

## **Система мониторинга угловых координат источников радиоизлучения для космических аппаратов спутниковой связи**

**Чистяков В.А.**

*Компания «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева», ул. Ленина, 52, Железногорск, Красноярский край, 662972, Россия  
e-mail: [vitalys1367@mail.ru](mailto:vitalys1367@mail.ru)*

**Статья поступила 24.10.2019**

### **Аннотация**

В работе рассматривается создание системы мониторинга угловых координат источников радиоизлучения, на базе цифровой фазированной антенной решетки с применением метода классификации множественных сигналов. В результате исследования получен пеленгационный рельеф пространства, с помощью которого можно оценить угловое местоположение источников радиоизлучения. Также в процессе работы выполнена оценка разрешающей способности данной системы.

**Ключевые слова:** сверхразрешение, радиоизлучение, мониторинг, угловые координаты, пеленгационный рельеф, антенная решетка, помеха.

Как известно одной из главных задач систем спутниковой связи является поддержание безошибочной работы каналов связи между абонентами. Развитие радиотехнических средств как гражданского, так и военного назначения неминуемо приводит к высокой загруженности различных диапазонов радиоволн [1-12]. В

следствии чего источники радиоизлучений (ИРИ) оказывают огромное взаимовлияние, что приводит к возникновению помех в каналах и нарушению связи между абонентами.

Решение данной проблемы можно отнести к задаче помехозащиты спутниковой системы связи. Одним из способов защиты каналов передачи информации является адаптивное управление диаграммой направленности антенной системы [13-15], путем формирования так называемых нулей в направлении мешающих радиосигналов. В условиях нестационарной помеховой обстановки методы помехозащиты могут быть реализованы, если предварительно получена информация о местоположении источников радиоизлучения. Известно [16-19], что спектральные методы (методы сверхразрешения) обработки сигналов, получаемых с выходов антенной решетки (АР), позволяют достаточно точно формировать оценки угловых координат абонентов и источников мешающих сигналов.

Методы сверхразрешения по способу сканирования делятся на две группы: с последовательной и параллельной пеленгацией источников радиоизлучения [20].

К первой группе относятся такие методы как метод теплового шума, метод Кейпона, метод классификации множественных сигналов (MUSIC). Выходная целевая функция таких методов, как правило, представляет собой непрерывную зависимость мощности выходного сигнала от углового положения. В процессе сканирования пространства математическим опорным сигналом, максимумы целевой функции соответствуют угловым координатам ИРИ. Главным недостатком данной группы методов является медленная скорость сканирования пространства, а

также смещение оценки угловых координат, в силу корреляции между ИРИ на входе АР. Однако методы сверхразрешения с последовательным сканированием применимы для антенных решеток любой конфигурации [21].

Вторая группа методов с параллельным сканированием включает в себя метод Писаренко, метод поворота подпространства (ESPRIT), метод ROOT-MUSIC. Параллельный обзор пространства обеспечивает быструю скорость сканирования, тем не менее для использования данной группы методов на практике накладываются конструктивные ограничения на форму антенных решеток [22].

Анализируя достоинства методов сверхразрешения, имеет смысл рассмотреть работу алгоритмов из первой группы, в силу их применения в АР любой конфигурации.

Алгоритм работы метода Кейпона состоит из двух этапов. На первом этапе происходит вычисление оценки корреляционной матрицы входных сигналов  $R$ . Второй этап заключается в формировании опорного направления, для чего задается вектор-гипотеза  $V$  и вычисляется целевая функция. После чего выбирается новое опорное направление и повторяется процесс вычисления функции. Графическим представлением целевой функции является пеленгационный рельеф пространства.

Пеленгационный рельеф для метода Кейпона формируется по формуле [23]:

$$Q = \frac{1}{V^H R^{-1} V}, \quad (1)$$

где  $R^{-1}$  – обратная корреляционная матрица;

$V$  – вектор-гипотеза.

Суть метода MUSIC предполагает использование сигнального и шумового подпространств корреляционной матрицы входных сигналов.

Пеленгационный рельеф такого алгоритма формируется по формуле [23]:

$$Q = \frac{1}{V^H P V}, \quad (2)$$

где  $P$  – проектор на шумовое подпространство.

