

УДК 538.566.25

**В.Ю. Ермаков, В.Е. Унучков**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ В СИСТЕМЕ ПОЕЗДНОЙ РАДИОСВЯЗИ**

**Аннотация.** В статье рассмотрен выбор формы, размеров и числа элементов фазированной антенной решетки (ФАР), предназначенной для установки на подвижных объектах (локомотивах) в перспективных цифровых системах поездной радиосвязи. Путем моделирования определены основные параметры диаграммы направленности (ДН) такой антенной системы, её коэффициент направленного действия, ширина главного лепестка, уровень боковых и задних лепестков для 4, 5 и 6 элементов, расположенных на крыше подвижного объекта по кругу, радиусом около 0,8 м. Показано, что при пяти элементах достигается оптимальное соотношение между параметрами ДН во всех направлениях главного лепестка. Отмечается, что для уменьшения уровня боковых и задних лепестков ДН необходимо изменять амплитудное распределение в элементах ФАР в зависимости от направления главного лепестка.

**Ключевые слова:** фазированные антенные решетки, адаптивные антенны, диаграмма направленности, амплитудно-фазовое распределение, поездная радиосвязь, цифровые системы мобильной связи.

**V.Y. Ermakov, V.E. Unuchkov**

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*

## **DEFINITION CONFIGURATION OF THE PHASED ANTENNA ARRAY IN THE TRAIN RADIO COMMUNICATION**

**Abstract.** The article considers the choice of the shape, size, and the number of elements of a phased array antenna (PAA) intended for installation on mobile objects (locomotives) in advanced digital systems of train radio communication. By modeling the main parameters of the pattern such as antenna system, its directivity factor, the width of the main lobe, the level of side and back lobes 4, 5, and 6 items located on the roof of the mobile object in a circle with a radius of about 0.8 m. It is shown that with five elements, the optimal ratio between the parameters of the pattern in all directions of the main lobe is achieved. It is noted that to reduce the level of the side and rear lobes of the bottom, it is necessary to change the amplitude distribution in the PAA elements depending on the direction of the main lobe.

**Keywords:** Phased array antennas, adaptive antennas, directional pattern, amplitude-phase distribution, train radio communication, digital mobile communication systems.

### **Введение**

Система поездной радиосвязи (ПРС) является важным элементом обеспечения безопасности движения поездов, для организации и контроля перевозок и маневровых работ [1,2]. В настоящее время ПРС организуется, в основном, в диапазоне метровых волн с применением аналоговых устройств, также ведутся работы по внедрению цифровых стандартов DMR [3] и GSM-R [1]. Для всех этих систем уровень сигнала в месте приема сильно зависит от рельефа местности, наличия зданий, искусственных сооружений и других препятствий и на перегонах большой протяженности на некоторых участках появляются так называемые «мёртвые зоны», т.е. зоны где уровень сигнала падает ниже минимально допустимого значения. Поэтому всегда остаётся актуальной задача расширения зон покрытия и увеличения уровня сигнала [4].

Самым эффективным способом расширения зон покрытия является применение направленных антенн. Стационарные направленные в горизонтальной плоскости антенны типа волновой канал обеспечивают коэффициент усиления  $K_u$  не более 5-8 децибел по сравнению с изотропным излучателем (дБи). Дальнейшее повышение коэффициента усиления ограничено сужением ширины главного лепестка и выходом подвижного объекта за его пределы при движении по криволинейным участкам [5]. Локомотивные антенны

обычно выполняются ненаправленными в горизонтальной плоскости и имеют  $K_y$  около 0 дБи. Применение антенной системы из двух стандартных локомотивных антенн позволяет получить двунаправленную диаграмму в виде восьмёрки и дополнительное усиление около 4 дБ [6], но имеет недостаток из-за невозможности связи во всех направлениях. Увеличить энергетику и улучшить качественные показатели ПРС можно за счет использования узконаправленных локомотивных антенн с изменяемым направлением излучения (приёма). Такими свойствами обладают фазированные антенные решетки (ФАР) с электронным изменением направления главного лепестка диаграммы направленности (ДН) [7].

