, так как в качестве компенсационной антенны обычно используют относительно слабонаправленную ДН. Однако задача о приближении ДН двух антенн в области боковых лепестков может иметь место и рассматривается в работе [3].

В работе [3], для двухканальной антенной системы автокомпенсатора помех, состоящей из основной антенной решетки (АР) и слабонаправленной компенсационной антенны, была решена задача аппроксимационного синтеза основной антенной решетки изотропных излучателей. При этом заданная диаграмма направленности основной АР в области боковых лепестков формировалась с учетом диаграммы направленности компенсационной антенны. Использование методов синтеза АР позволило обеспечить приближение синтезированной ДН основного канала к ДН антенны компенсационного канала в области боковых лепестков. Однако в результате исследований было выявлено, что на качество последующей компенсации помех в этом случае оказывает влияние размещение излучателей антенны компенсационного канала, координаты которых должны выбираться в пределах раскрытия основной АР.

В связи с этим возникает необходимость определения соответствия размеров раскрытия компенсационной и основной антенны, при выборе которых будет обеспечено наилучшее решение задачи приближения диаграмм направленности антенн основного и компенсационного каналов в области боковых лепестков.

Цель статьи состоит в том, чтобы установить связь между размерами двух линейных антенн, которые используются для решения задачи компенсации помех.

1. Постановка задачи. Пусть антенная система состоит из двух антенн: остронаправленной АР и слабонаправленной антенны компенсационного канала, параметры которой являются заданными. Компенсационная антенна характеризуется линейными размерами L и ДН, описываемой функцией $F_k(u)$, где $u = 0,5kL \sin \theta$. При этом будем считать, что данная антенна обеспечивает формирование «нуля» ДН в направлении прихода сигнала. Требуется найти комплексные весовые коэффициенты, с которыми суммируются сигналы элементов основной АР, обеспечивающие формирование ДН приемной АР, близкой в среднеквадратическом смысле к ДН компенсационной антенны в области боковых лепестков.

Качество решения данной задачи зависит от взаимосвязи линейных размеров компенсационной антенны L и основной АР L_0 . Поэтому сначала рассмотрим потенциальные возможности основной и компенсационной антенн по формированию физически реализуемых ДН, наивысшее значение производных, в которых в заданной области углов связано с линейными размерами L и L_0 .

2. Условия реализуемости требований задачи синтеза. Рассмотрим основную линейную антенну компенсатора помех, ДН которой описывается функцией $F_0(u)$, где $u = 0,5kL_0 \sin \theta$.

Функция $F_0(u)$ удовлетворяет условиям интегрируемости в квадрате, является целой функцией конечной степени, т.е. может быть представлена в виде полинома конечной степени. Степень полинома определяет порядок старшей производной функции $F_0(u)$, который обозначим K_0 . Степень полинома определяет также максимально достижимую скорость изменения функции.

Очевидно, что порядок дифференцирования функции $F_0(u)$ в определенном секторе углов изменяется, т.е. в области боковых лепестков порядок дифференцирования функции $F_0(u)$ $K \leq K_0$. Необходимо отметить, что в области главного луча происходит наиболее существенное изменение ДН от минимума функции, соответствующего первому боковому лепестку к главному максимуму.

ДН компенсационной антенны $F_k(u)$ в отличие от ДН основной антенны не содержит подобных изменений. В области главного луча имеет место плавный переход ДН компенсационной антенны от уровня бокового лепестка к нулю в направлении главного максимума ДН основной АР. Поэтому для решения задачи о приближении двух ДН $F_0(u)$ и $F_k(u)$ необходимо выбрать минимальные размеры компенсационной антенны таким образом, чтобы ее порядок дифференцирования был равен порядку дифференцирования основной ДН в области боковых лепестков.

Поскольку порядок дифференцирования функции определяет максимальную скорость ее изменения, чтобы обеспечить достижение сформулированной цели, необходимо выявить соотношение между максимальными значениями производной функции $F_0(u)$ во всей области углов и в области боковых лепестков и установить их связь с размерами антенн.

