

## Свойства и технические приложения антенных решеток, сфокусированных по широкополосному сигналу

Д.А. Веденькин , Ю.Е. Седельников

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ  
420111, Россия, г. Казань,  
ул. К. Маркса, 10

**Аннотация – Обоснование.** В настоящее время активно исследуются антенные решетки, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля. Известны основные свойства и характеристики сфокусированных антенных систем, использующих узкополосные сигналы. Расширить технические возможности устройств, использующих сфокусированные электромагнитные поля, возможно за счет применения широкополосных сигналов. Настоящая статья посвящена описанию свойств и ряда технических приложений антенных решеток, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля по широкополосному сигналу. **Цель** настоящей статьи заключается в описании основных свойств сфокусированных широкополосных электромагнитных полей и выработке на их основе вариантов практического применения. **Методы.** Достижение цели статьи обусловлено использованием известных принципов электродинамики и апертурной теории антенн. **Результаты.** Показаны особенности формирования сфокусированных широкополосных электромагнитных полей и приведены их основные свойства. Предложены варианты технического применения сфокусированных широкополосных антенных решеток. **Заключение.** Полученные результаты подтверждают важность оценки свойств широкополосных сфокусированных антенн и выработке на их основе ряда технических предложений.

**Ключевые слова** – фокусировка электромагнитного поля; широкополосный сигнал; сфокусированная антенная решетка; технические приложения; свойство сфокусированных полей.

### Введение

В настоящее время развитие новых систем радиосвязи, микроволновых технологий и устройств технической диагностики связано с применением сфокусированного электромагнитного излучения (ЭМИ). Подавляющее большинство современных радиотехнических систем используют волновые поля дальней зоны, хотя для ряда технических приложений необходимо учитывать возможность функционирования радиотехнических средств в зоне ближнего излученного поля с использованием возможности реализации трехмерной фокусировки электромагнитного поля. Формирование пространственно распределенных, объемных сфокусированных электромагнитных полей, а также управление их параметрами открывает новые возможности в задачах радиотехники, неразрушающего электромагнитного контроля и микроволновых технологий.

Впервые идея фокусировки электромагнитного поля была предложена в первой половине XX века в работах [1–2]. В дальнейшем свойства сфокусированных антенн анализируются рядом авторов [3–4] и др. Исследования в этом направлении ведутся параллельно с изучением свойств электромагнитных полей в дальней зоне, однако, в отличие от последних, апертурная теория антенн в

зоне ближнего излученного поля в этот период не была создана в законченном виде.

Начиная с начала XXI века пробуждается интерес к антеннам, формирующим электромагнитные поля в зоне ближнего излученного поля. Проводится значительное число исследований, посвященных различным аспектам теории и практики сфокусированных антенн. Эти результаты становятся востребованными в таких развивающихся областях, как неразрушающий контроль, микроволновые технологии, медицинские приложения, системы радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Исследования, выполненные в последние два десятилетия, фактически создали основу апертурной теории антенн в зоне ближнего излученного поля и представлены в обобщенном виде в монографии [5].

В это же время в радиолокации развивается новое направление, в основу которого положено использование сигналов с широким спектром при относительно высокой средней частоте. Его логическим развитием стало использование сверхширокополосных сигналов, перенесенных на несущую частоту оптического диапазона. В этих случаях относительная ширина спектра излучаемого сигнала  $\Delta f / f_0$  значительно меньше единицы, и поэтому не специфических требований к

антенным устройствам не возникает. Более того, в этих случаях основные показатели направленности, как правило, могут без существенной утраты точности рассматриваться для монохроматического сигнала.