### Выбор конфигурации ФАР

ФАР – это антенная система, состоящая из  $n$  одинаковых элементов, расположенных в определенных точках пространства, амплитудно-фазовое распределение тока в которых можно изменять для управления параметрами ДН [8-11]. Из-за ограничений по высоте на крыше локомотива используем плоскую ФАР, состоящую из одинаковых стандартных антенн АЛ1/160 с круговой ДН. С учетом возможности изменения направления главного лепестка ДН в пределах от 0 до 360 градусов по азимуту, выберем кольцевую ФАР [8] с равномерным расположением элементов по окружности, диаметром, ограниченными размерами локомотива. Предполагается, что управление главным лепестком и другими параметрами ДН ФАР будет происходить при изменении амплитуд и фаз токов в элементах ФАР под действием управляющих сигналов от решающего устройства, которое определяет текущее направление на источник сигнала.

Определим число  $n$  элементов ФАР исходя из следующих соображений. Если располагать излучатели на расстоянии большем, чем половина длины волны  $\lambda$ , тогда кроме основного появятся побочные боковые лепестки ДН. Если наоборот, расстояние между элементами будет меньше  $\lambda/2$ , будет происходить уширение главного лепестка и уменьшение боковых лепестков. Исходя из этого, выберем оптимальное расстояние между соседними элементами, равное  $\lambda/2$ . От числа элементов ФАР зависит максимально возможный коэффициент её усиления, а при выбранном расстоянии между элементами и её горизонтальные размеры. Простые оценки показывают, что в этом случае реально возможное число элементов кольцевой ФАР может быть не более шести. При этом расстояние между наиболее удаленными элементами не превышает 1,7 м, что при ширине локомотива 2 м позволяет обеспечить практически одинаковые условия для размещения всех элементов ФАР.

### Моделирование работы ФАР

В общем случае диаграмма направленности  $f_N$  ФАР, это множитель антенной решетки  $f_c$ , умноженный на диаграмму направленности одиночной антенны  $F_0$ , при условии, что все излучатели одинаковые [8,9]:

$$f_N(\theta, \beta) = F_0(\theta, \beta) \cdot f_c(\theta, \beta), \quad (1)$$

где  $\theta$  - угол, на который повернут максимум главного лепестка ДН относительно заданного направления в плоскости Земли (азимут), а  $\beta$  - вертикальный угол относительно горизонтальной плоскости (угол места).

Нас интересует угол  $\theta$ , который при используемых элементах определяется только множителем антенной решетки.

$$f_N(\theta) = f_c(\theta) \quad (2)$$

Вычисление суммы амплитуд полей отдельных элементов ФАР с учётом фаз и амплитуд токов, протекающих в них, в дальней зоне выполняется по следующей формуле:

$$f_c(\theta, \beta) = \sqrt{(\operatorname{Re}(\sum_{i=1}^n I_i \cdot \exp(j \cdot (\cos(\beta) \cdot k \cdot AC_i(\theta) - \varphi_i)))^2 + (\operatorname{Im}(\sum_{i=1}^n I_i \cdot \exp(j \cdot (\cos(\beta) \cdot k \cdot AC_i(\theta) - \varphi_i))))^2} \quad (3)$$

где  $i$  – номер элемента антенной решетки;  $I_i$  и  $\varphi_i$  – коэффициент тока и фаза  $i$ -го элемента соответственно;  $k$  – волновое число;  $j$  – мнимая единица;  $AC_i$  - расстояния между  $i$ -ым

элементом и источником, которые, зная координаты точек и угол  $\theta$  легко вычислить векторным способом.

Найдем значения фаз и токов элементов ФАР для формирования максимума ДН в заданном направлении. Для этого построим функцию  $F_{MAX}$ , определяющую значение коэффициента усиления ФАР в максимуме её ДН:

$$F_{MAX} = (\theta, \beta, \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n, I_0, I_1, \dots, I_n). \quad (4)$$

Для оценки коэффициента усиления ФАР относительно одного элемента введем условие нормировки. Так как мощность передатчика постоянная, следовательно, сумма квадратов токов по всем элементам ФАР должна быть равна квадрату тока одиночной антенны. Здесь использовано приближение об отсутствии взаимного влияния элементов друг на друга.

