

Научная статья

УДК 621.396; DOI: 10.61260/2218-13X-2024-1-55-67

ОПТИМАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ШИРОКОДИАПАЗОННОГО АДАПТИВНОГО КОМПЕНСАТОРА ПОМЕХ В ДЕКАМЕТРОВЫХ ЛИНИЯХ РАДИОСВЯЗИ МЧС РОССИИ

✉ **Бибарсов Марат Рашидович;**

Дворников Сергей Викторович.

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Санкт-Петербург, Россия;

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.

Бортникер Владимир Юрьевич.

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Санкт-Петербург, Россия.

Милаванович Екатерина Воиславовна.

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

✉ bibarsovmr@rambler.ru

Аннотация. Проведен анализ методов адаптивной пространственной компенсации помех, сходящихся к оптимальному винеровскому решению с точностью до постоянного множителя. Представлен математический аппарат для расчета выигрыша в помехозащищенности линий декаметровых радиосвязи за счет применения адаптивного компенсатора помех из двух разнесенных антенных излучателей. Приведены результаты моделирования расчета зависимости нормированного выигрыша в помехозащищенности от соотношения разноса антенных элементов и длины волны. Сформулированы предложения по оптимальному пространственному размещению излучателей с точки зрения выигрыша в помехозащищенности при заданном направлении на полезный сигнал в интересах повышения эффективности приема сигналов в декаметровых линиях связи МЧС России.

Ключевые слова: декаметровые линии радиосвязи, адаптивный компенсатор помех, оптимальный разнос антенн, энергетический выигрыш в помехозащищенности

Для цитирования: Бибарсов М.Р., Дворников С.В., Бортникер В.Ю., Милаванович Е.В. Оптимальное размещение антенных элементов широкодиапазонного адаптивного компенсатора помех в декаметровых линиях радиосвязи МЧС России // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2024. № 1. С. 55–67. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-1-55-67.

Scientific article

SPATIAL PLACEMENT OF ANTENNA ELEMENTS OF WIDE-BAND ADAPTIVE INTERFERENCE COMPENSATOR IN DECAMETER RADIO COMMUNICATION LINES OF THE EMERCOM OF RUSSIA

✉ **Bibarsov Marat R.;**

Dvornikov Sergei V.

**Military academy of communications of Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,
Saint-Petersburg, Russia;**

Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation, Saint-Petersburg, Russia.

Bortniker Vladimir Yu.

**Military academy of communications of Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,
Saint-Petersburg, Russia.**

Milavanovich Ekaterina V.

ITMO National research university, Saint-Petersburg, Russia

✉ bibarsovmr@rambler.ru

Abstract. The analysis of adaptive spatial interference compensation methods converging to the optimal Wiener solution with accuracy up to a constant multiplier is carried out. A mathematical apparatus is presented for calculating the gain in noise immunity of decameter radio communication lines due to the use of an adaptive interference compensator from two spaced antenna emitters. The results of modeling the calculation of the dependence of the normalized gain in noise immunity on the ratio of antenna element spacing and wavelength are presented. Proposals are formulated for the optimal spatial placement of emitters in terms of gain in noise immunity at a given direction to a useful signal in the interests of increasing the efficiency of signal reception in decameter communication lines of the EMERCOM of Russia.

Keywords: decameter radio communication lines, adaptive interference compensator, optimal antenna spacing, energy gain in noise immunity

For citation: Bibarsov M.R., Dvornikov S.V., Bortniker V.Yu., Milavanovich E.V. Spatial placement of antenna elements of wide-band adaptive interference compensator in decameter radio communication lines of the EMERCOM of Russia // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2024. № 1. P. 55–67. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-1-55-67.

Введение

В настоящее время развернутая на территории Российской Федерации мощная сеть радиосвязи МЧС России на базе передатчиков большой и средней мощности от 1 до 20 кВт, а также мобильные радиостанции средней мощности различных типов на автомобильной базе успешно выполняют поставленные задачи по предназначению. Исследованию повышения эффективности управления деятельностью подразделений МЧС России, применения средств радиосвязи посвящено большое количество работ [1–11]. Однако высокая загрузка декаметрового диапазона случайными сосредоточенными по спектру стационарными помехами, а также возможными преднамеренными помехам приводит к существенному снижению вероятности связи с заданной достоверностью. Это заставляет искать новые пути повышения эффективности радиосвязи. Одним из таких направлений является применение методов адаптивной пространственной компенсации помех в месте приема [12–30].

Указанные методы предполагают использование пространственно разнесенных антенн и идентичных приемных трактов совместно с устройством компенсации помехи, на выходе которого формируется напряжение с более высоким отношением сигнал/помеха. Формирование сигнала на выходе адаптивного компенсатора помех (АКП) осуществляется

суммированием реализаций смеси сигнал+помеха+шум с некоторыми оптимизируемыми в процессе работы весовыми коэффициентами.