Другим направлением в радиолокации и ряде смежных задач явилось использование излучения и приема сигналов с широким спектром в относительно низкочастотной части диапазона радиочастот, когда  $f_{\text{верхн}} / f_{\text{нижн}} \gg 1$ . Данное направление получило название сверхширокополосной радиотехники и также активно развивается в настоящее время. Поэтому возникает естественный интерес к рассмотрению задач фокусировки широкополосного электромагнитного поля, обещающей новые возможности для диагностической локализации электромагнитных полей, повышения потенциала радиосвязи, микроволновых технологий и неразрушающего радиоволнового контроля. Эти обстоятельства ставят в число актуальных детальные исследования свойств электромагнитных полей, сфокусированных по широкополосному сигналу, и выработку на их основе новых технических решений для ряда прикладных задач.

### 1. Свойства электромагнитных полей, сфокусированных по широкополосному сигналу

Основные свойства электромагнитных полей, сфокусированных по монохроматическому сигналу, к настоящему времени изучены достаточно подробно. Введены или уточнены характеристики и параметры сфокусированных полей (КНД, размеры сфокусированной области, уровни боковых лепестков), и установлена их зависимость от характера апертурного распределения и положения точки фокусировки [5]. Выявлены новые свойства электромагнитных полей, и предложено их использование для повышения точностных показателей в диагностических задачах [6–7].

При переходе к использованию фокусировки по широкополосному сигналу аналогично случаям полей дальней зоны становится невозможным рассмотрение их в отрыве не только от спектра сигнала, но и от способа использования сфокусированного электромагнитного поля. Это обстоятельство порождает неоднозначность категорий диаграммы направленности и ее параметров, в том числе определяемых в режиме приема или передачи (например, [5]). Эти особенности, безусловно,

присущи и электромагнитным полям, сфокусированным в зоне ближнего излученного поля по широкополосному сигналу [8].

В режиме приема результат фильтрации излученного поля, «принимаемого» в точке  $(x, y, z)$  с частотной характеристикой  $K_{\text{пр}}(f)$ , пространственное распределение сфокусированного поля рассматриваются как

$$\left| E_{\text{СШП}}^{\text{ПРМ}}(x, y, z) \right|^2 = \quad (1)$$

$$\left| \int_{f_0 - \Delta f}^{f_0 + \Delta f} \dot{E}(x, y, z, f) G(f) K_{\text{пр}}(f) df \right|^2$$

и оказываются различными для разных способов приема, отличающихся выбором функции  $K_{\text{пр}}(f)$ .

В режиме передачи вид характеристики сфокусированного электромагнитного поля также существенно зависит от способа «использования» энергии указанного поля, т. е. от функции, выполняемой с использованием сфокусированного электромагнитного поля. В задачах типа СВЧ-нагрева характеристика определяется эффектом поглощения электромагнитной энергии в точке  $(x, y, z)$  при излучении поля со спектром  $G(f)$ :

$$\left| E_{\text{СШП}}^{\text{ПРДэн}}(x, y, z) \right|^2 = \left| \int_{f_0 - \Delta f}^{f_0 + \Delta f} \dot{E}(x, y, z, f) G(f) df \right|^2. \quad (2)$$

В общем случае характеристикой в режиме передачи может рассматриваться результат «приема» электромагнитного поля устройством с действующей высотой приемной антенны  $h_{\text{нрм}}(f)$  и частотной характеристикой  $K_{\text{нрм}}(f)$ :

$$\left| E_{\text{СШП}}^{\text{ПРД}}(x, y, z) \right|^2 = \quad (3)$$

$$= \left| \int_{f_0 - \Delta f}^{f_0 + \Delta f} \dot{E}(x, y, z, f) h_{\text{нрм}}(f) G(f) K_{\text{нрм}}(f) df \right|^2.$$

Коэффициент направленного действия – интегральный показатель антенн, сфокусированных по широкополосному сигналу, вводится аналогично случаю фокусировки монохроматического излучения как отношение значений характеристик  $E_{\text{СШП}}(x_0, y_0, z_0)$  к соответствующему значению для излучения ненаправленного источника совпадающего спектрального состава, расположенного в точке апертуры, ближайшей к точке наблюдения. В точке фокуса  $(x_0, y_0, z_0)$