После нахождения максимума функции  $F_{MAX}$  при выполнении условия нормировки и заданных углах  $\theta$  и  $\beta$  мы получаем значения фаз и токов, которые определяют максимум излучения в заданном направлении. Значение ДН в максимуме дает коэффициент усиления ФАР.

Моделирование работы ФАР из 4, 5 и 6 элементов выполнялось с помощью программы Mathcad по формулам (1-4). Расстояние между элементами было 0.98 м, что соответствует половине средней длины волны ПРС метрового диапазона. На рис. 1-3 изображены ДН при углах  $\theta = 0^\circ, 36^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  относительно оси x. Ясно, что для четырехэлементной ФАР ДН будут подобными через  $90^\circ$ , для пятиэлементной – через  $72^\circ$ , а для шестиэлементной – через  $60^\circ$ . Точками показаны расположения элементов решетки.

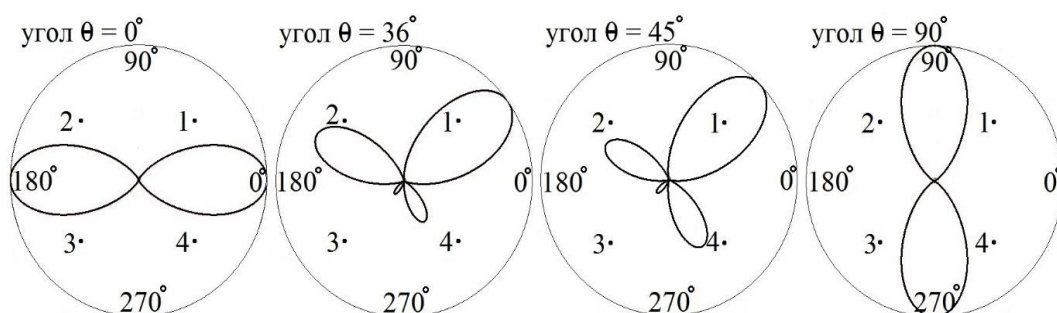


Рис. 1. Диаграмма направленности ФАР с четырьмя элементами

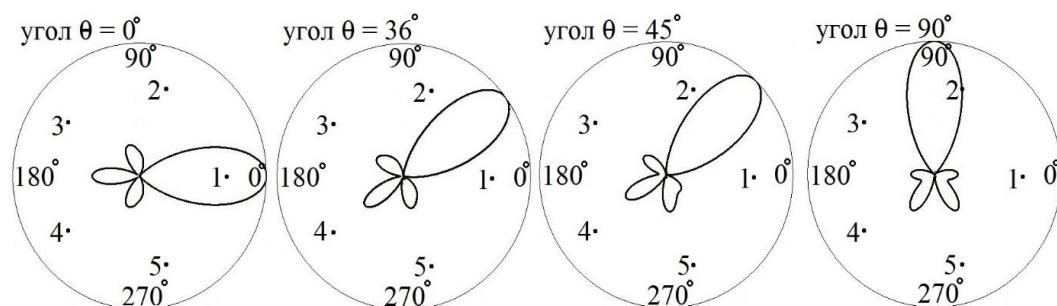


Рис. 2. Диаграмма направленности ФАР с пятью элементами

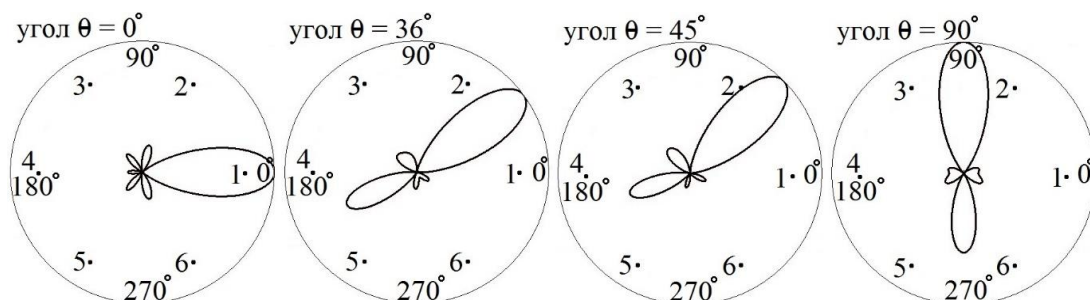


Рис. 3. Диаграммы направленности ФАР с шестью элементами

Сравним результаты моделирования.

