

УДК 621.396.67

## ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ СИНТЕЗА АПЕРТУРЫ ДЛЯ «СВЕРХРАЗРЕШАЮЩИХ» ЦИФРОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК

**Пучков Александр Владимирович**

аспирант кафедры «Радиотехника» радиофизического факультета  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского».

*E-mail:* puchkov89@inbox.ru.

**Евсеев Александр Петрович**

аспирант кафедры «Радиотехника» радиофизического факультета  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского».

*E-mail:* evseevar@mail.ru.

**Орлов Игорь Яковлевич**

доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника» радиофизического факультета  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского».

*E-mail:* orlov@rf.unn.ru.

*Адрес:* 603950, Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.

*Аннотация:* Предлагается метод синтеза апертуры антенны, основанный на учёте фазовых соотношений каждой из гармоник суперпозиции всех принимаемых сигналов в соседних приёмных элементах и расчёте мгновенных отсчётов сигнала для дополнительных («виртуальных») элементов эквидистантной линейной антенной решётки со значительно увеличенным размером апертуры. Благодаря такому алгоритму данный метод обеспечивает сужение главного лепестка диаграммы направленности. Предлагаемый подход смоделирован в имитационной модели в среде «LabVIEW», а также апробирован в натуральных экспериментах в дециметровом диапазоне и на гидроакустических сигналах. Предварительные результаты дают выигрыш в угловом разрешении в  $10\div 100$  и более раз.

*Ключевые слова:* алгоритм полигармонической экстраполяции, синтез апертуры, угловое «сверхразрешение», адаптация к существенно нестационарной электромагнитной обстановке, экстраполяция суперпозиции гармонических сигналов, цифровые приёмные антенные решётки, компьютерное моделирование в среде «LabVIEW».

При создании радиолокационных устройств ширина главного лепестка антенны является важнейшим фактором эффективности системы в целом, однако традиционный путь влечёт неизбежное увеличение размеров апертуры, и, следовательно, габаритов, веса, стоимости и конструктивной сложности. Цифровые антенные решётки в значительной степени решают проблему, но влечут за собой свои специфические отрицательные моменты. Задача максимизации углового разрешения антенных устройств, при их ограниченных линейных размерах, с давних времён и по настоящее время актуальна в различных областях радио-

электроники, а также гидроакустики, сейсмо-разведки, медицинской диагностики и других.

Наряду с подходами, использованными в радиолокационных станциях с синтезированной апертурой (РСА) и многочисленных методах нелинейного спектрального анализа для антенных решёток, которые при всей их сложности и дороговизне реализации, несомненно, дают существенный выигрыш относительно известного релеевского критерия [1, 2, 3], известны попытки решения задачи углового «сверхразрешения», использующие различные алгоритмы синтеза виртуальных (дополнительных) участков апертуры с целью последующего включения дополнительных отсчётов в

