

УДК 621.391.8

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-123-128

Особенность использования планарных антенных решеток с центральной симметрией в схеме компенсатора помех

П.С. Грибов, М.А. Грибова, А.Ю. Шатилов

Рассмотрен вопрос эффективности функционирования компенсатора помех с антенной решеткой (АР) специального вида. Известно, что характеристики элементов решетки и их расположение непосредственно влияют на эффективность работы адаптивной системы. Показано, что использование планарных центрально-симметричных АР в схеме компенсатора помех сопровождается существенным недостатком функционирования адаптивной системы в целом, который заключается в том, что для подобных типов АР существуют частные случаи направлений прихода помех, т.е. помеховой обстановки, в которых компенсатор не способен подавить действующие помехи. При этом помехи статистически независимы, действуют с различных направлений и их количество на единицу меньше числа антенных элементов решетки. Это обстоятельство вызвано тем, что для рассматриваемых частных случаев помеховой обстановки ранг подпространства источников внешних помех оказывается меньше количества действующих помех, поэтому сформировать нули диаграммы направленности (ДН) АР в направлении всех помех не удастся.

Проанализирована задача поиска таких помеховых обстановок, для которых наблюдается указанный недостаток. На примере планарной четырехэлементной АР выполнен расчет особых направлений действия помех, для которых эффективность работы компенсатора мала. Полученные теоретические результаты подтверждены имитационным моделированием работы компенсатора. Модель устройства подавления помех составлена таким образом, что в нее не включены дестабилизирующие факторы, присутствующие в реальной аппаратуре. Это позволяет оценить влияние единственного фактора — особой помеховой обстановки. Результаты имитационного моделирования позволяют оценить эффективность функционирования компенсатора в неблагоприятной помеховой обстановке. Для рассматриваемого случая коэффициент подавления снижен до 2,7 дБ, а при отношении помеха/собственный шум на входе компенсатора равен 60 дБ, в результате чего действующие помехи проходят на выход компенсатора практически неподдавленными. Функционирование компенсатора в благоприятной и неблагоприятной помеховых обстановках наглядно проиллюстрированы ДН АР. Для борьбы с указанным недостатком рекомендуется изменить геометрию АР, использовать избыточное количество АЭ и иные алгоритмы помехозащиты приемной системы.

Ключевые слова: симметричная антенная решетка, компенсатор помех, подпространство источников помех, коэффициент подавления, диаграмма направленности.

Для цитирования: Грибов П.С., Грибова М.А., Шатилов А.Ю. Особенность использования планарных антенных решеток с центральной симметрией в схеме компенсатора помех // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 123—128. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-123-128.

Specific Features Pertinent to the Use of Planar Antenna Arrays with Central Symmetry in Interference Cancellers

P.S. Gribov, M.A. Gribova, A.Yu. Shatilov

Matters concerned with analyzing the performance of an interference canceler equipped with a specially configured antenna array (AA) are discussed. As is known, the performance of an adaptive system depends directly on the characteristics and arrangement of antenna array elements. It is shown that the use of planar centrally symmetric AAs in the interference canceler scheme entails an essential drawback pertinent to operation of the adaptive system as a whole. Namely, there are some cases of interference arrival directions (jamming environment) in which the canceler fails to suppress the active interference. With such environment, the jams are statistically independent, act from different directions, and their number is by one fewer than the number of AA elements. This is due to the fact that for the considered jamming environment cases the rank of the jammer subspace is less than the number of acting jammers. As a result, an attempt to set up the array pattern zeroes in the directions of all jams is not met with success.

The problem of searching jamming environments for which the above-mentioned drawback takes place is analyzed. The special jam action directions for which the interference canceler shows poor performance are calculated taking a four-element planar AA as an example. The obtained theoretical results are confirmed by simulating the interference canceler operation. The constructed interference canceler model does not contain the destabilizing factors available in real hardware, a circumstance that opens the possibility to estimate the effect of jamming environment as the only influencing factor. The simulation results make it possible to estimate the canceler performance in unfavorable jamming environment. For the considered case, the suppression ratio has been reduced up to 2.7 dB with the interference-to-noise ratio equal to 60 dB at the canceler input, as a result of which the acting jams pass to the canceler output almost without having been suppressed at all. The interference canceler performance both in favorable and unfavorable environments is clearly shown by an antenna pattern. To overcome the considered drawback, it is recommended to alter the AA geometry and use a redundant number of antenna elements and other receiving system anti-jam algorithms.