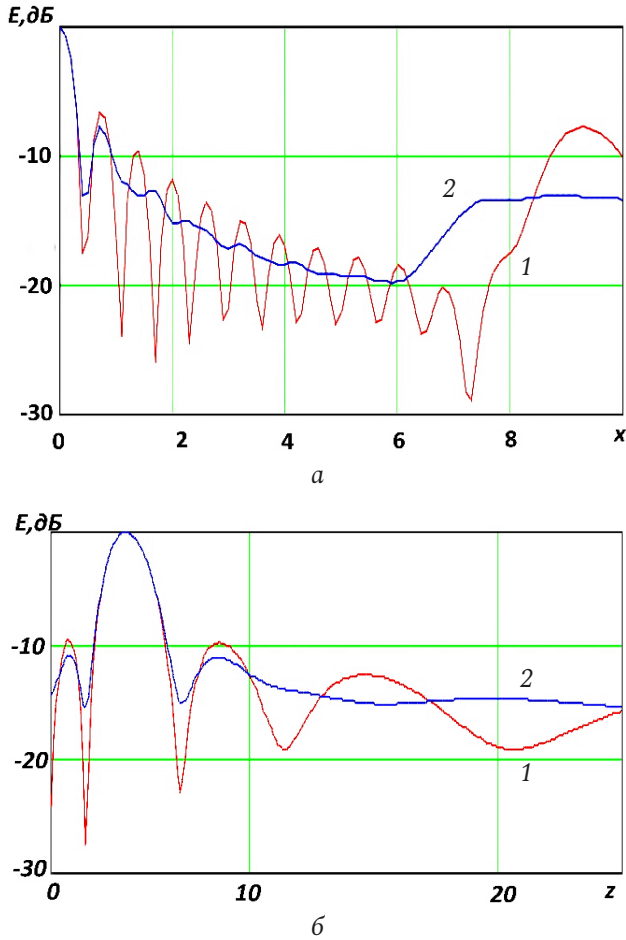


Рис. 1. Зависимость интенсивности сфокусированного поля линейной сфокусированной антенны: а – параллельно апертуре; б – перпендикулярно апертуре. Красная линия (1) – монохроматический сигнал, синяя линия (2) – равномерный спектр в полосе  $\pm 25\%$

Fig. 1. Dependence of the intensity of the focused field of a linear focused antenna: a – parallel to the aperture; b – perpendicular to the aperture. The red line (1) is a monochromatic signal, the blue line (2) is a uniform spectrum within a band of  $\pm 25\%$

$$КНД_{СШП}(x_0, y_0, z_0) = \frac{|E_{СШП}(x_0, y_0, z_0)|^2}{|E_{СШП}^{ненар}(x_0, y_0, z_0)|^2}. \quad (4)$$

В рамках этих представлений высвечивается факт несовпадения в общем случае характеристик сфокусированных полей в режимах приема и передачи. Этот факт не входит в противоречие с принципом взаимности, а отражает различие в способе использования энергии электромагнитного поля в сфокусированной области.

Проведены оценки основных параметров сфокусированного поля в допущении того, что апертурное распределение  $J(x, y, z)$  не зависит от частоты, а фазовое распределение обеспечивает фокусировку в заданную точку пространства для всех частот спектра  $G(f)$ . Установлено, что для случаев спектра, симметричного относительно

центральной частоты  $f_0$ , размеры области фокусировки в случаях широкополосного и узкополосного  $(\Delta f / f_0) \ll 1$  сигналов практически совпадают (рис. 1). В случае асимметрии спектра происходит некоторое изменение размера соответственно преобладанию в спектре высокочастотных или низкочастотных составляющих. Уровень боковых лепестков, как ближних, так и дальних (при шаге решетки больше половины длины волны на центральной частоте), сохраняет общий характер в случае монохроматических колебаний при некоторой тенденции к снижению.

