

Научная статья

Original article

УДК 621.396.67



**АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММЫ  
НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ  
ЕЁ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ**

**ADAPTIVE ALGORITHM FOR FORMING THE DIRECTIONAL DIAGRAM OF  
ANTENNA ARRIGE WITH THE PURPOSE OF INCREASING ITS NOISE  
IMMUNITY**

**Легкий Николай Михайлович**, д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет, Москва» (119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78), тел. 8(499) 215-65-65, [legki@rambler.ru](mailto:legki@rambler.ru)

**Панов Владимир Александрович**, магистрант ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет, Москва» (119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78).

**Nikolai M. Legky**, Doctor of Technical Sciences, Professor FGBOU VO "MIREA - Russian Technological University, Moscow" (119454, Moscow, Prospekt Vernadskogo, 78), tel. 8(499) 215-65-65, [legki@rambler.ru](mailto:legki@rambler.ru).

**Vladimir A. Panov**, master student of FGBOU VO "MIREA - Russian Technological University, Moscow" (119454, Moscow, Prospekt Vernadskogo, d. 78).

**Аннотация.** В данной статье предложен адаптивный алгоритм формирования диаграммы направленности антенной решетки для систем навигации.

Формирование набора лучей в АР с независимыми апертурами позволяет оперативно их оптимизировать при помощи подстройки фазы отдельных излучателей. Антенны с электрическим управлением луча ДН в пространстве обеспечивают сканирование с скоростями на порядки выше, чем скорость поворота механически сканирующих антенн.

**Abstract.** This article proposes an adaptive algorithm for forming an antenna array beamforming for navigation systems. The formation of a set of beams in an array with independent apertures allows them to be quickly optimized by adjusting the phase of individual emitters. Antennas with electrically controlled directional beam in space provide scanning at speeds orders of magnitude higher than the rotation speed of mechanically scanning antennas.

**Ключевые слова:** антенна, фазированная антенная решетка, моделирование, диаграмма направленности.

**Keywords:** antenna, phased antenna array, modeling, radiation pattern.

## **Введение**

Увеличение трафика транспорта в крупных городах ужесточает требования к надежности и безопасности эксплуатации комплексов регулирования транспортных систем автоматического управления, а также в различных системах мониторинга транспортной инфраструктуры [1]. Структурно системы автоматического управления состоят из взаимосвязанных подсистем: диагностики, управления, сигнализации и обеспечения безопасности движения [2]. Для обеспечения точного позиционирования и регулирования трафика в систему обеспечения безопасностью входит наземная приемная аппаратура (НПА) спутниковой радионавигационной системы (СРНС), принимающая собственные координаты от группы разнесенных спутников. Обычно, для точного определения местоположения необходимо минимум четыре разнесенных навигационных спутника [3].

## 1. Антенны наземных радиотехнических средств навигации

Задача навигации, обеспечивающая безопасность трафика локомотивов решается системой СРНС благодаря приему и обработке от навигационных спутников радиосигнала [4, 5]. Прием радиосигналов наземной аппаратурой осуществляется посредством передающих и приемных антенн.

Ограниченная мощность радиопередатчика, установленного на искусственном спутнике СРНС ( $18 \div 28$  дБ/Вт), и большие расстояния между навигационным спутником (НС) и приемной аппаратурой задают существенные ограничения при формировании диаграммы направленности антенны (ДНА) радиоаппаратуры. Обычно мощность сигнала НС на поверхности Земли незначительна и составляет  $-150 \div -165$  дБВт [4]. Поэтому после определения местоположения навигационных спутников необходимо сформировать в соответствующих направлениях узконаправленные пики ДН.

Вместе с полезным сигналом на вход приемника поступают различные помехи искусственного и естественного происхождения. Для оценки влияния внешних помех оценивается отношение мощности полезного сигнала  $P_1$  к шумовому сигналу на входе приемника. Учитывая внутренние шумы приемника, отношение сигнал/шум для участка Земля – Спутник примет вид:

$$\frac{P_c}{P_{ш}} = P_{пер} \frac{G_{пер} G_{пр} \lambda^2}{16\pi^2 R^2 \cdot \eta_{пер} \eta_{пр} P_{ш}} \cdot \frac{1}{U}, \quad (1)$$

где  $P_{ш} = k \cdot T_c \cdot \Delta f_{ш}$  – мощность тепловых шумов приемника;  $G$  – коэффициент усиления антенн;  $\eta$  – потери в антенно-фидерном тракте;  $V = (4\pi r/\lambda)^2$  – потери в свободном пространстве на расстоянии  $R$ .