Key words: symmetrical antenna array, interference canceler, jamming source subspace, suppression ratio, antenna pattern.

For citation: Gribov P.S., Gribova M.A., Shatilov A.Yu. Specific Features Pertinent to the Use of Planar Antenna Arrays with Central Symmetry in Interference Cancellers. MPEI Vestnik. 2018;2:123—128. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-123-128.

Введение

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие систем радионавигации, радиолокации и радиосвязи различного назначения. Одним из перспективных направлений является повышение помехоустойчивости приемной аппаратуры. Эффективным методом помехозащиты служит пространственная обработка сигналов, при которой используются антенная решетка (АР) и диаграммообразующая схема для управления диаграммой направленности (ДН) решетки [1, 2].

На сегодняшний день известны различные схемы построения и алгоритмы работы устройств подавления помех с АР. В фундаментальных работах [3 — 5] изложены основные подходы к решению этой задачи. Однако, наибольшее распространение получила схема классического компенсатора помех [6], в которой присутствуют опорный и компенсационные каналы. Схема проста в реализации и до сих пор не теряет своей актуальности. Известно, что характеристики элементов решетки и их расположение непосредственно влияют на эффективность работы адаптивной системы с решеткой [4]. Во многих современных изделиях используются планарные АР с симметричным расположением антенных элементов [7 — 10]. Авторами статьи выявлен существенный недостаток использования таких решеток в схеме компенсатора помех, который заключается в том, что существуют частные случаи направлений прихода помех на АР компенсатора, т. е. помеховых обстановок (ПО), в которых компенсатор не способен подавить действующие помехи. При этом помехи независимы, действуют с различных направлений и их количество на единицу меньше числа антенных элементов решетки.

Определим такие направления прихода помех на антенную решетку компенсатора, при которых компенсатор не способен подавить действующие помехи.

Постановка задачи

Рассмотрено функционирование классического компенсатора помех (рис. 1). Один из антенных элементов используется в качестве опорного, остальные — компенсационные; в опорном канале отсутствует весовая обработка, для компенсационных каналов вектор весовых коэффициентов (ВВК) определяется как решение уравнения Винера–Хопфа [5].

Из теории адаптивных АР известно [3], что число независимо управляемых нулей ДН, соответствующее числу степеней свободы антенной решетки, на единицу меньше, чем количество элементов решетки. Таким образом, компенсатор помех, подключенный к четырехэлементной АР, способен формировать 3 независимых нуля.

Существуют частные случаи помеховых обстановок, для которых при действии $N - 1$ независимых помех на N -элементную АР компенсатора не происходит

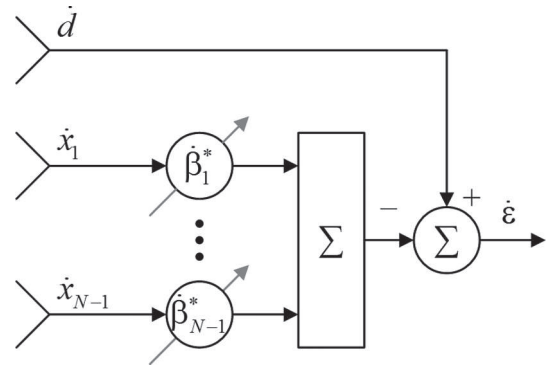


Рис. 1. Классический компенсатор помех:

\dot{d} — сигнал опорного канала; $\dot{\varepsilon}$ — сигнал ошибки (выходной сигнал компенсатора); \dot{x}_i , $i = 1, N - 1$ — сигналы компенсационных каналов; β_i , $i = 1, N - 1$ — весовые коэффициенты; N — количество элементов АР

подавления помех. В качестве АР в этих случаях используется планарная центрально-симметричная решетка. Проанализирована задача поиска таких помеховых обстановок, для которых наблюдается указанный недостаток.