С учетом [4], решение сформулированной задачи может быть получено наиболее просто для идеальной линейной антенны, ДН которой описывается выражением

$$F_0(u) = u^{-1} \sin u. \quad (1)$$

Первая производная функции (1) имеет вид:

$$v_0(u) = u^{-2}(u \cos u - \sin u). \quad (2)$$

Для определения точек, в которых производная v_0 имеет экстремумы, найдем производную функции $v_0(u)$:

$$\begin{aligned} a_0(u) &= u^{-4} \left[u^2 (\cos u - u \sin u + \cos u) - 2u(u \cos u - \sin u) \right] = \\ &= u^{-3} (2 - u^2) \sin u. \end{aligned} \quad (3)$$

Отсюда следует, что вторая производная ДН идеальной линейной антенны обращается в нуль при выполнении одного из двух условий:

$$u = \pm \pi n \quad (n = 1, 2, \dots, \infty); \quad (4)$$

$$u = \pm\sqrt{2}. \quad (5)$$

Точки, соответствующие первому условию, представляют собой, как известно, нули ДН идеальной линейной антенны, а точки второго условия принадлежат области главного луча.

Подставив значения (4) при различных n в функцию (2), получим, что в области боковых лепестков наибольшее (наименьшее) значение производной соответствует первому нулю ДН:

$$|v_0(\pm\pi)| = \pi^{-1}. \quad (6)$$

В области главного луча наибольшее (наименьшее) значение производной ДН идеальной линейной антенны равно

$$|v_0(\pm\sqrt{2})| = 0,5(\sqrt{2}\cos\sqrt{2} - \sin\sqrt{2}) = 0,3836141. \quad (7)$$

Отсюда следует, что максимальная производная функции, описывающей ДН идеальной линейной антенны в области главного луча, больше максимальной производной этой же функции в области боковых лепестков в 1,2051593 раза.

Теперь установим соответствие между линейными размерами основной и компенсационной антенн при условии близости их характеристик направленности в области боковых лепестков. Для этого сформулируем следующее утверждение.

Теорема. Пусть имеется основная антенна с линейными размерами L_0 , которая обеспечивает при равномерном возбуждении в области боковых лепестков максимальное значение производной π^{-1} . Тогда существует линейная компенсационная антенна, имеющая размеры L , которая в этой же точке обеспечивает такое же значение производной, как и основная антенна, если выполняется соотношение:

$$L \geq 0,5425123L_0. \quad (8)$$

Доказательство.

Производная функции $F_0(u)$ по параметру L_0 будет равна

$$\frac{d}{dL_0} F_0(u) = v_0(u)\pi \cos \theta. \quad (9)$$

Максимальное значение производной (9) в области боковых лепестков достигается при условии, что $-\pi = \pi L \cos \theta$, т.е. в направлении первого нуля должно выполняться равенство $\cos \theta = -L_0^{-1}$.

Отсюда следует, что максимальное значение производной ДН основной АР в области боковых лепестков равно

$$\pi^{-1}\pi \cos \theta = -L_0^{-1}. \quad (10)$$

Продифференцируем ДН компенсационной антенны по параметру L . Очевидно, что результат будет совпадать с выражением (9):

$$\frac{d}{dL} F_k(u) = v_0(u) \pi \cos \theta. \quad (11)$$

Наибольшее значение производной ДН основной антенны во всей области углов, равное значению (7), соответствует направлению $u = -\sqrt{2}$, откуда получим

$$\cos \theta = -\sqrt{2}(\pi L)^{-1}. \quad (12)$$

Приравняв производные (9) и (11) с учетом соотношений (7), (10) и (12), получим равенство $L \approx 0,5425123L_0$, которое выполняется при условии, что компенсационная антенна возбуждается, как и основная антенна равномерно. Если компенсационная антенна возбуждается неравномерно, то максимальное значение производной ее ДН будет ниже, чем при равномерном возбуждении и размеры компенсационной антенны следует увеличивать. Отсюда следует справедливость неравенства (8). Теорема доказана.

3. Метод решения задачи. Решение сформулированной задачи в соответствии с работой [3] может быть сведено к нахождению комплексных амплитуд возбуждения излучателей АР A_m , при которых обеспечивается минимальная величина среднеквадратического отклонения (СКО) синтезированной и заданной ДН основной АР на основе решения системы уравнений:

$$\sum_{m=1}^N A_m S_{mn} = \eta_n, \quad (13)$$

где

$$S_{mn} = \int_{-1}^1 f_m f_n^* du; \quad \eta_n = \int_{-1}^1 F_0 f_n^* du; \quad (14)$$

$$F_0(u) = \begin{cases} \sum_{m=1}^M B_m f_m(u), & u \in \Omega_0; \\ F_k(u), & u \notin \Omega_0, \end{cases} \quad (15)$$

B_m – амплитудное распределение, обеспечивающее формирование главного луча ДН в заданной области углов Ω_0 , ограниченной первыми экстремумами ДН в точках u_1 и u_2 , M – число элементов основной АР; $f_m(u)$ – ДН m -го излучателя основной АР символ «*» обозначает операцию сопряжения.