Из формулы следует, то что увеличение коэффициента усиления  $G$  приведет к повышению точности принимаемых сигналов от спутника. Для этого необходимо максимизировать коэффициент направленного действия (КНД) антенной системы [6].

## 2. Формирование диаграммы направленности (ДН) антенной решетки (АР)

Структура антенны состоит из множества стационарных антенных излучателей, питание к которым подводится когерентно. Обычно, мощность, излучаемая элементами решетки одинакова и поступает с делителя мощности генератора. Электронное управление лучом антенны осуществляется с помощью элементов изменения фазы или временной задержкой сигнала на каждом элементе.

Важной задачей при разработке является определение оптимального местоположения матрицы элементов и межэлементное расстояние. Причем использование большого массива излучающих элементов придает свойство узконаправленности. Структурная схема одномерной фазированной антенной решетки (ФАР) изображена на рисунке 1.

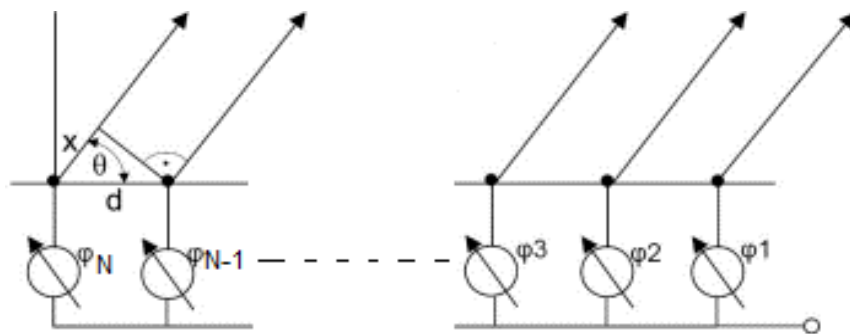


Рис. 1 - Принципиальная схема формирования луча в ФАР

Структурно состав активной ФАР (АФАР) можно разделить на три составные части, выполняющие определенные функции:

К диаграммообразующему элементу, создающему апертуру антенны, можно отнести решетку излучателей. Система формирования и управлением луча создает заданную ДН посредством регулировки амплитуд и фаз сигнала в элементах АР. Система состоит из усилителей мощности, фазовращателей и согласующих цепей. Через согласующую цепь излучатели соединяются усилителями и фазовращателями, образуя тем самым канал АФАР. Для

## Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

минимизации потерь усилитель располагают как можно ближе к элементам решетки. Возможно объединение составных частей канала в модуль.

Формирование результирующего излучения происходит в следствии интерференции когерентных электромагнитных волн, т.е. волн с постоянной разностью фаз. Элементами ФАР выступают различные слабонаправленные и направленные излучатели с различными частотными свойствами и поляризацией излучения. Например, элементами решетки могут быть вибраторные, щелевые, спиральные, диэлектрические стержневые или рупорные антенны.

В случае эквидистантной решетки сдвиг фаз между излучателями, также называемый приращением фазы, постоянен и равен  $\varphi$ . И диаграмма направленности примет вид

$$f(\theta, \varphi) = F_{эл}(\theta, \varphi) f_{\Sigma}(\theta, \varphi), \quad (2)$$

где  $F_{эл}(\theta, \varphi)$  Векторная комплексная ДН элемента в собственной системе координат.  $f_{\Sigma}(\theta)$  скалярный комплексный множитель направленности (МН) системы изотропных излучателей.

В случае двумерной эквидистантной антенной решетки множитель направленности можно представить, как суперпозицию направленностей каждого излучателя в данном направлении:

$$f_{\Sigma}(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^M \sum_{n=1}^N I_n \exp(jk(x_n \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + y_n \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi)), \quad (3)$$

где  $I_n = I_{0n} \exp(j\Phi_n)$  – комплексная амплитуда тока возбуждения n-го элемента. Будем считать, что токи во всех элементах одинаковы по амплитуде и различные по фазе.

В адаптивных антенна под воздействием управляющих сигналов процессора происходит перестройка электромагнитного поля в раскрыве. Способ реализации заключается в задании комплексных коэффициентов передачи

амплитуды и фазовые сдвиги отдельных каналов [7-9].