Поиск особых помеховых обстановок

Представлен четырехэлементный компенсатор помех ($N = 4$). Антенная решетка компенсатора — плоская, с квадратной геометрией, обладает центральной симметрией (рис. 2). Вектор весовых коэффициентов компенсатора $\vec{\beta}$ определяется как

$$\vec{\beta} = \mathbf{R}_{xx}^{-1} \dot{\mathbf{r}}_{xd}, \quad (1)$$

где $\mathbf{R}_{xx} = M[\dot{\mathbf{x}}\dot{\mathbf{x}}^H]$ — корреляционная матрица компенсационных каналов; $\dot{\mathbf{r}}_{xd} = M[\dot{\mathbf{x}}\dot{d}^*]$ — вектор взаимной корреляции опорного и компенсационных каналов; $\dot{\mathbf{x}} = [\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3]^T$ — сигналы компенсационных каналов.

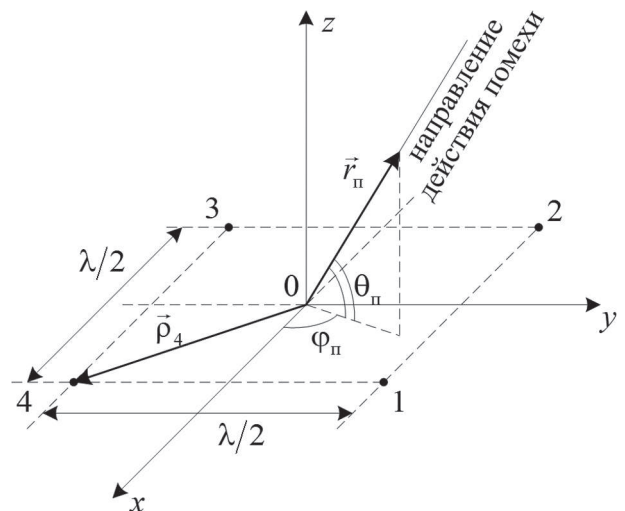


Рис. 2. Геометрия антенной решетки

Пусть на систему действуют три случайные независимые помехи ($M = 3$), приходящие с различных направлений. Математическая модель принимаемых антенной решеткой сигналов в k -й момент времени записывается в векторной форме

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_k \\ \dot{\mathbf{y}}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{h}}_1(\boldsymbol{\alpha}_n) \\ \dot{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\alpha}_n) \end{bmatrix} \dot{\mathbf{S}}_{nk} + \dot{\mathbf{n}}_k, \quad (2)$$

где $\dot{\mathbf{S}}_{nk} = [\dot{S}_{n1,k}, \dot{S}_{n2,k}, \dot{S}_{n3,k}]^T$ — вектор комплексных амплитуд помеховых сигналов; $\dot{\mathbf{n}}_k$ — N -мерный вектор собственных шумов приемным каналам; матрица $\mathbf{M} = [\dot{\mathbf{h}}_1(\boldsymbol{\alpha}_n) \dot{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\alpha}_n)]^T$ состоит из N -мерных вектор-столбцов, описывающих фазовые набегии отдельных источников помех по апертуре АР; матрица $\boldsymbol{\alpha}_n$ задает направления прихода помех. Элементы матрицы \mathbf{M} — фазовые множители, определяются как

$$\dot{h}_{n,m} = \exp\{-j\boldsymbol{\rho}_n \mathbf{r}_m^T(\theta_m, \varphi_m)\}, \quad n = \overline{1, N}, \quad m = \overline{1, M},$$

где $\boldsymbol{\rho}_n, \mathbf{r}_m(\theta_m, \varphi_m)$ — единичные радиус-векторы, описывающие положение n -го АЭ и направление прихода m -й помехи в сферической системе координат (СК) (рис. 2). Вектор $\mathbf{r}_m(\theta_m, \varphi_m)$ определяется

$$\mathbf{r}_m(\theta_m, \varphi_m) = [\cos(\theta_m) \cos(\varphi_m) \cos(\theta_m) \sin(\varphi_m) \sin(\theta_m)]^T$$

Действующие помехи и собственные шумы приемника описываются корреляционными матрицами (КМ) $\dot{\mathbf{R}}_{nn} = M[\dot{\mathbf{S}}_{nk} \dot{\mathbf{S}}_{nk}^H]$ и $\dot{\mathbf{R}}_{mm} = M[\dot{\mathbf{n}}_k \dot{\mathbf{n}}_k^H]$, где $M[\cdot]$ — оператор математического ожидания; символ верхнего регистра \mathbf{H} означает операцию эрмитова сопряжения (транспонирования и сопряжения).