## 2. Электромагнитные поля, формируемые антенными решетками, сфокусированными по широкополосному сигналу

При переходе к использованию антенных решеток в задачах фокусировки по широкополосному сигналу аналогично случаям полей дальней зоны становится невозможным рассмотрение их в отрыве не только от спектра сигнала и способа использования сфокусированного электромагнитного поля, но и от частотных свойств системы излучателей и диаграммообразующей схемы. Это обстоятельство связано с тем, что пространственно-частотное распределение электромагнитного поля  $E(x, y, z, f)$  возбуждается совокупностью источников с апертурным распределением  $J(x, y, z, f)$ , частотная зависимость которого не может иметь произвольный характер, а существенным образом зависит от частотных характеристик элементов матриц рассеяния системы излучателей  $[S_A(f)]$  и диаграммообразующей схемы  $[S(f)]$ .

Для описания антенных решеток целесообразно использование матричной модели с поэлементным учетом эффектов взаимной связи излучателей. Согласно матричной модели, распределение напряженности электрического поля, создаваемого системой излучателей в зоне ближнего излученного поля, определяется матрицей рассеяния системы входов  $[S_A(f)]$ , парциальными распределениями полей, соответствующих элементу решетки с диаграммой направленности  $e_i(x, y, z, f)$  при возбуждении их входов единичной падающей волной и при наличии согласованных нагрузок, подключенных к остальным входам, и матрицей рассеяния распределительного устройства  $[S(f)]$ :

$$[S(f)] = \begin{bmatrix} S_{11}^G(f) & S_{12}^G(f) \\ S_{21}^G(f) & S_{22}^G(f) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

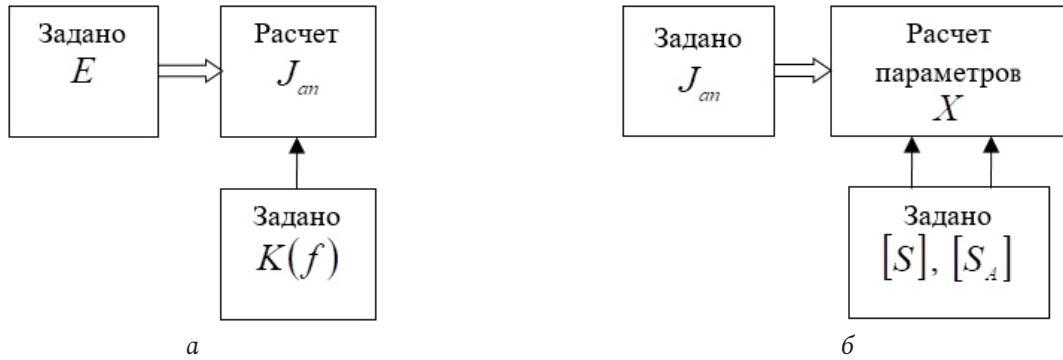


Рис. 2. Синтез параметров антенн для случая монохроматического сигнала. Этап 1. Синтез апертурного распределения (а), Этап 2. Расчет параметров антенны (б)  
 Fig. 2. Synthesis of antenna parameters for the case of a monochromatic signal. Stage 1. Synthesis of aperture distribution (a), Stage 2. Calculation of antenna parameters (b)

где блочные матрицы  $S_{11}^{\delta}(f)$ ,  $S_{21}^{\delta}(f)$  и  $S_{22}^{\delta}(f)$  – входной коэффициент отражения распределительного устройства, коэффициенты передачи от входа к выходам и коэффициенты передачи между выходами соответственно,  $S_{21}^{\delta}(f) = S_{12}^{\delta T}(f)$ .