### 3. Программное моделирование антенной решетки

Для формирования нужной диаграммы направленности с главным максимумом в заданном направлении зададим матрицу весовых коэффициентов в линейке излучателей

$$s_1 = \exp \left\{ 2\pi i \cdot \frac{d}{\lambda} (N - 1) \cdot \sin \left( \varphi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right\}, \quad (4)$$

где  $N$  количество излучателей;  $\varphi$  – направление главного максимума излучения.

Данный подход имеет место реализации если на антенную систему не воздействуют внешние помехи. Зная направление на помехи  $s_2, \dots, s_n$  возможно создать провал в ДН антенн. Геометрический смысл метода заключается в выборе весовых коэффициентов таким образом, чтобы результирующий вектор  $w$  имел максимальную проекцию в направлении на полезный сигнал  $s_1$  и был ортогонален матрицам весовых коэффициентов помех. Поэтому результатом вычитания из исходного вектора  $s_1$  его коллинеарную составляющую даст искомым вектор  $w$ .

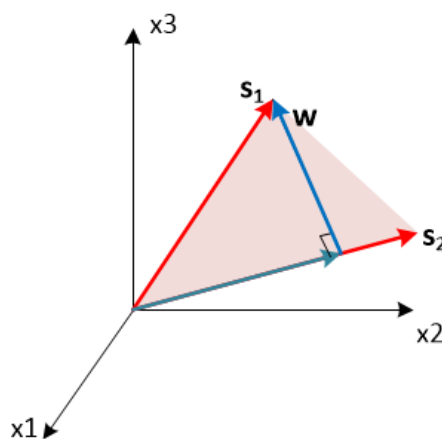


Рис. 2 - Векторное представление принятых сигналов и вектора весовых коэффициентов  $w$

С помощью скалярного произведения векторов спроецируем вектор  $s_1$  на

нормированный вектор  $\frac{s_2}{\sqrt{N}}$  и вычтем полученное произведение из исходного вектора  $s_1$

$$w = s_1 - \frac{s_2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{s_2^T s_1}{\sqrt{N}}. \quad (5)$$

Для моделирования работы цифровой антенной решетки воспользуемся программной системой «GNU Octave».

На рисунке 3 показан результат построения двумерной ДН в логарифмическом масштабе с максимумом в направлении  $\varphi=10^\circ, \theta=10^\circ$ .

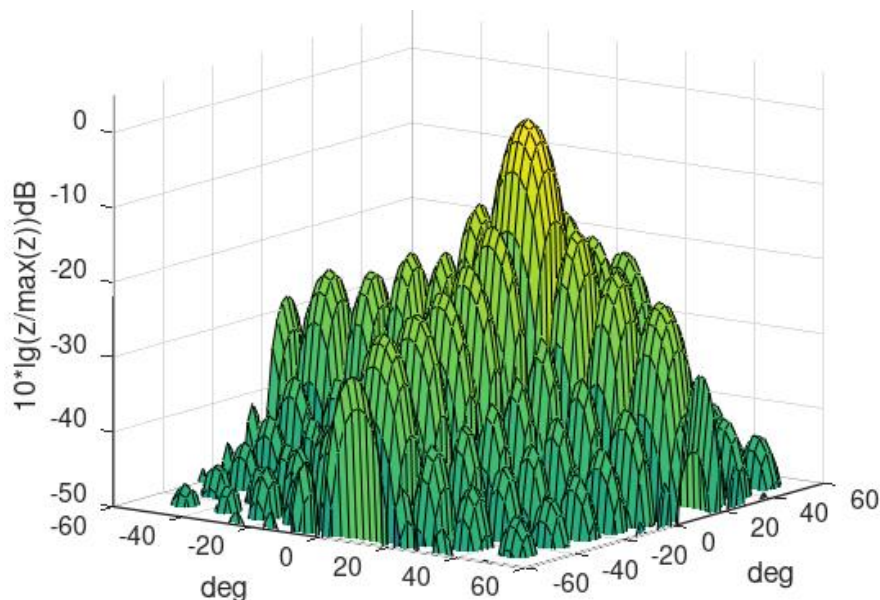


Рис. 3 - Результат построения двумерной ДН в логарифмическом масштабе с максимумом в направлении  $\varphi = 10^\circ, \theta = 10^\circ$

Для иллюстрации работы алгоритма построим одномерные ДН по углу места  $\theta = 10^\circ$  до применения алгоритма (рис. 4) и после в направлениях по углу азимута равного  $\varphi = -30^\circ, -25^\circ, 25^\circ$  (рис. 5).