Полагая шумы $\dot{\mathbf{n}}$ независимыми гауссовскими процессами с постоянной спектральной плотностью мощности, КМ сигналов компенсационных каналов принимает вид

$$\dot{\mathbf{R}}_{xx} = M[\dot{\mathbf{x}}_k \dot{\mathbf{x}}_k^H] = \dot{\mathbf{H}} \dot{\mathbf{R}}_{nn} \dot{\mathbf{H}}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I},$$

где σ_n^2 — мощность собственных шумов приемника.

Известно, что в случае воздействия некоррелированных помех ранг матрицы $\dot{\mathbf{R}}_{nn}$ равен их числу. В [11, 12] показано, что ранг КМ $\dot{\mathbf{R}}_{nn}$ меньше числа действующих помех в тех случаях, когда на АР действуют когерентные (коррелированные) помехи, возникающие, вследствие многолучевого распространения. В этих случаях ранг подпространства внешних источников меньше количества действующих помех, в результате чего не удастся сформировать нули ДН АР в направлении всех помех.

Помимо обозначенных частных случаев существует еще одна группа, связанная с взаимной геометрией АР и действующих помех. Если помехи независимы ($\dot{\mathbf{R}}_{nn} = \sigma_n^2 \mathbf{I}$), то ранг подпространства источников внеш-

них помех определяется рангом произведения $\dot{\mathbf{H}} \dot{\mathbf{H}}^H$. Как и в предыдущем случае, если ранг подпространства внешних помех меньше их количества, то сформировать нули ДН АР в направлении помех не удастся. Ранг произведения $\dot{\mathbf{H}} \dot{\mathbf{H}}^H$, в свою очередь, не превышает ранга сомножителей, $\dot{\mathbf{H}}$. Если ранг матрицы меньше ее размерности, то определитель матрицы равен нулю. Таким образом, приравняв определитель матрицы $\dot{\mathbf{H}}$ к нулю, найдем ту особую взаимную геометрию АР и помех, при которой не происходит формирования нулей ДН в направлении всех помех.

Особенностью планарной АР с симметричной геометрией является то, что фазовые набегии на противоположных по диагонали элементах равны по модулю, но противоположны по знаку (при выборе начала координат в центре симметрии АР, рис. 2). Поэтому, для принятой геометрии АР $\dot{h}_{1,m} = \dot{h}_{3,m}^*$ и $\dot{h}_{2,m} = \dot{h}_{4,m}^*$. Матрицу $\dot{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\alpha}_n)$ в этом случае можно представить в удобной для дальнейшего анализа форме

$$\dot{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \dot{a}_1 & \dot{b}_1 & \dot{c}_1 \\ \dot{a}_2 & \dot{b}_2 & \dot{c}_2 \\ \dot{a}_1^* & \dot{b}_1^* & \dot{c}_1^* \end{bmatrix}.$$

Определитель матрицы $\dot{\mathbf{H}}$

$$\det(\dot{\mathbf{H}}) = \dot{a}_2 (\dot{c}_1 \dot{b}_1^* - \dot{c}_1^* \dot{b}_1) + \dot{b}_2 (\dot{a}_1 \dot{c}_1^* - \dot{a}_1^* \dot{c}_1) + \dot{c}_2 (\dot{b}_1 \dot{a}_1^* - \dot{b}_1^* \dot{a}_1) = 0.$$

Полагая $\dot{a}_2, \dot{b}_2, \dot{c}_2 \neq 0$, найдем решение $\dot{a}_1 = \dot{b}_1 = \dot{c}_1$, при этом ранг матрицы $\dot{\mathbf{H}}$ равен 2.

Полученные результаты говорят о том, что если в результате действия трех независимых помех фазовые множители $\dot{h}_{n,m}$ на одном из компенсационных элементов, расположенных по диагонали относительно друг друга (№ 2 или № 4), оказываются равными, то ранг подпространства помех оказывается меньше числа действующих помех.