Для частотных составляющих сфокусированного поля пространственное распределение источников представляется как

$$E(x, y, z, f) = \langle e(x, y, z, f) | U_{над}(f) \rangle, \quad (6)$$

где  $|U_{над}(f)\rangle$  – вектор-столбец комплексных амплитуд падающих волн на входах излучателей, значения которого определяются свойствами излучателей и распределительного устройства:

$$|U_{над}(f)\rangle = \frac{S_{21}^{\delta}(f)}{E - [S_{22}^{\delta}(f)][S_A(f)]}. \quad (7)$$

Соотношения (6) и (7) позволяют с точностью, достаточной для большинства практических задач, определить напряженность электрического поля при возбуждении входа распределительного устройства падающей волной единичной амплитуды с частотой  $f$ . Подчеркнем, соотношения (6) и (7) высвечивают принципиальное свойство антенн в составе сверхширокополосных радиосредств: пространственные распределения полей, создаваемых в режиме передачи, и соответствующие им показатели в режиме приема существенно зависят от частотных зависимостей матрицы рассеяния распределительного устройства и не могут быть определены в отрыве от свойств излучателей и фидерных устройств в составе антенной решетки.

При фокусировке по монохроматическому сигналу, как и в случае дальней зоны, синтез параметров антенной системы может разбиваться на два этапа, соответствующих «внешней» и «внутренней» задачам (рис. 2).

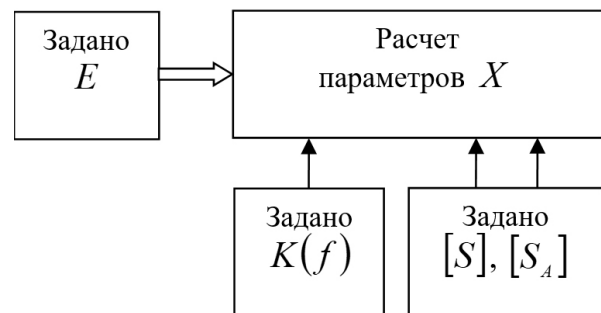


Рис. 3. Конструктивный синтез параметров антенны для случая широкополосного немонохроматического сигнала  
 Fig. 3. Constructive synthesis of antenna parameters for the case of a broadband non-monochromatic signal

На первом этапе определяется апертурное распределение для задаваемой геометрии решетки. На втором этапе – параметры диаграммообразующей схемы при заданных параметрах излучателей и ее типе.

Для фокусировки по широкополосному сигналу такое разделение невозможно, и необходимо использовать полную модель антенны, включающую решетку излучателей и диаграммообразующую схему (рис. 3).

Фактически это означает безальтернативную необходимость применения в задачах анализа и проектирования принципов конструктивного синтеза антенн. При практической реализации могут использоваться приемы, предложенные в работе [9] для случая дальней зоны.

### 3. Технические приложения широкополосных сфокусированных антенных решеток

В заключение рассмотрим вопросы практического применения принципа широкополосных сфокусированных антенных систем в ряде технических приложений. Так, свойства сфокусирован-

ных электромагнитных полей открывают возможность повышения технических показателей в ряде приложений:

- организацию связи с удаленным БПЛА;
- постановку прицельных по пространственным координатам помех наземным пунктам управления;
- формирование ложной авиационной цели с имитацией отраженного сигнала РЛС;
- диагностику антенн на этапах производства и испытаний;
- обработку загрязненной почвы электромагнитным полем;
- пеленгацию с использованием суммарно-разностной обработки для поперечного и продольного направлений;
- организацию распределенной сети доступа в парках, скверах и рекреационных зонах;

– задачу опознавания БПЛА и подавления средствами РЭБ.

### Заключение

Применение широкополосных антенных решеток, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля, обладает рядом достоинств, определяемых их свойствами. Возможность локализации излучения в области пространства конечных размеров позволяет повысить потенциал радиосвязи, эффективность использования радиочастотного ресурса, улучшить технические характеристики систем диагностики и неразрушающего контроля.

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке программы ПРИОРИТЕТ-2030.