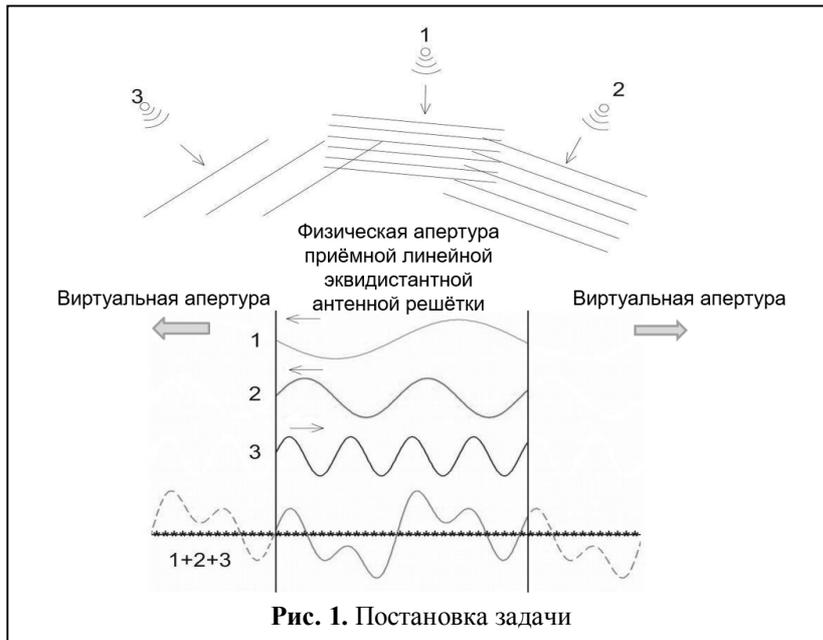


Рис. 1. Постановка задачи

окончательный алгоритм диаграммообразования [4, 5, 6].

Рассмотрим реализуемость предложенного нами в работе [7] метода синтеза апертуры антенны, основанного на учёте фазовых соотношений каждой из гармоник суперпозиции всех принимаемых сигналов в соседних приёмных элементах.

Принцип получения эффекта «сверхразрешения» при полигармоническом синтезе апертуры поясним на примере падения плоской монохроматической волны на одномерную линейную эквидистантную антенную решётку, состоящую из двух приёмных элементов – диполей/микрофонов (в общем случае будем называть «сенсором») и отображённую на рис. 1.

Для плоской волны и линейной решётки закон изменения фазы вдоль апертуры – линейный. Это позволяет вычислить спектры в виртуальных каналах, а при переходе к временным реализациям использовать полученные отсчёты в алгоритме диаграммообразования. Заметим, что расстояние между сенсорами не должно превышать половины длины волны для устранения неоднозначности. Выходные аналоговые сигналы от сенсоров поступают на входы аналого-цифровых преобразователей, работающих строго синхронно и управляю-

щих оцифрованные сигналы на регистры сдвига, тактируемые стабильным генератором импульсов. Эти требования объясняются условием минимизации фазовых искажений при последующем Фурье-преобразовании получаемых последовательностей отсчётов. Фурье-преобразование выполняется в режиме скользящего окна над последовательностью оцифрованных отсчётов реальных сенсоров.

Исходя из принятой конфигурации легко заметить, что плоский фронт падающей волны при отклонении от перпендикулярного падения на прямую, соединяющую фазовые центры реальных сенсоров, достигает их в разное время, что отображается в разном фазовом сдвиге гармоник спектра при выполнении процедуры Фурье-преобразования. Характер изменения набега фазы в зависимости от номера канала – линейный. При этом амплитуды гармоник в спектрах сигналов одного и другого сенсора практически отличаются лишь на величину внутренних шумов каждого канала и, при достаточном большом количестве точек, включаемых в окно БПФ, совпадают для каждой гармоники. Таким образом, для получения полного спектра сигнала в ближайшем виртуальном канале необходимо провести линейную экстраполяцию значений фазы для каждой гармоники, а амплитуды гармоник заменить их полусуммой.

Далее, при выполнении обратного Фурье-преобразования над вычисленным спектром получим последовательность отсчётов сигнала для виртуального канала. Повторяя указанную процедуру необходимое число раз, получим желаемое число элементов виртуальной апертуры, которые могут использоваться наряду с реальными. После выполнения процедуры диаграммообразования, которая может выполняться как путём прямого Фурье-