Определим такие направления помех $\mathbf{r}_m(\theta_m, \varphi_m)$, для которых фазовые множители на 2 или 4 АЭ одинаковы. Пусть $\dot{h}_{2,m} = \exp\{-j\boldsymbol{\rho}_2 \mathbf{r}_m^T(\theta_m, \varphi_m)\} = \text{const}$, $m = \overline{1, 3}$. Условие выполняется, если для всех m показатели экспоненты равны $\boldsymbol{\rho}_2 \mathbf{r}_1^T(\theta_1, \varphi_1) = \boldsymbol{\rho}_2 \mathbf{r}_2^T(\theta_2, \varphi_2) = \boldsymbol{\rho}_2 \mathbf{r}_3^T(\theta_3, \varphi_3)$. Используя свойство скалярного произведения $\boldsymbol{\rho}_2 \mathbf{r}_m^T(\theta_m, \varphi_m) = |\boldsymbol{\rho}_2| |\mathbf{r}_m(\theta_m, \varphi_m)| \cos(\phi)$, где ϕ — угол между векторами, определим, что все действующие помехи, направления которых образуют угол ϕ с вектором АЭ $\boldsymbol{\rho}_2$, наводят на элементе $\boldsymbol{\rho}_2$ одинаковые фазовые набегии. Геометрически совокупность таких направлений представляет собой конус, в вершине которого расположен антенный элемент (рис. 3).

Раскрывая векторы $\boldsymbol{\rho}_2$ и \mathbf{r}_m в соответствии с принятой геометрией АР, найдем решение для направлений действия помех в сферической СК.

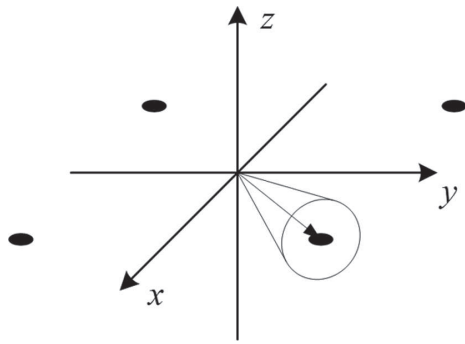


Рис. 3. Конус, указывающий направления прихода помех

$$\cos(\theta_n) \sin(\varphi_n - \pi/4) = \cos(\phi). \quad (3)$$

Решение соответствует кривой, образованной пересечением поверхности и плоскости (рис. 4).

Имитационное моделирование работы компенсатора в особых помеховых обстановках

Методика моделирования

Оценка эффективности компенсатора в условиях особой ПО выполняется по следующей методике. Направления действия помех, полученные по (3), фиксируются и не меняются в процессе моделирования. Антенная решетка вращается вокруг своей оси (OZ , рис. 2) с шагом $0,5^\circ$, делая полный оборот на 360° . Для каждого углового положения АР измеряется коэффициент подавления. Полученные данные используются для построения зависимости коэффициента подавления от угла вращения АР.

Коэффициент подавления помех определяется выражением

$$K_n = P_{\text{вх}} / P_{\text{вых}},$$

где $P_{\text{вх}}$, $P_{\text{вых}}$ — мощность сигнала на входе и выходе компенсатора;

Измерение коэффициента подавления в имитационной модели выполняется посредством измерения

мощностей сигнала опорного канала ($P_{\text{вх}} = P_d$) и сигнала ошибки ($P_{\text{вых}} = P_e$, рис. 1).