В работах [12–30] показано, что для АКП, максимизирующих отношение сигнал/помеха+шум, оптимальное значение весовых коэффициентов определяется выражением:

$$W = \eta B^{-1} S^*,$$

где B – ковариационная матрица помех; S^* – вектор полезного сигнала; η – произвольная постоянная; W – вектор оптимальных весовых коэффициентов; * – знак комплексного сопряжения.

Максимальное отношение сигнал/помеха + шум при этом определяется выражением:

$$h^2 = S^T B^{-1} S^*,$$

T – знак транспонирования.

Аналогичное значение вектора оптимальных весовых коэффициентов получается по критерию максимума отношения правдоподобия при приеме дискретных сигналов, минимума среднеквадратичной ошибки, минимума выходного напряжения (мощности). Все эти решения сходятся к оптимальному винеровскому решению с точностью до постоянного множителя.

Использование АКП в широком диапазоне частот накладывает определенные условия на размещение антенных элементов (АЭ) с точки зрения повышения помехозащищенности. Эти условия требуют анализа и получения оптимального решения по выбору расстояний между элементами АКП. Рассмотренные обстоятельства позволяют сформулировать цель статьи.

Целью настоящей работы является определение оптимального расстояния между АЭ широкодиапазонного АКП с точки зрения повышения помехозащищенности линии радиосвязи в диапазоне 1,5–17 МГц.

Оптимизация выигрыша в помехозащищенности линий декаметровый радиосвязи

Рассмотрим случай использования двух разнесенных АЭ, где можно обеспечить подавление одной помехи. Такой случай представляет интерес, так как ситуация, когда в полосу пропускания попадает одна помеха, доминирующая по отношению к шумовому фону, наиболее вероятна для узкополосных декаметровых систем связи. На рис. 1 представлены нормированные диаграммы направленности (ДН) двухэлементного АКП при отношении $d/\lambda = 0,5$, где d – расстояние между антенными элементами; λ – длина волны.

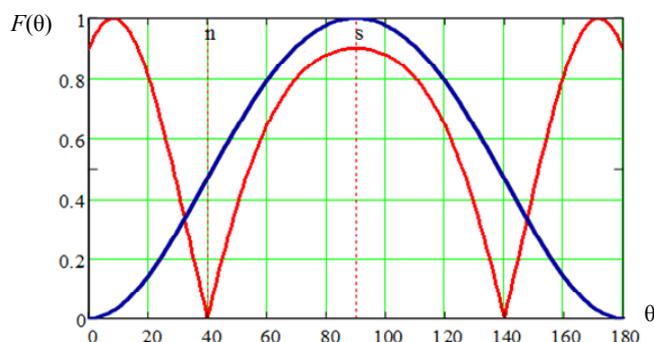


Рис. 1. Диаграммы направленности двухэлементного АКП

Из рис. 1 видно, что ДН $F(\theta)$ в отсутствии помехи (синяя кривая) имеет один главный (основной) лепесток шириной примерно 60° по уровню -3 дБ. При воздействии помехи (красная кривая, $n=40^\circ$ – направление прихода помехи, $s=90^\circ$ – направление прихода

полезного сигнала) формируется «ноль» (глубокого провала ДН) в направлении n , но вместе с тем уровень главного лепестка ДН несколько уменьшается. Это соответствует теоретическим сведениям, согласно которым задача адаптации многоэлементных антенных систем состоит не столько в повышении уровня ДН в направлении полезного сигнала, сколько в формировании «нуля» в направлении прихода помехи. Подавление помех осуществляется как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

Таким образом, двухэлементный АКП полностью решает задачу подавления одной помехи. Однако при этом необходимо оценить выигрыш в помехозащищенности с различным пространственным разнесом АЭ и направлениях линии декаметрового радиосвязи.

Для случая плоского фронта волны помехи выигрыш в помехозащищенности, по сравнению с одноканальным приемом, определяется выражением [22]:

$$Q = \frac{2}{1-A^2} \left\{ 1 - A \cos \left[\frac{2\pi d}{\lambda} (\cos \theta_c \cos \beta_c - \cos \theta_n \cos \beta_n) \right] \right\}, \quad (1)$$

где d – расстояние между антеннами; λ – длина волны; θ_c, θ_n – углы прихода сигнала и помехи в горизонтальной плоскости; β_c, β_n – углы прихода сигнала или помехи в вертикальной плоскости; $A = \frac{P_n}{P_n + \sigma_{ш}^2}$ – P_n – мощность помехи; $\sigma_{ш}^2$ – мощность внутренних шумов.