Проектор  $P$  состоит из собственных векторов  $E$  корреляционной матрицы входных сигналов, которые определяют сигнальное подпространство:

$$P = E^H E, \quad (3)$$

Алгоритм метода классификации множественных сигналов MUSIC также, как и метод Кейпона применим для АР любой конфигурации, но разрешение у данного метода лучше [23].

Основываясь на вышеперечисленных преимуществах методов сверхразрешения с последовательной пеленгацией, для реализации системы мониторинга угловых координат источников радиоизлучения, выбор пал на метод классификации множественных сигналов. Для реализации алгоритма работы данного метода использовалась 25-ти элементная плоская прямоугольная антенная решетка, на вход которой по аналоговому тракту подавались сигналы.

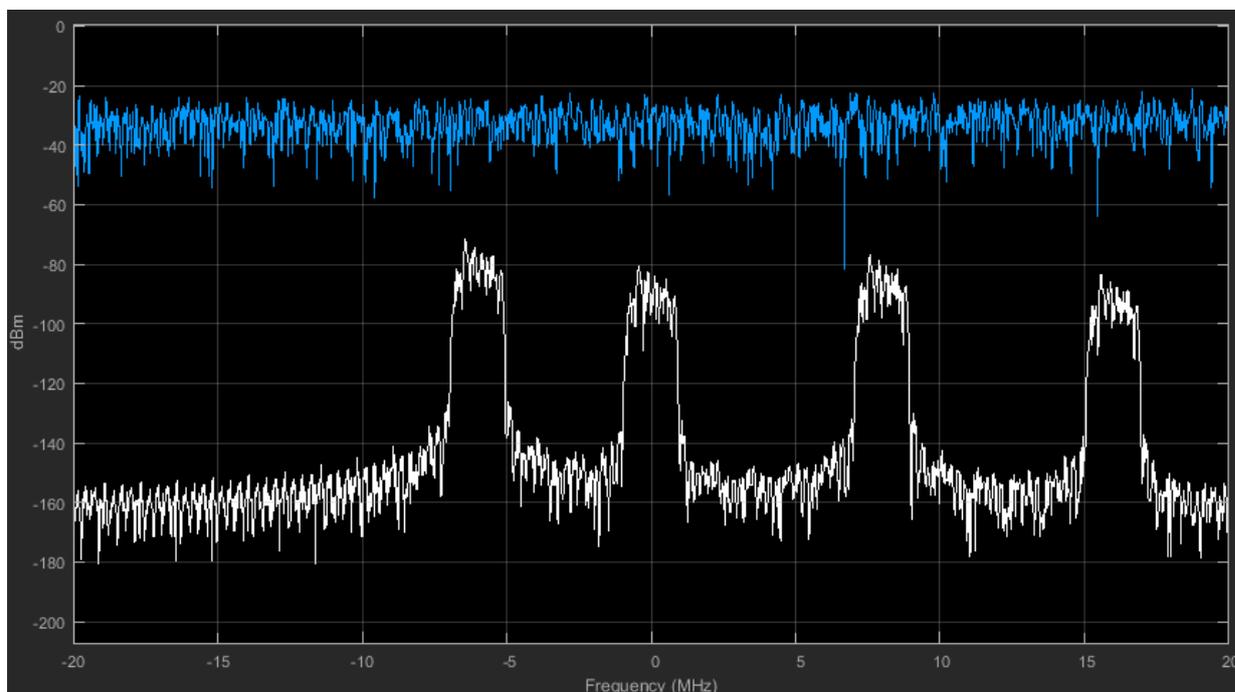
В качестве сигналов ИРИ, поступающих на вход АР, использовались четыре узкополосных и два широкополосных сигнала, параметры сигналов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры сигналов ИРИ

Тип сигнала	Угловые координаты, гр.		Мощность, дБ	Частота (нормированная), Гц.
	Азимут	Угол места		
Узкополосный 1	-0,4	0	-80	8
Узкополосный 2	0	0	-80	-6
Узкополосный 3	1	1	-85	0
Узкополосный 4	-5	2	-85	16
Широкополосный 1	11	-10	-35	-
Широкополосный 2	0	8	-40	-

Ниже представлены результаты работы метода классификации множественных сигналов. На рисунке 1, представлены спектры суммы узкополосных и широкополосных сигналов.