В работе [3] все выражения, описывающие интегральные коэффициенты (14) получены аналитически применительно к АР изотропных точечных излучателей.

4. Численные исследования. В качестве численного примера рассмотрим решение задачи синтеза основной антенны, представляющей собой эквидистантную 16-элементную АР изотропных точечных излучателей с координатами x_m

($m = 1, 2, \dots, M$), в которой элементы размещены с шагом $0,5\lambda$. Пусть антенна компенсационного канала состоит из двух излучателей, аналогичных излучателям основной АР, но размещенных вдоль линии, параллельной оси Ox с координатами $x_{\tilde{n}1}$ и $x_{\tilde{n}2}$ соответственно.

При определении заданной ДН амплитудное распределение, обеспечивающее формирование главного луча, определим с помощью выражения [5]:

$$B_m = 0,316 + (1 - 0,316) \cos \left\{ 4\pi \left[x_m \left((M - 1)\lambda \right)^{-1} \right] \right\}, \quad (16)$$

где λ – длина волны.

При этом значения первых экстремумов ДН основной АР соответствуют направлениям $u_1 = -0,167$ и $u_2 = 0,167$.

На рис. 1 приведены заданная (кривая 1) и синтезированная (кривая 2) ДН антенны основного канала и ДН антенны компенсационного канала (кривая 3).

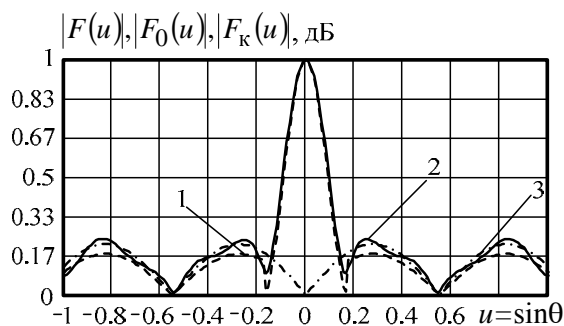


Рис. 1

Координаты излучателей компенсационной антенны в приведенном примере равны $x_{c1} = -1,26$ и $x_{c2} = 0,56$, т.е. размеры компенсационной антенны существенно меньше, чем устанавливает теорема для выбранных размеров основной АР.

На рис. 2 представлены амплитуды и фазы возбуждения излучателей, найденные для синтезированной АР, верхние и нижние поля соответственно.

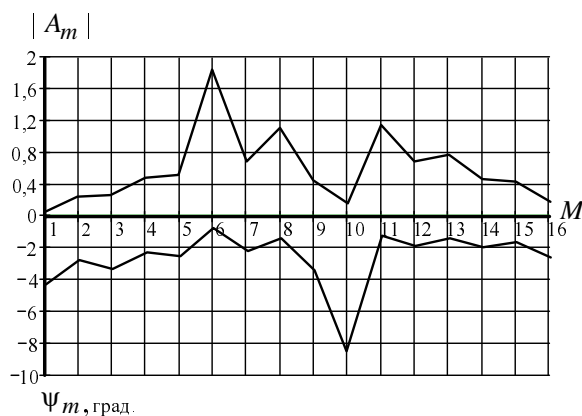


Рис. 2

Полученные результаты демонстрируют сильно неравномерное распределение амплитуд и фаз возбуждения (весовых коэффициентов) основной АР. Коэффициент использования поверхности (КИП) основной АР равен 0,659. Однако в этом случае соотношение между эффективной длиной основной АР и размером компенсационной антенны не удовлетворяет условиям теоремы. Следует отметить, что ДН основной (см. рис. 1 кривая 2) и компенсационной антенн (см. рис. 1 кривая 3) достаточно близки в области боковых лепестков и обеспечивают совпадение максимумов и минимумов ДН за исключением первого нуля ДН основной антенны. В результате соотношение между длинами антенн (8) применительно к полученному решению может быть модифицировано (правая часть уменьшается вдвое с учетом уменьшения максимальной производной ДН компенсационной антенны, соответствующей второму «нулю» ДН). При этом выбранные размеры компенсационной антенны и эффективная длина синтезированной основной АР удовлетворяют условиям теоремы.

При изменении координат излучателей компенсационной антенны можно увеличить КИП основной АР до величины 0,789. На рис. 3 приведены амплитуды и фазы возбуждения излучателей, найденные для синтезированной АР при координатах излучателей компенсационной антенны, равных $x_{c1} = -0,055$ и $x_{c2} = 4,755$.