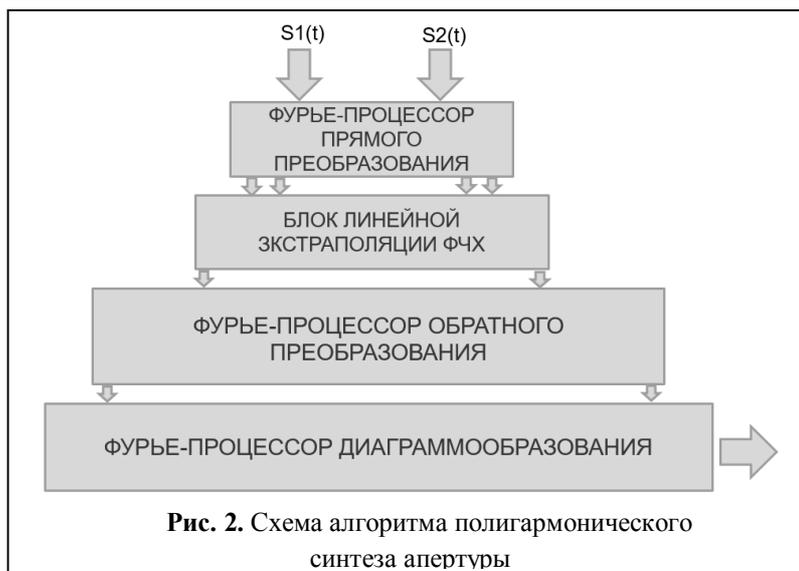
преобразования по упорядоченным номерам одноимённых отсчётов реальных и виртуальных последовательностей с целью получения полного пространственного спектра, так и простого суммирования полученных отсчётов и получения при этом отклика антенны в центре главного лепестка диаграммы направленности [7–10].

Применение одной и той же последовательности операций к каждой из компонент спектра позволяет применить термин «полигармонический» к данному способу синтеза апертуры (рис. 2).

Расчёты в среде графического программирования «LabVIEW» иллюстрируют работоспособность предложенного подхода (рис. 3).

Для оценки реализуемости полученных результатов моделирования предложенного алгоритма была проведена серия экспериментов с использованием реальных волновых сигналов различной физической природы. Для проведения исследования эффективности работы алгоритма при приёме гидроакустических сигналов использовался экспериментальный гидроакустический бассейн кафедры акустики радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

При проведении экспериментов использовалось оборудование диапазона гидроакустических колебаний вблизи 90 кГц. Пьезокерамический излучатель со сферической диаграммой направленности возбуждался от генератора Tektronix AFG 3102 через усилитель У7-5 в режиме амплитудно-импульсной модуляции. Длительность импульса модуляции и период повторения выбирались из условий надёжной отстройки от сигналов реверберации для имеющейся геометрии рабочего объёма бассейна и составили 5,0 и 20,0 миллисе-



кунд, соответственно. В противном случае это могло бы затруднить интерпретацию полученных результатов. Приём сигналов проводился парой гидроакустических микрофонов с круговой диаграммой направленности и усилителями BSK 2690, расположенных на расстоянии 10 мм друг от друга, что составило 0,4 длины волны для сигнала с выбранной несущей частотой и образующих двухэлементную антенную решётку. Регистрация сигналов для последующей обработки выполнялась двухканальным цифровым осциллографом Tektronix DPO 4032 с хорошим запасом по частоте и разрядности дискретизации. Образцы зарегистрированных сигналов приведены на рис. 4 и рис. 5, соответственно.