Обозначая отношения $\frac{P_n}{\sigma_{ш}^2} = h_n^2$, получаем:

$$Q = \frac{2(h_n^4 + 2h_n^2 + 1)}{2h_n^2 + 1} \left\{ 1 - \frac{h_n^2}{h_n^2 + 1} \times \cos \left[\frac{2\pi d}{\lambda} (\cos \theta_c \cos \beta_c - \cos \theta_n \cos \beta_n) \right] \right\}.$$

Направления прихода помехи полагаем равновероятными, то есть величины θ_n, β_n считаем независимыми случайными величинами с распределениями:

$$\omega(\theta_n) = \frac{1}{2\pi}, \quad |\theta_n| \leq \pi;$$

$$\omega(\beta_n) = \frac{1}{\pi}, \quad 0 \leq \beta_n \leq \frac{\pi}{2}.$$

Определяем средний энергетический выигрыш при фиксированном отношении h_n^2 :

$$\begin{aligned} m(Q/h_n^2) &= \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\pi/2} \int_{-\pi}^{\pi} \left\{ \frac{2h_n^4 + 4h_n^2 + 2}{2h_n^2 + 1} - \frac{(2h_n^4 + 4h_n^2 + 2)h_n^2}{(2h_n^2 + 1)(h_n^2 + 1)} \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos \left[\frac{2\pi d}{\lambda} (\cos \theta_c \cos \beta_c - \cos \theta_n \cos \beta_n) \right] \right\} d\theta_n d\beta_n = \\ &= \frac{2h_n^4 + 4h_n^2 + 2}{2h_n^2 + 1} - \frac{(2h_n^4 + 4h_n^2 + 2)h_n^2}{(2h_n^2 + 1)(h_n^2 + 1)\pi^2} \times \\ &\quad \times \left\{ \int_0^{\pi/2} \int_{-\pi}^{\pi} \cos \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta_n \cos \beta_n \right) \cos \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta_c \cos \beta_c \right) d\theta_n d\beta_n + \right. \\ &\quad \left. + \int_0^{\pi/2} \int_{-\pi}^{\pi} \sin \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta_n \cos \beta_n \right) \sin \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta_c \cos \beta_c \right) d\theta_n d\beta_n \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Второй интеграл в выражении (2) равен нулю, так как является интегралом от нечетной функции по симметричному относительно нуля промежутку:

$$m(Q/h_{\Pi}^2) = \frac{2h_{\Pi}^4 + 4h_{\Pi}^2 + 2}{2h_{\Pi}^2 + 1} - \frac{(2h_{\Pi}^4 + 4h_{\Pi}^2 + 2)h_{\Pi}^2}{(2h_{\Pi}^2 + 1)(h_{\Pi}^2 + 1)\pi^2} \times \\ \times \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos\theta_c \cos\beta_c\right) \int_0^{\pi/2} d\beta_{\Pi} \int_0^{\pi} \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos\theta_{\Pi} \cos\beta_{\Pi}\right) d\theta_{\Pi}.$$

Внутренний интеграл вычисляем по таблице в работе [27]:

$$2 \int_0^{\pi} \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos\theta_{\Pi} \cos\beta_{\Pi}\right) d\theta_{\Pi} = \pi J_0\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos\beta_{\Pi}\right).$$

Внешний интеграл также сводится к табличному подстановкой $\cos\beta_{\Pi} = x$:

$$2\pi \int_0^{\pi/2} J_0\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos\beta_{\Pi}\right) d\beta_{\Pi} = 2\pi \int_0^1 J_0\left(\frac{2\pi d}{\lambda} x\right) \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \pi^2 \left[J_0\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \right]^2.$$

Таким образом, получаем:

$$m(Q/h_{\Pi}^2) = \frac{2h_{\Pi}^4 + 4h_{\Pi}^2 + 2}{2h_{\Pi}^2 + 1} - \frac{(2h_{\Pi}^4 + 4h_{\Pi}^2 + 2)h_{\Pi}^2}{(2h_{\Pi}^2 + 1)(h_{\Pi}^2 + 1)} \times \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos\theta_c \cos\beta_c\right) \left[J_0\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \right]^2.$$

При $h_{\Pi}^2 \gg 1$:

$$m(Q/h_{\Pi}^2) = (h_{\Pi}^2 + 2) \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos\theta_c \cos\beta_c\right) \left[J_0\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \right]^2 \right\}. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что при

$$\left[J_0\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \right]^2 = 0 \quad (4)$$

средний выигрыш будет иметь максимальное значение и не будет зависеть от углов прихода сигнала.

На рис. 2 представлена зависимость нормированного выигрыша в помехозащищенности $m(Q/h_{\Pi}^2)_{\text{норм}} = \frac{m(Q/h_{\Pi}^2)}{m(Q/h_{\Pi}^2)_{\text{max}}}$ от соотношения d/λ при направлении на полезный сигнал $\cos\theta_c = \pi/2$. Согласно этой зависимости, так как первый корень уравнения (4) при заданных исходных данных соответствует значению $\pi d/\lambda = 2,404$, оптимальное расстояние между АЭ составляет:

$$d = 0.76\lambda. \quad (5)$$

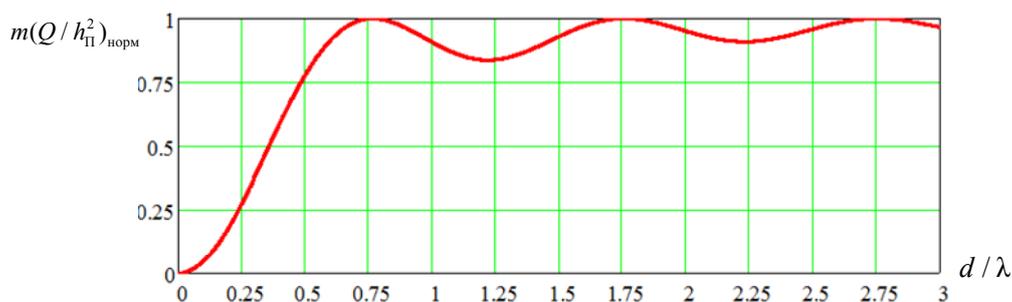


Рис. 2. Зависимость нормированного выигрыша в помехозащищенности от соотношения d/λ при направлении на полезный сигнал $\cos\theta_c = \pi/2$ в двухэлементном АКП

Дальнейший разнос АЭ на расстояния, соответствующие вторым и третьим корням уравнения (4), нецелесообразен, так как в этом случае возможно снижение пространственной когерентности помехи. Вместе с тем при нарушении условия (5) средний энергетический выигрыш будет также зависеть от направления прихода сигнала.

Оптимизация размещения АЭ широкодиапазонного адаптивного компенсатора помех в декаметровый линии радиосвязи

Оценим теперь, на какие расстояния должны быть разнесены антенны при использовании АКП в декаметровом диапазоне при условии, что уменьшение выигрыша (3) составляет не более 10 %.

Так как

$$-1 \leq \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos\theta_c \cos\beta_c\right) \leq 1,$$

то для уменьшения значения среднего выигрыша не более чем на 10 % необходимо, чтобы

$$0 \leq \left[J_0\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \right]^2 \leq 0,1,$$

то есть

$$1,841 \leq \frac{\pi d}{\lambda} \leq 3,185.$$

Коэффициент перекрытия диапазона при заданном d составляет:

$$k = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{3,185}{1,841} = 1,73. \quad (6)$$

Для перекрытия всего декаметрового диапазона необходимо семь АЭ, а для перекрытия диапазона 1,5–17 МГц, который наиболее широко используется в магистральной радиосвязи, необходимо шесть разнесенных антенн. Соответствующие поддиапазоны, перекрываемые парами антенн, показаны в табл. 1., $f_2 - f_1$ – диапазон частот.

При использовании АЭ, расположенных в пространстве на одной линии, возможно их попарное переключение. При этом число АЭ может быть уменьшено.

Пусть наибольшая длина волны первого поддиапазона $\lambda_2^{(1)} = 200$ м. Тогда, согласно выражения (6), наименьшая длина волны этого поддиапазона $\lambda_1^{(1)} = 115,6$ м. Такое же значение должна иметь максимальная длина волны второго поддиапазона $\lambda_2^{(2)} = \lambda_1^{(1)}$.

Таблица 1

Номер поддиапазона	d , м	$\lambda_2 - \lambda_1$, м	$f_2 - f_1$, МГц
1	117,2	200–15,6	1,5–2,6
2	67,8	115,6–66,8	2,6–4,49
3	39,1	66,8–38,6	4,49–7,76
4	22,6	38,6–22,3	7,76–13,45
5	13,1	22,3–12,9	13,45–23,2

Расстояние между первым и вторым АЭ, соответствующее перекрытию первого поддиапазона:

$$d^{(1)} = \frac{1,841\lambda_2^{(1)}}{\pi} = 117,2 \text{ м.}$$

Аналогично определяем для второго поддиапазона $\lambda_2^{(2)} = 115,6 \text{ м}$; $\lambda_1^{(2)} = 66,8 \text{ м}$; $d^{(2)} = 67,8 \text{ м}$.

Третий АЭ размещаем между первым и вторым на расстоянии $d^{(2)}$ от второго. Для следующего поддиапазона выбираем расстояние $d^{(3)} = d^{(1)} - d^{(2)} = 49,4 \text{ м}$, что соответствует расстоянию между первым и третьим элементами. Соответствующие значения длин волн равны $\lambda_2^{(3)} = 84,4 \text{ м}$ и $\lambda_1^{(3)} = 48,8 \text{ м}$.