ФАР с четырьмя элементами имеет недостатки линейной антенной решетки, в которой неизбежно появляется побочный лепесток, в некоторых направлениях равный главному, который невозможно подавить, используя фазовое и амплитудное распределение токов.  $K_U$  в этом случае доходит до 6 дБ относительно одиночной антенны, но как видно такая ФАР будет принимать помехи с других направлений, что ухудшит работу ПРС.

Для ФАР с пятью элементами  $K_U$  равен 7 дБ, при этом побочные лепестки имеют уровень не выше -10 дБ от главного. Также видно, что при сканировании во всем секторе углов форма ДН изменяется мало. Расстояние между наиболее удаленными элементами в такой системе составляет примерно 1,5 м, а это важно для размещения ФАР на крыше подвижного объекта.

ФАР с шестью элементами имеет  $K_U$  в максимуме 7.8 дБ, но для некоторых направлений сильный задний лепесток, который доходит до уровня -2 дБ от главного. Кроме того, такая система имеет разнос наиболее удаленных элементов 1.7 м и такую ФАР труднее разместить на локомотиве.

Таким образом, сравнивая результаты моделирования работы ФАР с 4, 5 и 6 элементами при ограничении площади её размещения, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным числом элементов кольцевой ФАР в данном случае является  $n=5$ . Четырехэлементная ФАР имеет плохую форму ДН и высокий уровень побочных лепестков, хотя и может быть более компактной. Шестиэлементная ФАР по сравнению с пятиэлементной даёт всего на 0,8 дБ более высокий  $K_U$ , но обладает более низкой помехозащищенностью из-за сильного заднего лепестка и требует большей площади для размещения.

#### Амплитудное распределение ФАР

Результаты предыдущего моделирования были использованы для достижения наибольшего значения  $K_U$ . При этом были получены одинаковые амплитуды токов во всех элементах. Поэтому в выражении (4) можно разделить переменные: фазы использовать для определения параметров главного максимума, а амплитуды - для уменьшения побочных лепестков ДН. Таким образом, при найденных для заданного направления ДН фаз токов всех элементов можно определить их амплитуды с целью уменьшения уровня наиболее сильных боковых лепестков. Это необходимо для увеличения помехозащищенности ПРС. Результат моделирования для  $n=5$  представлен на рис. 4, а необходимое изменение тока первого элемента (расположенного по направлению  $\theta=0$  из центра ФАР) показано на рис. 5. Данное распределение было получено с помощью программы Mathcad. Амплитудное распределение других элементов выглядит аналогичным образом, но будет смещено в зависимости от номера элемента на  $i72^\circ$  по  $\theta$ .

Сравнение результатов моделирования представленных на рис. 2 и 4 позволяет заключить следующее. При использовании амплитудного распределения токов в элементах ФАР удалось добиться уменьшения уровня боковых лепестков ДН более чем на 24% по мощности. При этом произошло незначительное расширение главного лепестка на 3% и уменьшение  $K_U$  менее чем на 0,1 дБ до значения 6.91 дБ.