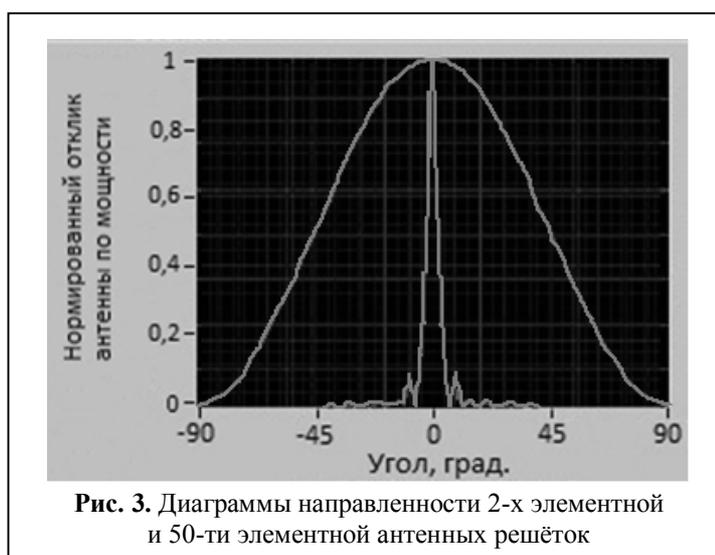




Рис. 4. Зарегистрированный сигнал с левого микрофона

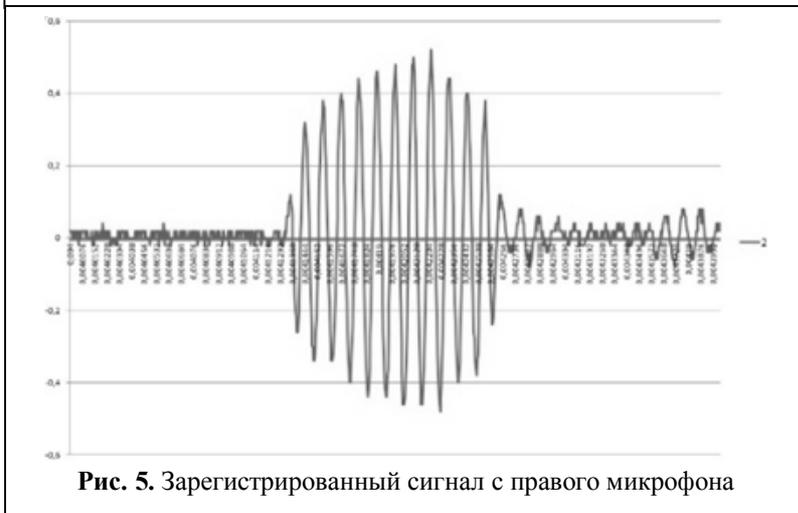


Рис. 5. Зарегистрированный сигнал с правого микрофона

Нижеприведённые рисунки (рис. 6–10) показывают диаграммы направленности по мощности, вычисленные через Фурье-преобразование наборов отсчётов соответствующего разному количеству сенсоров

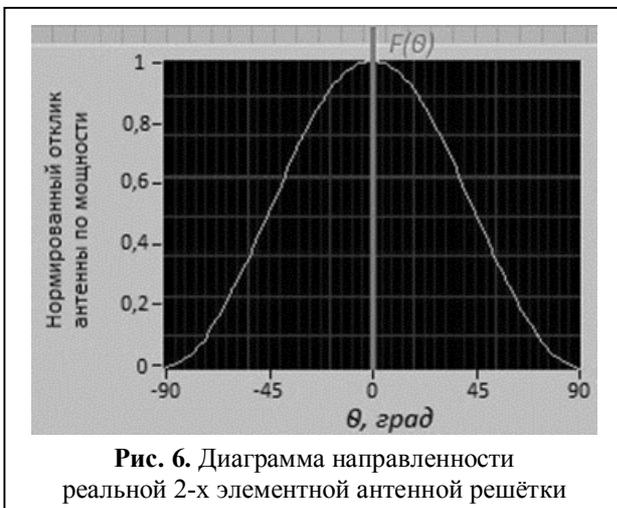


Рис. 6. Диаграмма направленности реальной 2-х элементной антенной решётки

(2; 20; 50 и 100 сенсоров) предыдущего на оба микрофона квазиплоского волнового фронта.

Из сравнения рис. 6–9 с рис. 10 видно, что при добавлении «виртуальных» отсчётов монотонно сужается главный лепесток диаграммы направленности синтезированной антенной решётки, что эквивалентно добавлению элементов антенной решётки.

При проверке свойств алгоритма полигармонического синтеза апертуры в дециметровом диапазоне использовался аппаратный комплекс из двух синхронно работающих цифровых приёмников USRP-2920 и штыревых антенн, разнесённых на 15 сантиметров с общим контррефлектором. Производились записи радиосигналов станций диапазона FM размером 500–1000 отсчётов в реальном времени (рис. 11).

Обработка радиосигналов предложенным алгоритмом показала результаты аналогичные рассмотренному случаю использования гидроакустических сигналов (рис. 6–10).

Выводы:

- алгоритм синтеза апертуры антенны, основанный на учёте фазовых соотношений каждой из гармоник суперпозиции всех принимаемых сигналов в соседних приёмных элементах, работоспособен и потенциально ориентирован на работу в режиме реального времени в радиолокации и гидролокации;
- рассмотренный подход может быть полезен во многих областях науки и техники, начиная с радио-гидролокации и заканчивая сейсморазведкой и медико-биологической аппаратурой.