Между АЭ 1 и 3 размещаем элемент 4, таким образом, чтобы возможно было перекрыть еще два поддиапазона. Место расположения элемента 4 должно выбираться из условия:

$$\lambda_1^{(4)} = \frac{\pi d^{(4)}}{3,185} = \frac{\pi d^{(4)}}{1,841} = \lambda_2^{(5)};$$

$$d^{(4)} + d^{(5)} = d^{(3)}.$$

Отсюда получаем:

$$d^{(4)} = 31,3 \text{ м}; \quad \lambda_2^{(4)} = 53,49 \text{ м}; \quad \lambda_1^{(4)} = 30,9 \text{ м};$$

$$d^{(5)} = 18,1 \text{ м}; \quad \lambda_2^{(5)} = 30,9 \text{ м}; \quad \lambda_1^{(5)} = 17,8 \text{ м}.$$

При использовании АЭ 2 и 4, расстояние между которыми $d^{(6)} = 99,1 \text{ м}$, соответствующие значения длин волн равны:

$$\lambda_2^{(6)} = 169,1 \text{ м} \text{ и } \lambda_1^{(6)} = 97,7 \text{ м}.$$

Эти АЭ целесообразно использовать при приеме сигналов, длины волн которых лежат на стыке поддиапазонов 1 и 2. В этом случае изменение выигрыша (3) будет находиться в более узких (чем 10 %) пределах.

На рис. 3 приведено размещение четырех АЭ, а в табл. 2 показано, каким АЭ соответствуют рассмотренные поддиапазоны.

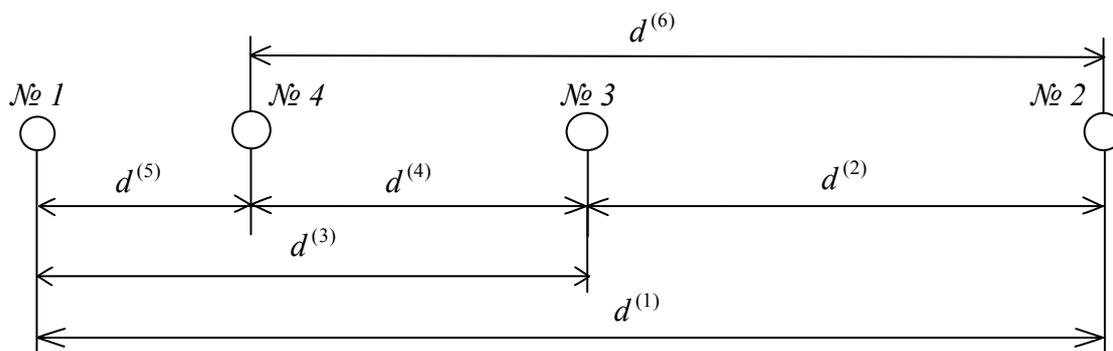


Рис. 3. Пространственное размещение АЭ АКП

Таблица 2

Номер поддиапазона	d , м	$\lambda_2 - \lambda_1$, м	$f_2 - f_1$, МГц	Номера АЭ
1	117,2	200–115,6	1,5–2,6	1,2
2	67,8	115,6–66,8	2,6–4,49	3,2
3	49,4	84,4–48,8	3,55–6,15	1,3
4	31,3	53,5–30,9	5,61–9,71	4,3
5	18,1	30,9–17,8	9,71–16,86	1,4
6	99,1	169,1–97,7	1,77–3,07	2,4

Таким образом, при использовании АКП в диапазоне 1,5–16,8 МГц минимально необходимое число АЭ равно четырем. Рассчитанные расстояния между антеннами гарантируют изменение выигрыша в помехозащищенности в пределах 10 % от максимального. В работе получен оптимальный разнос антенн $d = 0.76\lambda$ с точки зрения выигрыша в помехозащищенности при направлении на полезный сигнал $\cos\theta_c = \pi/2$. Однако из теоретических положений и практического применения пространственной АКП известно, что для антенных решеток с большим количеством АЭ расстояние между излучателями с их прямоугольным расположением должно составлять $d = 0.5\lambda$, при гексагональном размещении $d = 0.65\lambda$ для эффективного подавления помех. При этом нормированный выигрыш в помехозащищенности в этих условиях необходимо оценивать с учетом изменения исходного выражения (1) и результирующего (3).

Необходимо отметить, что для повышения эффективности приема в линиях радиосвязи необходимо комплексное применение широкополосных сигналов, методов энергетического, временного, частотного, кодового, пространственного и поляризационного разнесения сигналов [12–30].

Заключение

Анализ полученных решений задач оптимизации выигрыша в помехозащищенности линий декаметровый радиосвязи и оптимального размещения АЭ АКП позволил рассчитать расстояния между антеннами. При использовании двухтрактового АКП средний энергетический выигрыш в помехозащищенности по сравнению с однотрактовым приемом в общем случае зависит от отношения мощности помехи к мощности внутренних шумов, от направления прихода сигнала и отношения расстояния между элементами к длине волны. Следует отметить, что приведенные результаты справедливы и для других частотных диапазонов.

Таким образом, предложенный подход к оптимальному размещению АЭ широкодиапазонного АКП с учетом оптимизации выигрыша в помехозащищенности линий декаметровый радиосвязи позволяет:

1. Получить максимальный выигрыш в помехозащищенности линий радиосвязи в диапазоне коротких волн при определенном направлении прихода полезного сигнала.
2. Оптимально разместить АЭ при заданном направлении на полезный сигнал.
3. Обеспечить работу декаметрового канала радиосвязи в широком диапазоне частот коммутацией соответствующих пар АЭ.
4. Формировать глубокие провалы ДН в направлении воздействия помехи.