### Список литературы

1. Wehner R.S. Limitations of Focused Aperture Antennas. RM-262. Santa Monica: RAND Corporation, 1949. 25 p.
2. Bickmore R.W. On focusing electromagnetic radiators // Canadian Journal of Physics. 1957. Vol. 35, no. 11. P. 1292–1298. DOI: <https://doi.org/10.1139/p57-141>
3. Kay A. Near-field gain of aperture antenna // IRE Transactions on Antennas and Propagation. 1960. Vol. 8, no. 6. P. 586–593. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.1960.1144905>
4. Microwave Scanning Antennas. Vol. 1. Apertures / ed. by R.C. Hansen. New York; London: Academic press, 1964. 536 p.
5. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля / под ред. Ю.Е. Седельникова и Н.А. Тестоедова. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосм. ун-т, 2015. 308 с.
6. Increasing the accuracy characteristics of focused electromagnetic devices for non-destructive testing and technical diagnostics by implementing sum-difference signal processing / D. Vedenkin [et al.] // Electronics. 2023. Vol. 12, no. 2. P. 436. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12020436>
7. Веденькин Д.А., Седельников Ю.Е. Сфокусированные антенны в задачах неразрушающего контроля // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 131–146. DOI: <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2023-2-131-146>
8. Седельников Ю.Е., Веденькин Д.А. Антенные решетки, сфокусированные по широкополосному сигналу // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18, № 3. С. 23–30. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7236>
9. Овчаров А.П., Седельников Ю.Е. Антенные решетки для сверхширокополосных радиосредств // Антенны. 2013. № 11 (198). С. 20–36.

### Информация об авторах

**Веденькин Денис Андреевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия.

*Область научных интересов:* антенны, СВЧ-устройства, электромагнитная совместимость, сети и системы передачи данных.

*E-mail:* denis\_ved@mail.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-5318-5884>

*SPIN-код (eLibrary):* 5258-2091

*AuthorID (eLibrary):* 667258

*ResearcherID (WoS):* U-6331-2017

**Седельников Юрий Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия.

*Область научных интересов:* антенны, СВЧ-устройства, электромагнитная совместимость.

*E-mail:* sedhome2013@yandex.ru

*SPIN-код (eLibrary):* 4511-7480

*AuthorID (eLibrary):* 107358

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2023, vol. 26, no. 4, pp. 88–94

DOI 10.18469/1810-3189.2023.26.4.88-94  
UDC 621.396.6  
Original Research

Received 20 October 2023  
Accepted 21 November 2023  
Published 29 December 2023

### Properties and technical applications of antenna arrays focused on a broadband signal

Denis A. Vedenkin , Yuri E. Sedelnikov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI  
10, Karl Marx Street,  
Kazan, 420111, Russia

**Abstract – Background.** Currently, antenna arrays focused in the near-radiated field zone are being actively studied. The basic properties and characteristics of focused antenna systems using narrowband signals are known. It is possible to expand the technical capabilities of devices using focused electromagnetic fields through the use of broadband signals. This article is devoted to a description of the properties and a number of technical applications of antenna arrays focused in the near-radiated field zone using a broadband signal. **Aim.** The main aim of this article is to describe the basic properties of focused broadband electromagnetic fields and develop practical application options based on them. **Methods.** Achieving the goal of the article is due to the use of well-known principles of electrodynamics and aperture theory of antennas. **Results.** The features of the formation of focused broadband electromagnetic fields are shown and their main properties are given. Options for the technical application of focused broadband antennas in radio communication and direction finding tasks are proposed. **Conclusion.** The results obtained confirm the importance of assessing the properties of broadband focused antennas and developing a number of technical proposals based on them.

**Keywords** – focusing of electromagnetic fields; broadband signal; focused antenna array; technical applications; property of focused fields.