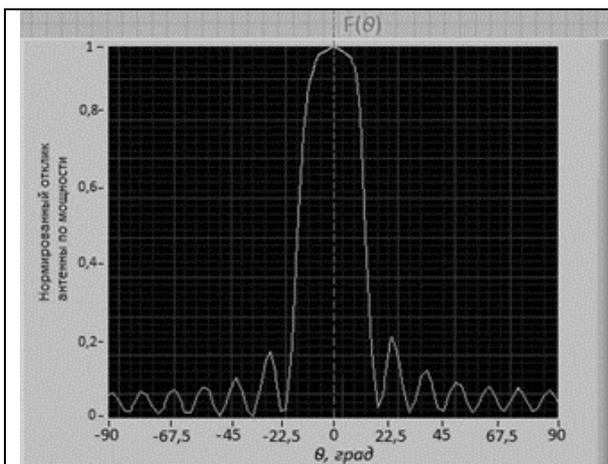


Рис. 7. Диаграмма направленности 2-х элементной антенной решётки при добавлении 18-ти «виртуальных» отсчётов

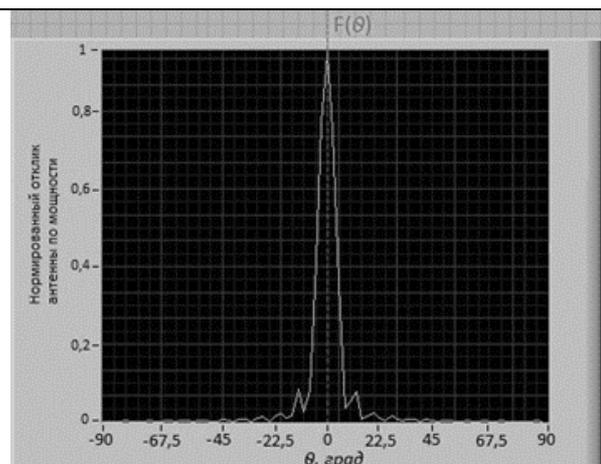


Рис. 8. Диаграмма направленности 2-х элементной антенной решётки, при добавлении 48-ми «виртуальных» отсчётов

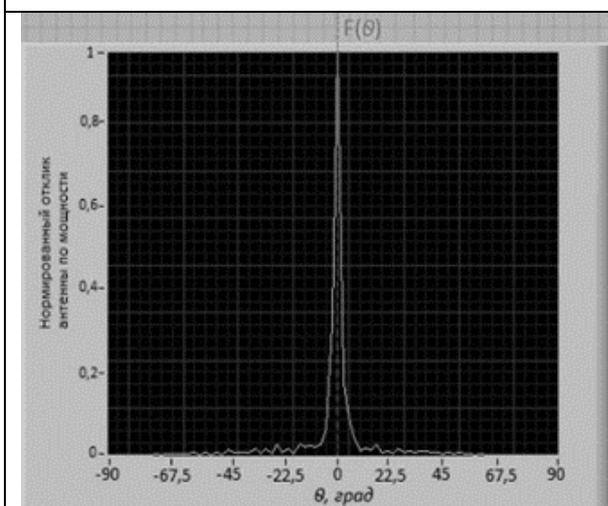


Рис. 9. Диаграмма направленности 2-х элементной антенной решётки

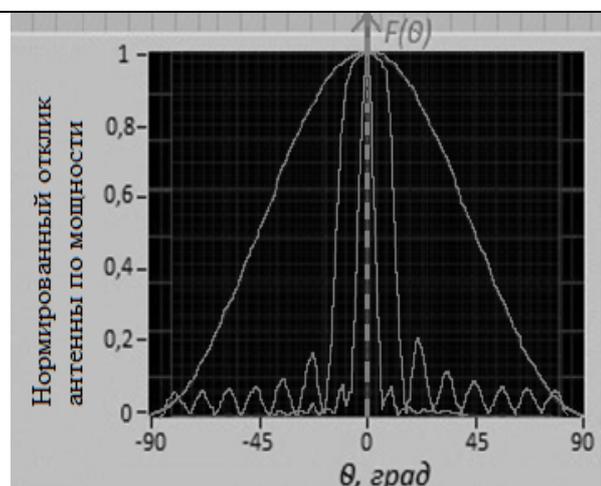


Рис. 10. Диаграммы направленности 2-х элементной, 20-ти элементной и 50-ти элементной антенных решёток