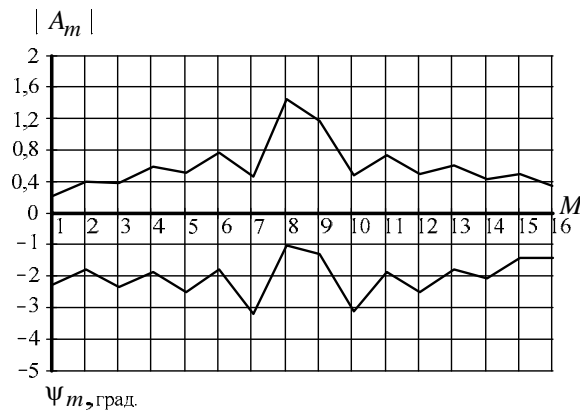


Рис. 3

Применительно к данному примеру размеры компенсационной антенны удовлетворяют соотношению (8) теоремы. При этом формируемая ДН основной АР обеспечивает совпадение положений «нулей» и первых максимумов компенсационной ДН в области боковых лепестков (рис. 4)

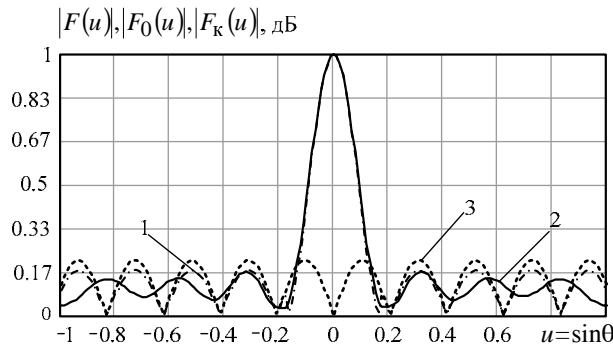


Рис. 4

Обозначения на рис. 4 совпадают с введенными ранее на рис. 1.

Анализ представленных результатов показывает, что решение задачи синтеза обеспечивает хорошее приближение ДН основной антенны к ДН компенсационной антенны в области боковых лепестков. Величина СКО существенно изменяется в зависимости от выбора размеров компенсационной антенны и требований к главному лучу ДН основной АР (СКО изменяется от 0,061 для результатов на рис. 1 до 0,119 – рис. 4). Полученные численные результаты хорошо согласуются с теоретическими соотношениями, устанавливаемыми доказанной теоремой и дополняют утверждение теоремы о том, что при неравномерном возбуждении основной АР соотношение (8) связывает эффективные размеры основной и компенсационной антенны.

Заключение. Таким образом, размеры компенсационной антенны должны составлять более половины от линейных размеров основной антенны. При этом максимальные размеры компенсационной антенны не должны превышать размеры основной антенны, поскольку при этом максимальные значения производных ДН компенсационной антенны между ближайшими экстремумами будут превышать соответствующие значения производных основной ДН в области боковых лепестков. Доказанная теорема позволяет установить взаимосвязь между линейными размерами основной и компенсационной антенн и обеспечить приближение диаграмм направленности основной и компенсационной антенн в области боковых лепестков. Это является необходимым условием для реализации известных методов компенсации помех [1, 2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Максимов М.В.* Защита от радиопомех / Под редакцией Максимова М.В. // – М.: Сов. радио, 1976. – 496 с.
2. *Ерохин Г.А.* /Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. – 2-е изд., испр. // – М.: Горячая линия – Телеком. 2004. – 491 с.
3. *Колесников В.Н., Мищенко С.Е., Шацкий В.В.* Аппроксимационный синтез автокомпенсатора помех // Общие вопросы радиоэлектроники. – 2008. – №1. – С. 21-26.
4. *Кочержевский Г.Н.* Антенно-фидерные устройства / Учебник для вузов. – 3-е изд., доп и перераб. // – М.: Радио и связь, 1981. – 280 с.
5. *Воскресенский Д.И.* Антенны и устройства СВЧ / Проектирование фазированных антенных решеток. – 2-е изд., доп. и перераб. // – М.: Радио и связь. 1994. – 592 с.

Колесников Виталий Николаевич

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ростовский Военный институт ракетных войск им. Главного маршала артиллерии Неделина М.И.
E-mail: kvitonX@yandex.ru.
344038 г. Ростов-на-Дону, пр. М. Нагибина, 24/50.
Тел.: 88632918996.

Kolesnikov Vitaliy Nikolayevich

State Educational Institution of higher vocational Education of Nedelin Strategic Missile Troops Institute.
E-mail: kvitonX@yandex.ru.
24/50, M. Nagibin Avenue, Rostov-on-Don, 344038; Russia.
Phone 88632918996.