В среднем в направлении группы из 3-х помех формируются провалы в ДН по уровню в среднем -50 дБ. Причем в некоторых случаях после подавления нежелательного излучения возможно увеличение уровня боковых лепестков

диаграммы. В рассмотренном случае уровень первого бокового лепестка остался на уровне -13,1 дБ.

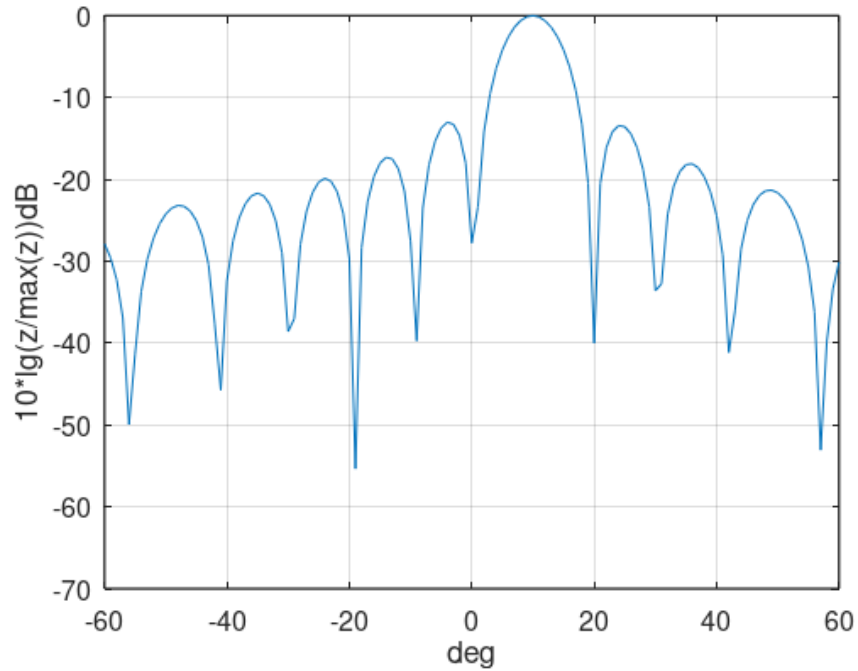


Рис. 4 - Одномерная ДН в логарифмическом масштабе по углу места  $\theta = 10^\circ$

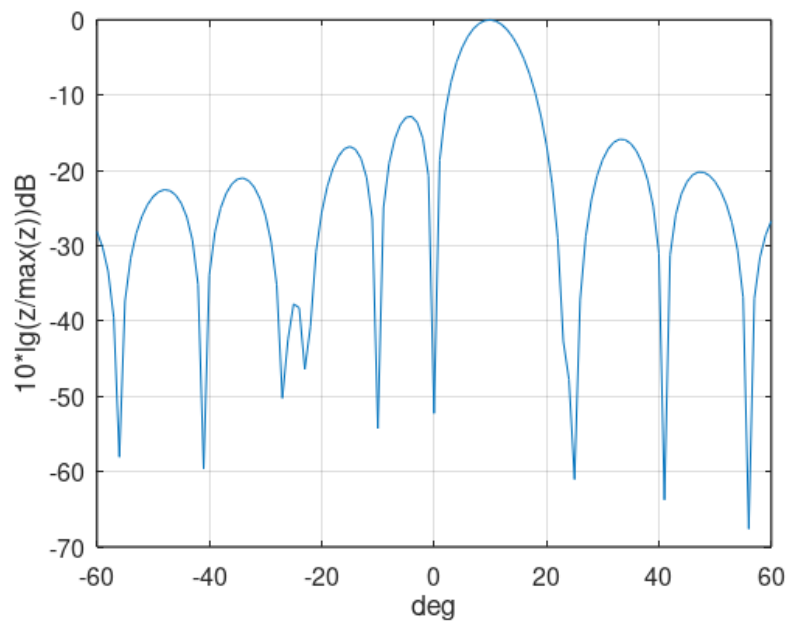


Рис. 5 - Одномерная ДН с подавлением помех по направлениям  $\varphi = -30^\circ, -25^\circ, 25^\circ$



### **Заключение**

Таким образом, формирование набора лучей в АР с независимыми апертурами позволяет оперативно их оптимизировать при помощи подстройки фазы отдельных излучателей. Антенны с электрическим управлением луча ДН в пространстве обеспечивают сканирование с скоростями на порядки выше, чем скорость поворота механически сканирующих антенн. Такие многолучевые антенны применяются для навигации и обеспечения безопасности транспорта, ориентируясь по нескольким навигационным спутникам. Преимуществом цифрового формирования ДН в процессоре антенны позволяет уменьшить влияние внешних помех на качество приема.