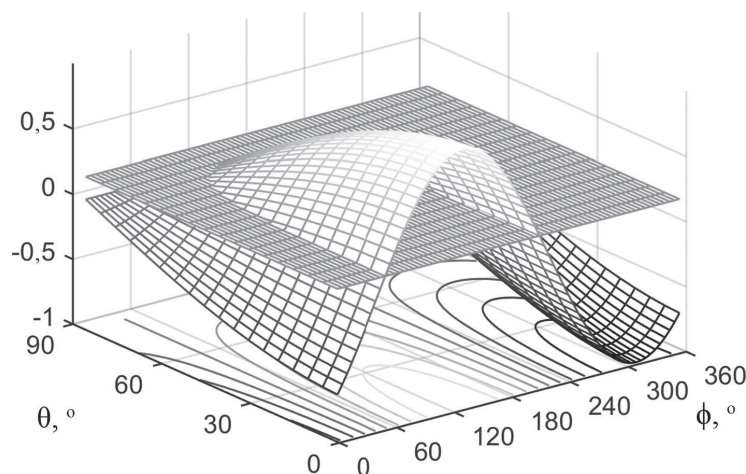
Описание модели

Модель устройства подавления помех не включает дестабилизирующие факторы, присутствующие в реальной аппаратуре. Такой подход позволяет оценить влияние единственного фактора — особой помеховой обстановки. Основные параметры модели и условия моделирования следующие:

- используется АР с квадратной геометрией с изотропными амплитудными и фазовыми ДН элементов;
- входные сигналы формируются в комплексной форме в соответствии с выражением (2), в качестве помех используется полосовой БГШ с заданной мощностью, количество действующих помех $M = 3$, направления прихода помех определяются как решения (3) для $\phi = 80^\circ$ и приведены в таблице, отношение мощности суммарная помеха-шум $J/N = 60$ дБ;
- фильтрация и квантование сигналов в приемных каналах отсутствует;
- компенсатор помех функционирует на нулевой частоте, ВВК определяется по (1), для оценки вектора и матрицы корреляций используется максимально-правдоподобная оценка [13] с параметром накопления $L = 1000$ отсчетов; в качестве опорного сигнала используется сигнал первого канала, соответствующий первому антенному элементу (рис. 2), остальные каналы — компенсационные;
- время моделирования для каждого углового положения АР составляет 30000 отсчетов.

Угловые координаты помеховых сигналов

Угол, °	Номер помехи		
	1	2	3
Место	32,49	78,12	58,86
Азимут	56,88	102,51	205,38

Рис. 4. Графическое решение (3) для $\phi = 80^\circ$

Результаты моделирования

На диаграмме рис. 5 построена зависимость коэффициента подавления от угла вращения АР в полярной СК. Зависимость содержит два глубоких провала, отстоящих на 180° , связанных с попаданием АР в особые положения. Значение коэффициента подавления в провалах снижается до 2,7 дБ, помимо этого наблюдается область углов азимута вблизи провалов (около 30°), для которой коэффициент подавления снижен относительно максимального значения на 10 дБ. На рис. 6 показана ДН компенсатора в декартовой СК при действии помех с направлений (таблица), точками на рис. 6 обозначены направления помех. Из рис. 6 следует, что компенсатор формирует два нуля ДН, которые по направлениям не совпадают с помехами. В этом случае помехи проходят на выход компенсатора практически неподдавленными. Высокий уровень подавления помех достигается только в тех случаях, когда компенсатор формирует глубокие провалы ДН в направлении действия помех. Для сравнения на рис. 7 построена ДН компенсатора в благоприятной помеховой обстановке,