Направлением дальнейшего исследования авторы видят в анализе изменения выигрыша в помехозащищенности и ДН антенных систем с большим количеством АЭ при приеме полезного сигнала с различных возможных направлений с подавлением нескольких помех.

Список источников

1. Мусиенко Т.В., Артамонов В.С. Управление пожарной безопасностью как частью национальной безопасности: история вопроса // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2022. № 2 (38). С. 5–16. DOI: 10.37468/2307-1400-2022-2-5-16.
2. Гольчевский В.Ф. Организация деятельности подразделений ОВД при чрезвычайной ситуации, вызванной лесными пожарами // Полицейская деятельность. 2022. № 5. С. 1–13.
3. Новая лесохозяйственная стратегия ЕС до 2030 г. сообщение европейской комиссии европейскому парламенту, совету, экономическому и социальному комитету, комитету по делам регионов. Брюссель, 16 июля 2021 г. COM (2021) 572 Заключительное // Экономика природопользования. 2022. № 1. С. 46–83.
4. Чернецов И.Н. Совершенствование системы организации управления взаимодействием экипажа и подразделений Государственной противопожарной службы при тушении пожаров на кораблях и судах: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: С.-Петербург. ун-т МВД России, 2002. 187 с.
5. Система радиосвязи в МЧС России / С.В. Пацук [и др.] // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2022. № 2 (12). С. 41–49.
6. Организация информационного обеспечения мобильных групп спасателей в Арктической зоне Российской Федерации / И.Ф. Бажуков [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6. № 4. С. 3–9.
7. Каменецкая Н.В. К вопросу о применении методов исследования операций для оптимизации поисково-спасательных работ // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика – регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в арктическом регионе: материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2020. С. 165–167.
8. Каймонов О.С., Газизов Т.Т. Новый подход к обеспечению бесперебойной КВ-радиосвязи в системе МЧС России // Электронные средства и системы управления: материалы докладов Междунар. науч.-практ. конф. 2015. № 1-2. С. 30–34.
9. Воронин С.В., Скрипник И.Л. Применение средств радиосвязи КВ-диапазона в северных широтах при управлении силами и средствами МЧС // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2016. № 1-2 (5). С. 135–137.
10. Дворников С.В., Власенко В.И., Бибарсов М.Р. Антенная система воздушного ретранслятора для систем подвижной связи // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербург. ун-та ГПС МЧС России». 2022. № 3. С. 58–67.
11. Дворников С.В., Духовницкий О.Г. Оценка помехозащищенности профессионального радионавигационного оборудования системы ГЛОНАСС // Информация и космос. 2015. № 4. С. 73–77.
12. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.

13. Пистолькорс А.А., Литвинов О.С. Введение в теорию адаптивных антенн. М.: Наука, 1991. 200 с.
14. Григорьев В.А., Щесняк С.С., Гулюшин В.Л. Адаптивные антенные решетки: учеб. пособие в 2-х ч. СПб.: Ун-т ИТМО, 2016. Ч. 1. 179 с.
15. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 528 с.
16. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Ю.И. Лосев [и др.]. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.
17. Бибарсов М.Р. Метод формирования оценок угловых координат источников сигналов и помех на основе фильтра Калмана-Бьюси // Радиотехника. 2018. № 4. С. 92–98.
18. Исследование характеристик многофункциональной антенной решетки / М.Р. Бибарсов [и др.] // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2012. № 2. С. 3–9.
19. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
20. Алешин С.Л., Бибарсов М.Р., Новиков А.Н. Методика пространственно-временной обработки широкополосных сигналов и ее реализации в адаптивных антенных решетках // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 221–227.
21. Метод формирования «нулей» диаграммы направленности адаптивной антенной решетки для подвижных источников излучения / Д.Д. Габриэльян [и др.] // Антенны. 2019. № 1 (255). С. 59–64.
22. Кириллов Н.Е. Пространственно-временная обработка сигналов с подавлением сосредоточенных помех // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника радиосвязи. 1974. Вып. 3. С. 21–31.
23. Оптимальная обработка широкополосных сигналов в адаптивных антенных решетках систем радиосвязи, радионавигации и радиолокации / М.Р. Бибарсов [и др.] // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 6. С. 22–26.
24. Поляризационный разнос на основе логопериодических антенн турникетного типа / В.И. Власенко [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2023. № 1. С. 91–97.
25. Алгоритм адаптации для антенной решетки систем космической связи в стационарных условиях сигнально-помеховой обстановки / М.Р. Бибарсов [и др.] // Информация и космос. 2016. № 4. С. 15–21.
26. Бибарсов М.Р., Габриэльян Д.Д., Новиков А.Н. Оптимальное восстановление спектра широкополосных сигналов в условиях помех с использованием адаптивных антенных решеток // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2011. № 3 (126). С. 49–52.
27. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Наука, 1971. 1108 с.
28. Бибарсов М.Р., Бибарсова Г.Ш. Методы обработки широкополосных сигналов в адаптивных антенных решетках // Актуальные вопросы развития систем и сетей связи: сб. материалов Всерос. науч.-техн. конф. Ставрополь, 2023. С. 22–24.
29. Balanis C.A. Antenna theory: analysis and design. John Wiley & Sons. 2016. 1104 p.
30. Hansen R.S. Phased Antenna Arrays. 2nd ed. New Jersey, John Wiley & Sons. 2009. 551 p.