✉ denis\_ved@mail.ru (Denis A. Vedenkin)



© Denis A. Vedenkin, Yuri E. Sedelnikov, 2023

### References

1. R. S. Wehner, *Limitations of Focused Aperture Antennas. RM-262*. Santa Monica: RAND Corporation, 1949.
2. R. W. Bickmore, “On focusing electromagnetic radiators,” *Canadian Journal of Physics*, vol. 35, no. 11, pp. 1292–1298, 1957, doi: <https://doi.org/10.1139/p57-141>.
3. A. Kay, “Near-field gain of aperture antenna,” *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 8, no. 6, pp. 586–593, 1960, doi: <https://doi.org/10.1109/TAP.1960.1144905>.
4. R. C. Hansen, Ed., *Microwave Scanning Antennas. Vol. 1. Apertures*. New York; London: Academic press, 1964.
5. Yu. E. Sedelnikov and N. A. Testodov, Ed. *Near-Field Focused Antennas*. Krasnoyarsk: Sib. gos. aerokosm. un-t, 2015. (In Russ.)
6. D. Vedenkin et al., “Increasing the accuracy characteristics of focused electromagnetic devices for non-destructive testing and technical diagnostics by implementing sum-difference signal processing,” *Electronics*, vol. 12, no. 2, p. 436, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics12020436>.
7. D. A. Vedenkin and Yu. E. Sedelnikov, “Focused antennas in non-destructive testing tasks,” *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, no. 2, pp. 131–146, 2023, doi: <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2023-2-131-146>. (In Russ.)
8. Yu. E. Sedelnikov and D. A. Vedenkin, “Antenna arrays focused by broadband signals,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 23–30, 2015, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7236>. (In Russ.)
9. A. P. Ovcharov and Yu. E. Sedelnikov, “Antenna arrays for ultra-wideband radios,” *Antenny*, no. 11 (198), pp. 20–36, 2013. (In Russ.)

### Information about the Authors

**Denis A. Vedenkin**, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Radio Photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

*Research interests:* antennas, microwave devices, electromagnetic compatibility, telecommunication technologies.

*E-mail:* denis\_ved@mail.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-5318-5884>

*SPIN-code (eLibrary):* 5258-2091

*AuthorID (eLibrary):* 667258

*ResearcherID (WoS):* U-6331-2017

**Yuri E. Sedelnikov**, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Radio Photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

*Research interests:* antennas, microwave devices, electromagnetic compatibility.

*E-mail:* sedhome2013@yandex.ru

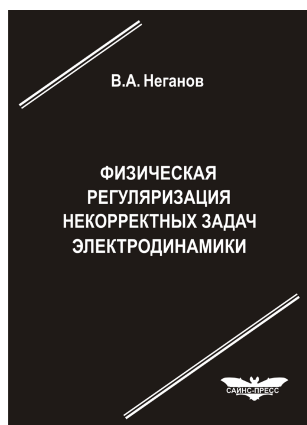
*SPIN-code (eLibrary):* 4511-7480

*AuthorID (eLibrary):* 107358

## РЕКЛАМА

**Неганов, В.А.**

**Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн / В.А. Неганов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 432 с., 122 ил.**



ISBN 978-5-88070-161-2

УДК 537.87

ББК 32.84

Н 41

Изложены основы физической регуляризации некорректных задач электродинамики, связанной с особенностями физических и математических моделей задач (физические допущения, некорректные математические выкладки, отсутствие предельного перехода). Подход, по мнению автора, обладает большими возможностями, чем метод регуляризации Тихонова А.Н. интегральных уравнений Фредгольма первого рода, названный в книге методом математической регуляризации. Метод физической регуляризации (МФР) применен к анализу волноведущих и излучающих структур, а также задачам дифракции электромагнитных волн на некоторых телах. МФР позволил впервые корректно осуществить анализ полей в ближних зонах некоторых антенн, устранить несамосогласованное приближение Кирхгофа в задачах дифракции, установить связь поверхностной плотности тока проводимости с напряженностями электрического и магнитного полей для диполя Герца и т. п.

*Для специалистов в области радиотехники и радиофизики СВЧ, электромагнитной совместимости РТС, математической теории дифракции и математического моделирования электродинамических структур самого широкого назначения. Может быть полезна преподавателям вузов, докторантам, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.*