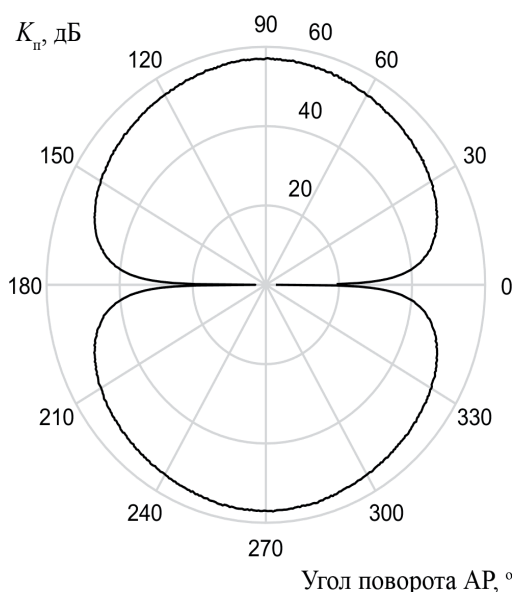


Рис. 5. Зависимость коэффициента подавления от угла вращения АР

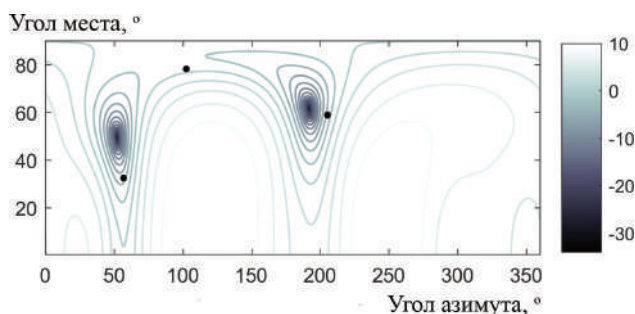


Рис. 6. Диаграмма направленности АР при действии помех с особых направлений

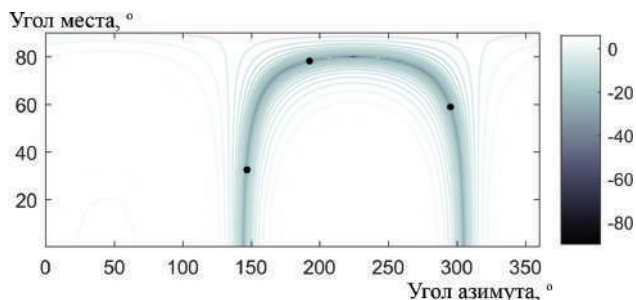


Рис. 7. Диаграмма направленности АР в благоприятной помеховой обстановке

новке, соответствующей повороту АР на 90° (рис. 5). Из рис. 7 видно, что компенсатор помех формирует протяженный ноль ДН, охватывающий все действующие помехи, в результате чего достигается высокий уровень подавления ($K_n \approx 57$ дБ).

Заключение

Показано, что при использовании планарных АР с центральной симметрией в устройстве компенсатора помех существуют особые направления действия помех, для которых эффективность функционирования компенсатора мала. Недостаток наблюдается при действии $N - 1$ помех на N -элементную АР. На примере четырехэлементной планарной АР выполнен расчет особых направлений действия помех. Полученные теоретические результаты подтверждены имитационным моделированием работы компенсатора.

Для борьбы с указанным недостатком рекомендовано изменение геометрии АР, использование избыточного количества антенных элементов и иных алгоритмов помехозащиты приемной системы.

Литература

1. Корогодин И.В., Перов А.И., Днепров В.В., Савельев С.А. Экспериментальное исследование характеристик навигационного приемника с антенной решеткой и фокусировкой на навигационные спутники // Радионавигационные технологии. 2016. № 5. С. 100—105.
2. Dabak Ö.C. et al. Interference suppression in a GPS receiver with 4 element array design and implementation of beamforming algorithms // Proc. Position, Location and Navigation Symp. (PLANS). Savannah (GA), 2016. Pp. 645—652.
3. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981.
4. Монзинго Р.А. Адаптивные антенные решетки. М.: Радио и связь, 1986.
5. Уидроу Б., Стринз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989.
6. Бакитько Р.В. и др. ГЛОНАСС-принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2010.

7. Харисов В.Н. Экспериментальное исследование цифрового антенного компенсатора помех для приемника СРНС // Радиотехника. 2008. № 7. С. 51—55.

8. Харисов В.Н. Характеристики подавления помех в первом образце помехоустойчивой аппаратуры потребителей СРНС ГЛОНАСС/GPS с адаптивной антенной решеткой // Радиотехника. 2010. № 7. С. 127—136.

9. Харисов В.Н. Оценка характеристик подавления помех приемникам ГНСС с антенными решетками в реальных условиях // Радиотехника. 2013. № 7. С. 132—136.

10. Antcom [Официальный сайт] <http://www.antcom.com/> (дата обращения 17.04.2017).

11. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского гос. ун-та им. Н.И. Лобачевского, 2007.

12. Гершман А.Б., Ермолаев В.Т. Анализ собственных чисел корреляционной матрицы входных колебаний адаптивной антенной решетки и возможности углового сверхразрешения в условиях коррелированных внешних источников излучения // Известия высших учебных заведений. Серия «Радиофизика». 1988. Т. 31. № 10. С. 1236—1240.

13. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990.