References

1. Musienko T.V., Artamonov V.S. Upravlenie pozharnoj bezopasnost'yu kak chast'yu nacional'noj bezopasnosti: istoriya voprosa // Nacional'naya bezopasnost' i strategicheskoe planirovanie. 2022. № 2 (38). S. 5–16. DOI: 10.37468/2307-1400-2022-2-5-16.
2. Gol'chevskij V.F. Organizaciya deyatelnosti podrazdelenij OVD pri chrezvychajnoj situacii, vyzvannoj lesnymi pozharami // Policejskaya deyatelnost'. 2022. № 5. S. 1–13.

3. Novaya lesohozyajstvennaya strategiya ES do 2030 g. soobshchenie evropejskoj komissii evropejskomu parlamentu, sovetu, ekonomicheskomu i social'nomu komitetu, komitetu po delam regionov. Bryussel', 16 iyulya 2021 g. COM (2021) 572 Zaklyuchitel'noe // *Ekonomika prirodnopol'zovaniya*. 2022. № 1. S. 46–83.

4. Chernecov I.N. Sovershenstvovanie sistemy organizacii upravleniya vzaimodejstviem ekipazha i podrazdelenij Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby pri tushenii pozharov na korablyah i sudah: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb.: S.-Peterb. un-t MVD Rossii, 2002. 187 s.

5. Sistema radiosvyazi v MCHS Rossii / S.V. Pacuk [i dr.] // *Aktual'nye voprosy pozharnoj bezopasnosti*. 2022. № 2 (12). S. 41–49.

6. Organizaciya informacionnogo obespecheniya mobil'nyh grupp spasatelej v Arkticheskoj zone Rossijskoj Federacii / I.F. Bazhukov [i dr.] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*. 2018. T. 6. № 4. S. 3–9.

7. Kameneckaya N.V. K voprosu o primenenii metodov issledovaniya operacij dlya optimizacii poiskovo-spatatel'nyh rabot // *Servis bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy*. Arktika – region strategicheskikh interesov: pravovaya politika i sovremennye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti v arkticheskom regione: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. SPb., 2020. S. 165–167.

8. Kajmonov O.S., Gazizov T.T. Novyj podhod k obespecheniyu besperebojnoj KV-radiosvyazi v sisteme MCHS Rossii // *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya: materialy dokladov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* 2015. № 1-2. S. 30–34.

9. Voronin S.V., Skripnik I.L. Primenenie sredstv radiosvyazi KV-diapazona v severnyh shirotah pri upravlenii silami i sredstvami MCHS // *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij*. 2016. № 1-2 (5). S. 135–137.

10. Dvornikov S.V., Vlasenko V.I., Bibarsov M.R. Antennaya sistema vozdušnogo retranslyatora dlya sistem podvizhnoj svyazi // *Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii»*. 2022. № 3. S. 58–67.

11. Dvornikov S.V., Duhovnickij O.G. Ocenka pomekhozashchishchennosti professional'nogo radionavigacionnogo oborudovaniya sistemy GLONASS // *Informaciya i kosmos*. 2015. № 4. S. 73–77.

12. Monzingo R.A., Miller T.U. Adaptivnye antennye reshetki. M.: Radio i svyaz', 1986. 448 s.

13. Pistol'kors A.A., Litvinov O.S. Vvedenie v teoriyu adaptivnyh antenn. M.: Nauka, 1991. 200 s.

14. Grigor'ev V.A., Shchesnyak S.S., Gulyushin V.L. Adaptivnye antennye reshetki: ucheb. posobie v 2-h ch. SPb.: Un-t ITMO, 2016. Ch. 1. 179 s.

15. Dzhigan V.I. Adaptivnaya fil'traciya signalov: teoriya i algoritmy. M.: Tekhnosfera, 2013. 528 s.

16. Adaptivnaya kompensaciya pomekh v kanalah svyazi / Yu.I. Losev [i dr.]. M.: Radio i svyaz', 1988. 208 s.

17. Bibarsov M.R. Metod formirovaniya ocenok uglovyh koordinat istochnikov signalov i pomekh na osnove fil'tra Kalmana-B'yusi // *Radiotekhnika*. 2018. № 4. S. 92–98.