### Литература

1. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н., Мансуров В.В., Охонский А.Г., Сазонов Н.А., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Шаповалов А.В. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. М.: Радио и связь, 1988, 301 с.
2. Ермолаев В.Т., Маврычев Е.А., Флакман А.Г. Адаптивная пространственная обработка сигналов в антенных решётках. Учебное пособие. Н. Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т, 2005. 72 с.
3. Горелик Г.С. Колебания и волны 2-е изд. под ред. проф. С.М. Рыгова. М.: Физматлит, 1959. 572 с.
4. Лаговский Б.А. Суперразрешение на основе синтеза апертуры цифровыми антенными решётками // Антенны. 2013. № 6 (193). С. 9–16.
5. Ратынский М.В. Анализ характеристик алгоритмов пеленгации со суперразрешением // Радиотехника. 1992. № 10–11.
6. Пат. РФ № 2642883 Способ углового суперразрешения цифровыми антенными решётками / Гелесев А.И., Зайцев В.Е., Красько А.Г., Порсев В.И. Заявл. 31.01.2017; опуб. 29.01.2018. Бюл. № 4.
7. Евсеев А.П., Козлов С.А., Пучков А.В., Орлов И.Я. Альтернативный подход к созданию «суперразрешающей» цифровой антенной решётки / Тр. XXIII международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии - ИСТ-2017», посвящённой 100-летию НГТУ. 21 апреля 2017 г. Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 2017. С. 87.
8. Евсеев А.П., Евсеев Д.А., Баданов В.В. Экстраполяция (прогнозирование) пространственно-временных рядов на основе спектральных пред-

ставлений // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Сер. Радиофизика. 2004. № 1. С. 249–255.

9. *Евсеев А.П., Баданов В.В., Орлов И.Я.* Алгоритм полигармонической экстраполяции и возможности его применения для решения некоторых задач радиолокации, навигации и связи / Труды 14-й международной научно-технической конферен-

ции, «Радиолокация, навигация и связь». 15–17 апреля 2008. Воронеж. 25 с.

10. *Евсеев А.П., Козлов С.А., Пучков А.В.* Альтернативный подход к созданию «сверхразрешающей» цифровой антенной решётки // Труды XX научной конференции по радиофизике, посвящённой 110-летию со дня рождения Г.С. Горелика. Н. Новгород, 12–20 мая 2016 г. Н. Новгород: ННГУ, 2016. 144 с.

Поступила 16 октября 2019 г.

English

## POLYHARMONIC APERTURE SYNTHESIS ALGORITHM FOR "SUPERRESOLUTION" DIGITAL ANTENNA ARRAYS

**Alexander Vladimirovich Puchkov** – Post-graduate Student, Radio Engineering Department, Radio Physics Faculty, Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod (UNN).

*E-mail:* puchkov89@inbox.ru.

**Alexander Petrovich Evseev** – Post-graduate Student, Radio Engineering Department, Radio Physics Faculty, Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod (UNN).

*E-mail:* evseevap@mail.ru.

**Igor Yakovlevich Orlov** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Radio Engineering Department, Radio Physics Faculty, Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod (UNN).

*E-mail:* orlov@rf.unn.ru.

*Address:* 603950, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23.