References

1. Korogodin I.V., Perov A.I., Dneprov V.V., Savvel'ev S.A. Eksperimental'noe Issledovanie Kharakteristik Navigatsionnogo Priemnika s Antennoy Reshetkoy i Fokusirovkooy na Navigatsionnye Sputniki. Radionavigatsionnye tekhnologii. 2016;5:100—105. (in Russian).

2. Dabak Ö.C. e. a. Interference Suppression in a GPS Receiver with 4 Element Array Design and Implementation of Beamforming Algorithms. Proc. Position, Location and Navigation Symp. (PLANS). Savannah (GA), 2016: 645—652.

3. Shirman Ya.D., Manzhos V.N. Teoriya i Tekhnika Obrabotki Radiolokatsionnoy Informatsii na Fone Pomekh. M.: Radio i Svyaz', 1981. (in Russian).

4. Monzingo R.A. Adaptivnye Antennnye Reshetki. M.: Radio i Svyaz', 1986. (in Russian).

5. Uidrou B., Strinz S. Adaptivnaya Obrabotka Signalov. M.: Radio i Svyaz', 1989. (in Russian).

6. Bakit'ko R.V. i dr. GLONASS-printsipy Postroeniya i Funktsionirovaniya. M.: Radiotekhnika, 2010. (in Russian).

7. Kharisov V.N. Eksperimental'noe Issledovanie Tsifrovogo Antennogo Kompensatora Pomekh dlya Priemnika SRNS. Radiotekhnika. 2008;7:51—55. (in Russian).

8. Kharisov V.N. Karakteristiki Podavleniya Pomekh v Pervom Obraztse Pomekhoustoychivoy Apparatury Potrebiteley SRNS GLONASS/GPS s Adaptivnoy Antennoy Reshetkoy. Radiotekhnika. 2010;7:127—136. (in Russian).

9. Kharisov V.N. Otsenka Kharakteristik Podavleniya Pomekh Priemnikam GNSS s Antennymi Reshetkami v Real'nykh Usloviyakh. Radiotekhnika. 2013;7:132—136. (in Russian).

10. Antcom [Ofits. Sayt] <http://www.antcom.com/> (Data Obrashcheniya 17.04.2017). (in Russian).

11. Ermolaev V.T., Flaksman A.G. Metody Otsenivaniya Parametrov Istochnikov Signalov i Pomekh, Prini-maemykh Antennoy Reshetkoy. Nizhniy Novgorod: Izd-vo Nizhegorodskogo Gos. Un-ta im. N.I. Lobachevskogo, 2007. (in Russian).

12. Gershman A.B., Ermolaev V.T. Analiz Sobstvennykh Chisel Korrelyatsionnoy Matritsy Vkhodnykh Kolebaniy Adaptivnoy Antennoy Reshetki i Vozmozhnosti Uglovogo Sverkhrazresheniya v Usloviyakh Korrelirovannykh Vneshnikh Istochnikov Izlucheniya. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Seriya «Radiofizika». 1988;31;10:1236—1240. (in Russian).

13. Marpl.-ml. S.L. Tsifrovoy Spektral'nyy Analiz i Ego Prilozheniya. M.: Mir, 1990. (in Russian).

Сведения об авторах

Грибов Павел Сергеевич — аспирант кафедры радиотехнических систем НИУ «МЭИ», e-mail: gribovps@yandex.ru

Грибова Мария Александровна — аспирантка кафедры радиотехнических систем НИУ «МЭИ», e-mail: marygladysheva@yandex.ru

Шатилов Александр Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических систем НИУ «МЭИ», начальник отделения базовых технологий интеграционных навигационных систем АО «КБ НАВИС», e-mail: shatilov@navis.ru

Information about authors

Gribov Pavel S. — Ph.D.-student of Radio Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: gribovps@yandex.ru

Gribova Maria A. — Ph.D.-student of Radio Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: marygladysheva@yandex.ru

Shatilov Aleksandr Yu. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Radio Systems Dept., NRU MPEI, Head of Basic Technologies for Integrated Navigation Systems Dept., Joint-stock Company Navis Inc. Design Bureau, e-mail: shatilov@navis.ru

Статья поступила в редакцию 27.04.2017