18. Issledovanie harakteristik mnogofunkcional'noj antennoj reshetki / M.R. Bibarsov [i dr.] // *Izv. vuzov Rossii. Radioelektronika*. 2012. № 2. S. 3–9.

19. Shirman Ya.D., Manzhos V.N. Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomekh. M.: Radio i svyaz', 1981. 416 s.

20. Aleshin S.L., Bibarsov M.R., Novikov A.N. Metodika prostranstvenno-vremennoj obrabotki shirokopolosnyh signalov i ee realizacii v adaptivnyh antennykh reshetkah // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2021. № 12. S. 221–227.

21. Metod formirovaniya «nulej» diagrammy napravlenosti adaptivnoj antennoj reshetki dlya podvizhnyh istochnikov izlucheniya / D.D. Gabriel'yan [i dr.] // *Antenny*. 2019. № 1 (255). S. 59–64.

22. Kirillov N.E. Prostranstvenno-vremennaya obrabotka signalov s podavleniem sosredotochennykh pomekh // Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika radiosvyazi. 1974. Vyp. 3. S. 21–31.
23. Optimal'naya obrabotka shirokopolosnykh signalov v adaptivnykh antennykh reshetkakh sistem radiosvyazi, radionavigacii i radiolokacii / M.R. Bibarsov [i dr.] // Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika. 2011. Vyp. 6. S. 22–26.
24. Polyarizacionnyj raznos na osnove logoperiodicheskikh antenn turniketnogo tipa / V.I. Vlasenko [i dr.] // Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika televideniya. 2023. № 1. S. 91–97.
25. Algoritm adaptacii dlya antennoj reshetki sistem kosmicheskoy svyazi v stacionarnykh usloviyah signal'no-pomekhovoj obstanovki / M.R. Bibarsov [i dr.] // Informaciya i kosmos. 2016. № 4. S. 15–21.
26. Bibarsov M.R., Gabriel'yan D.D., Novikov A.N. Optimal'noe vosstanovlenie spektra shirokopolosnykh signalov v usloviyah pomekh s ispol'zovaniem adaptivnykh antennykh reshetok // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie. 2011. № 3 (126). S. 49–52.
27. Gradshtejn I.S., Ryzhik I.M. Tablicy integralov, summ, ryadov i proizvedenij. M.: Nauka, 1971. 1108 s.
28. Bibarsov M.R., Bibarsova G.Sh. Metody obrabotki shirokopolosnykh signalov v adaptivnykh antennykh reshetkakh // Aktual'nye voprosy razvitiya sistem i setej svyazi: sb. materialov Vseros. nauch.-tekhn. konf. Stavropol', 2023. S. 22–24.
29. Balanis C.A. Antenna theory: analysis and design. John Wiley & Sons. 2016. 1104 p.
30. Hansen R.S. Phased Antenna Arrays. 2nd ed. New Jersey, John Wiley & Sons. 2009. 551 p.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 30.12.2023; одобрена после рецензирования: 29.01.2024;
принята к публикации: 02.02.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 30.12.2023; approved after review: 29.01.2024;
accepted for publication: 02.02.2024

Информация об авторах:

Бибарсов Марат Рашидович, старший преподаватель кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3); доцент кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов (Кафедра 21) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67), кандидат технических наук, доцент, e-mail: bibarsovmr@rambler.ru, SPIN-код: 5576-1449

Бортникер Владимир Юрьевич, доцент кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3), кандидат технических наук, доцент, e-mail: bortniker.v@mail.ru, SPIN-код: 2216-8007

Милаванович Екатерина Воиславовна, доцент кафедры Национального исследовательского университета ИТМО (197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.), кандидат технических наук, доцент, e-mail: bortniker.v@mail.ru

Дворников Сергей Викторович, профессор кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов (Кафедра 21) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67); профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, доктор технических наук, профессор, e-mail: practicdsv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>, SPIN-код: 7109-9590

Information about authors:

Bibarsov Marat R., senior lecturer of the department of radio communications of the Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny (194064, Saint-Petersburg, Tikhoretsky pr., 3); associate professor of the department of radio engineering and optoelectronic complexes (Department 21) Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (190000, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67), candidate of technical sciences, associate professor e-mail: bibarsovmr@rambler.ru, SPIN: 5576-1449

Bortniker Vladimir Yu., associate professor of the department of radio communications of the Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny (194064, Saint-Petersburg, Tikhoretsky pr., 3), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: bortniker.v@mail.ru, SPIN: 2216-8007

Milavanovich Ekaterina V., associate professor of the department of the National research university ITMO (197101, Saint-Petersburg, Kronverksky ave., 49, lit. A.), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: bortniker.v@mail.ru

Dvornikov Sergey V., professor of the department of radio engineering and optoelectronic complexes (Department 21) Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (190000, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67); professor of the department of radio communications of the Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, doctor of technical sciences, professor, e-mail: practicdsv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>, SPIN: 7109-9590