**Abstract:** The proposed approach is based on a physical model of plane wave impact onto antenna array consisting of two identical elements (dipoles, microphones) spaced no more than half wavelength from each other (to avoid ambiguity). Variation law of each harmonic phase change along the aperture is linear for a plane wave and linear array. The same circumstances enable to affirm equality of amplitude spectra for signals of all sensors. This condition enables, based on signals of only two real sensors, to calculate entire spectra through linear extrapolation in numerous virtual channels, and to use obtained samples in diagram forming algorithm in reverse transition to time realizations. Application of the same operation sequence to each of spectrum components enables, in authors opinion, to apply term "polyharmonic" to this aperture synthesis method. This algorithm is modeled in simulation model in LabVIEW environment, as well as in full-scale experiments using ultra-high frequency range and hydroacoustic signals. Preliminary results demonstrate 10÷100-fold and more gain in angular resolution. Required computing costs are easily covered by modern signal processors, since basic operations are forward and reverse Fourier transform calculation. Besides, there is an option of using acousto-optic Fourier processor and thus cost issue all-in-all will be settled as well as performance speed issue to a large extent too. The physical mechanism to get such a big gain in angular resolution can be interpreted by device features and operation of so-called long length antennas. These, for example, include wave-channel antenna (Uda-Yagi), traveling-wave antenna (Beverage), spiral antenna. They do not have a large aperture in classical sense, but they ensure a high gain i.e. a narrow lobe of array pattern due to large length.

**Keywords:** polyharmonic extrapolation algorithm, aperture synthesis, angular "super-resolution", adaptation to essentially non-stationery electromagnetic environment, extrapolation of harmonic signals' superposition, digital receiving antenna arrays, computer simulation in LabVIEW environment.

### References

1. *Antipov V.N., Goryainov V.T., Kulin A.N., Mansurov V.V., Okhonsky A.G., Sazonov N.A., Titov M.P., Tolstov E.F., Shapovalov A.V.* Radar stations with digital synthesis of antenna aperture. Moscow: Radio i svyaz. 1988. 301 p.
2. *Ermolaev V.T., Mavrychev E.A., Flaxman A.G.* Adaptive spatial processing of signals in antenna arrays. Textbook. Nizhny Novgorod: NNSTU, 2005. 72 p.
3. *Gorelik G.S.* Oscillations and waves. 2nd edition. Edited by prof. S.M. Rytov. Moscow: Fizmatlit, 1959. 572 p.

4. *Lagovsky B.A.* Superresolution on the basis of aperture synthesis of the digital antenna arrays. *Antenny*. 2013. No. 6 (193). Pp. 9–16.
5. *Ratynsky M.V.* Analysis of the characteristics of direction finding algorithms with superresolution. *Radio-tehnika*. 1992. No. 10–11.
6. Pat. RU No. 2642883 Method of angular superresolution by digital antenna arrays / *Gelesev A.I., Zaitsev V.E., Krasko A.G., Porsev V.I.* Declared 31.01.2017; pub. 29.01.2018. Bull. No. 4.
7. *Evseev A.P., Kozlov S.A., Puchkov A.V., Orlov I.Ya.* Alternative approach to the creation of a "superresolving" digital antenna array / Proc. of XXI International Scientific and Technical Conference "Information systems and technologies-IST-2017" dedicated to the 100th anniversary of NSTU. April 21, 2017 N. Novgorod: Publishing house of NSTU, 2017. Pp. 87.
8. *Evseev A.P., Evseev D.A., Badanov V.V.* Extrapolation (forecasting) of space-time series based on spectral representations. *Vestnik NNGU. Ser. Radiophysics*. 2004. No. 1. Pp. 249–255.
9. *Evseev A.P., Badanov V.V., Orlov I.Ya.* Algorithm of polyharmonic extrapolation and possibilities of its application for solving some problems of radar, navigation and communication. Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference, "Radar, navigation and communication". April 15–17, 2008. Voronezh. 25 p.
10. *Evseev A.P., Kozlov S.A., Puchkov A.V.* An alternative approach to the creation of a "superresolving" digital antenna array. Proceedings of the XX scientific conference on Radiophysics dedicated to the 110th anniversary of the birth of G.S. Gorelik. N. Novgorod, May 12–20, 2016 N. Novgorod: NNSU, 2016. 144 p.