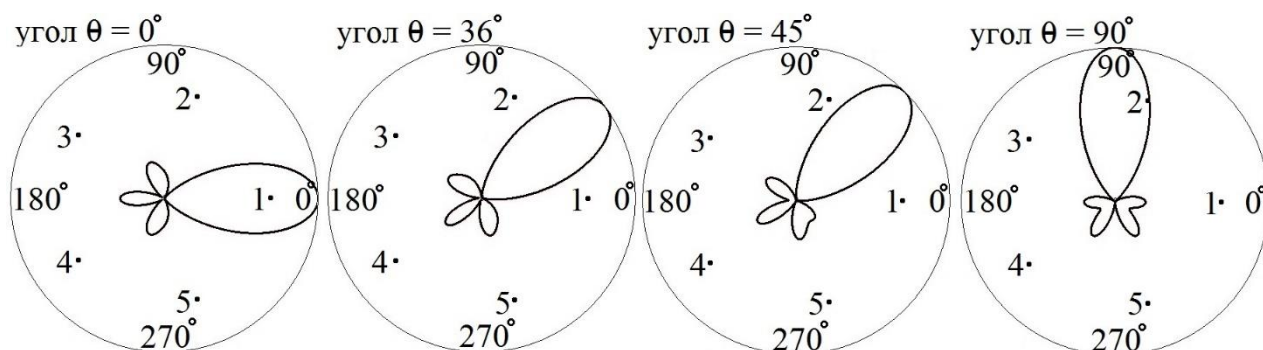


Рис. 4. Диаграмма направленности пятиэлементной ФАР с амплитудным распределением



Рис. 5. Амплитудное распределение тока первого элемента

### Заключение

Проведенное исследование позволяет выбрать наиболее оптимальную конфигурацию ФАР для мобильных устройств в системах ПРС метрового диапазона. Модерирование работы кольцевых ФАР с числом элементов 4-6 позволяет сделать выбор в пользу пятиэлементной кольцевой ФАР, состоящей из стандартных локомотивных антенн АЛ1/160, которую, можно разместить на крыше локомотива. Такая антенная система позволяет на 7 дБ поднять энергетику канала ПРС и увеличить дальность связи. Для уменьшения влияния боковых лепестков и увеличения помехоустойчивости ПРС предлагается изменять распределение токов в элементах ФАР. Показано, что это позволяет уменьшить уровень боковых лепестков на 1,19 дБ, при этом  $K_{\gamma}$  падает незначительно, до 6,91 дБ. Управление главным лепестком диаграммы направленности ФАР путём изменения амплитуд и фаз токов в элементах ФАР должно происходить под действием управляющих сигналов от вычислительного устройства, которое определяет текущее направление на источник сигнала, используя известные координаты источника и приёмника.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Унучков В.Е. Перспективы развития систем связи с подвижными объектами железнодорожного транспорта. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Материалы второй международной научно-практической конференции. Том 1. – Иркутск: ИрГУПС. 2011 г., С. 171-176.
2. Правила организации и расчета сетей поездной радиосвязи ОАО «РЖД». - М., «ТРАНСИЗДАТ», 2014 г. – 112 с.
3. Слюняев А.Н. Система цифровой технологической радиосвязи стандарта DMR / Слюняев А.Н., Вериго А.М., Ананьев Д.В. // АСИ. 2014. – № 1. С. 10-14.
4. Унучков В.Е. К выбору высот расположения антенн базовых станций в системах поездной радиосвязи. / Унучков В.Е., Шигаев Р.Е. // Информационные системы контроля и управления на транспорте. Вып. 11. - Иркутск, ИрГУПС. 2004. - С. 153-159.
5. Унучков В.Е., Оптимизация систем поездной радиосвязи с применением метода параметрического синтеза. / Унучков В.Е., Шигаев Р.Е. // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. Вып. 12. – Иркутск: ИрГУПС, 2005, С. 102 – 108.
6. Унучков В.Е. Модернизация локомотивных антенн метрового диапазона с целью расширения зон поездной радиосвязи. / Унучков В.Е., Хамидуллина А.Г. // Транспортная инфраструктура сибирского региона. Материалы восьмой международной конференции. Т.1. – Иркутск: ИрГУПС. 2017 г. С. 371-374.
7. Бойко М.А. Повышение качества поездной радиосвязи на основе адаптивных антенн в метровом диапазоне волн: Дис. канд. техн. наук.: 05.12.13. -М.: РГБ, 2006. - 180 с.
8. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
9. Adaptive Antenna Arrays. Trends and Applications / Editor Sathish Chandran. - Springer-Verlag Berlin Heidelberg, DOI 10.1007/978-3-662-05592-2. 2004. – 660 p.

10. Антенны и устройства СВЧ (проектирование фазированных антенных решеток): Учебное пособие для вузов. Воскресенский Д.И., Грановская Р.А., Давыдова Н.С. и др. / Под ред. Воскресенского Д.И. –М.: Радио и связь, 1981. – 432 с.