### **Конфликт интересов**

Не указан.

### **Conflict of Interest**

None declared.

### **Литература**

1. Петрова И.И., Лобов А.А., Малахов М.Ю., Лёгкий Н.М. Спутниковые радионавигационные технологии в системах мониторинга состояния автомобильных дорог общего пользования / Наука и техника транспорта. 2013. № 3. С. 021-025.
2. Легкий Н.М., Линьков В.И., Охинченко А.П. Использование спутниковых радионавигационных технологий для повышения безопасности движения поездов на скоростных и высокоскоростных магистралях / Научные технологии. 2010. Т. 11. № 8. С. 020-024.
3. Информационное обеспечение подвижных транспортных средств на основе интегрированных навигационных систем: Монография [Текст] / В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухопад и др. – Новосибирск: Наука, 2014. – 256 с.
4. Перов, А. И. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования [Текст] / А. И. Перов, В. Н. Харисов. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
5. Легкий Н.М., Баранников А.И. Повышение надежности определения навигационных координат транспортных средств / Наука и техника

## Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

транспорта. 2015. № 2. С. 46-50.

6. Марюхненко, В. С. Анализ применения фазированных антенных решеток для приема сигналов спутниковой радионавигационной системы в комплексе локомотивных устройств безопасности / В. С. Марюхненко, Е. С. Гармышева // Известия Транссиба. – 2017. – № 2(30). – С. 99-112.
7. Корбанский И. Н. Антенны - Москва: Энергия, 1973. 336 с.
8. A. Rodriguez, A. Vazquez, D. G. Lamar, M. M. Hernando and J. Sebastian, "different purpose design strategies and techniques to improve the performance of a dual active bridge with phase-shift control," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 30, No. 2, pp. 790-804.
9. Легкий Н.М., Михеев Н.В. Выбор расположения излучателей в неэквидистантной антенной решетке / Российский технологический журнал. 2020. Т. 8. № 6 (38). С. 54-62.

### References

1. Petrova I.I., Lobov A.A., Malakhov M.Yu., Legky N.M. Satellite radio navigation technologies in systems for monitoring the state of public roads / Science and technology of transport. 2013. No. 3. S. 021-025.
2. Legky N.M., Linkov V.I., Okhinchenko A.P. The use of satellite radio navigation technologies to improve the safety of train traffic on high-speed and high-speed lines / Science-intensive technologies. 2010. V. 11. No. 8. S. 020-024.
3. Information support of mobile vehicles based on integrated navigation systems: Monograph [Text] / V. S. Maryukhnenko, Yu. F. Mukhopad et al. - Novosibirsk: Nauka, 2014. - 256 p.
4. Perov, A. I. GLONASS. Principles of construction and functioning [Text] / A. I. Perov, V. N. Kharisov. – М.: Radio engineering, 2010. – 800 p.
5. Legky N.M., Barannikov A.I. Improving the reliability of determining the navigation coordinates of vehicles / Science and technology of transport. 2015. No. 2. S. 46-50.
6. Maryukhnenko, V.S., Garmysheva, E.S. Analysis of the use of phased antenna arrays for receiving satellite radio navigation system signals in the complex of

locomotive safety devices. Izvestiya Transsib. - 2017. - No. 2 (30). – S. 99-112.

7. Korbansky I. N. Antennas - Moscow: Energy, 1973. 336 p.
8. A. Rodriguez, A. Vazquez, D. G. Lamar, M. M. Hernando and J. Sebastian, "different purpose design strategies and techniques to improve the performance of a dual active bridge with phase-shift control," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 30, no. 2, pp. 790-804.
9. Legky N.M., Mikheev N.V. The choice of the location of emitters in a non-equidistant antenna array / Russian technological journal. 2020. V. 8. No. 6 (38). pp. 54-62.

© Легкий Н.М., Панов В.А., 2023 Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral" 3/2023

**Для цитирования:** Легкий Н.М., Панов В.А. АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕЁ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ // Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral" 3/2023.