11. Сканирующие антенные системы СВЧ, т. III, Хансен Р.С., перевод с английского, под редакцией Маркова Г.Т. и Чаплина А.Ф., Изд-во «Советское радио», 1971. – 464 с.

## REFERENCES

1. Unuchkov V.E. Prospects for the development of communication systems with mobile objects of railway transport. // Transport infrastructure of the Siberian region. Materials of the second international scientific-practical conference. Vol. 1. - Irkutsk: IrGUPS. 2011, pp. 171-176.

2. Rules for the organization and calculation of train radio communication networks of Russian Railways. - М., «TRANSIZDAT», 2014 - 112 p.

3. Slyunyaev A.N. Digital technological radio communication system of the DMR standard / A. Slyunyaev, A. Verigo, D. Ananyev // Automation, communication, computer science. 2014. - No. 1. pp. 10-14.

4. Unuchkov V.E. To the choice of heights of the location of the antennas of base stations in train radio communication systems. / Unuchkov V.E., Shigaev R.E. // Information systems of control and management in transport. Vol. 11. - Irkutsk, IrGUPS. 2004. - pp. 153-159.

5. Unuchkov V.E., Optimization of train radio communication systems using the parametric synthesis method. / Unuchkov V.E., Shigaev R.E. // Information systems of control and management in industry and transport. Vol. 12. - Irkutsk: IrGUPS, 2005, p. 102 - 108.

6. Unuchkov V.E. Modernization of locomotive antennas of a meter band in order to expand the areas of train radio communications. / Unuchkov V.E., Khamidullina A.G. // Transport infrastructure of the Siberian region. Materials of the eighth international conference. Vol. 1. - Irkutsk: IrGUPS. 2017, pp. 371-374.

7. Boyko M.A. Improving the quality of train radio communications based on adaptive antennas in the meter wavelength range: Dis. Cand. Tech. Sciences: 05.12.13.-М. : RSL, 2006. - 180 p.

8. Monzingo R.A., Miller T.U. Adaptive Antenna Arrays: Introduction to Theory: Per. from English - М.: Radio and Communications, 1986. - 448 p.

9. Adaptive Antenna Arrays. Trends and Applications / Editor Sathish Chandran. - Springer-Verlag Berlin Heidelberg, DOI 10.1007 / 978-3-662-05592-2. 2004. -- 660 p.

10. Antennas and microwave devices (design of phased antenna arrays): Textbook for universities. Voskresensky D.I., Granovskaya R.A., Davydova N.S. et al. / Ed. Voskresensky D.I. – М.: Radio and communications, 1981. - 432 p.

11. Scanning microwave antenna systems, vol. III, Hansen RS, translation from English, edited by Markov G.T. and Chaplin A.F., Sovetskoe Radio Publishing House, 1971. - 464 p.

### **Информация об авторах**

*Ермаков Владислав Юрьевич* – студент группы СОД.4-16-1, факультет «Системы обеспечения транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ermakvlad1986@mail.ru

*Унучков Владимир Евгеньевич* – доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь», канд. физ. – мат. наук Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: vlad.unuchkov@yandex.ru;

### **Authors**

Ermakov Vladislav Yurievich - student of the group SOD.4-16-1, Department of Transport support systems, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ermakvlad1986@mail.ru.

Unuchkov Vladimir Evgenievich – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor sub department of Automation, Remote Control and Communication. Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: vlad.unuchkov@yandex.ru.

### **Для цитирования**

Ермаков В.Ю. Определение конфигурации фазированной антенной решетки в системе поездной радиосвязи [Электронный ресурс] / В.Ю. Ермаков, В.Е. Унучков // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2020. – №3(9). – Режим доступа: – <http://mnv.irgups.ru/toma/39-20>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 10.07.2020).

### **For citation**

Ermakov V.Y., Unuchkov V.E. Definition configuration of the phased antenna array in the train radio communication [Definition configuration of the phased antenna array in the train radio communication]. *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2020, no. 3(9). [Accessed 10/07/20].