На рисунке 2, представлен результат работы алгоритма сверхразрешения в виде пеленгационного рельефа.

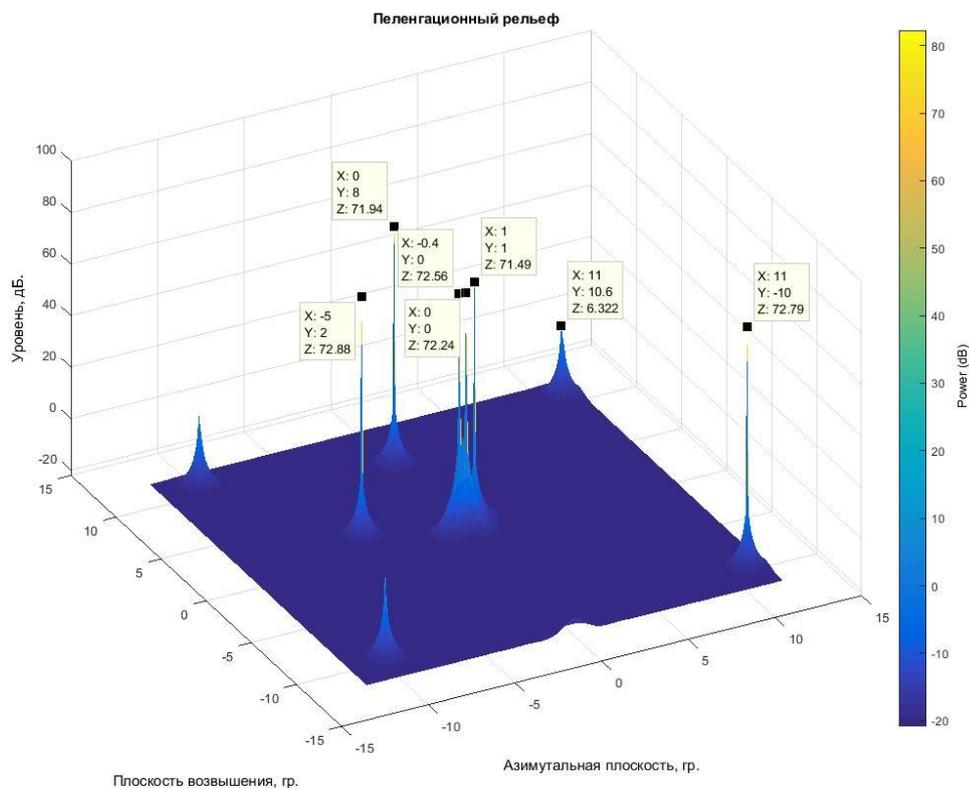


Рисунок 2 – Пеленгационный рельеф метода классификации множественных сигналов

Как видно из рисунка 2, алгоритм сверхразрешения справился со своей задачей, достаточно точно определив угловые координаты ИРИ. Однако, как можно заметить, на пеленгационном рельефе присутствуют ложные пики. Это связано в первую очередь с неоднородностями в аналого-цифровом тракте, дифференциальной нелинейностью, дрожанием апертуры.

Также в ходе исследования проведена оценка эффективности определения угловых координат ИРИ, посредством измерения среднеквадратического отклонения (СКО) максимумов пеленгационного рельефа при изменении отношения

мощности сигналов к мощности собственных шумов, результаты представлены в таблице 2 для широкополосного сигнала 2.

Формула для расчета СКО представлена ниже:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m \langle x \rangle)^2}, \quad (4)$$

где  $n$  - объем выборки;

$x_i$  – значение случайной величины на  $i$ -ой итерации;

$m \langle x \rangle$  – математическое ожидание.

Квадратическое отклонение характеризует разброс некой случайной величины относительно ее математического ожидания [24]. Однако при ограниченном количестве выборок  $n$ , вместо математического ожидания используют среднее арифметическое:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (5)$$

Тогда с учетом вышесказанного уравнение (3) можно переписать:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6)$$

Таблица 2

Зависимость СКО от отношения сигнал/шум

$P_c/P_{ш}$ , дБ	СКО $\sigma$ , гр.
50	0,0043
40	0,0123
30	0,0327
20	0,0532
10	0,0903
0	0,173

Для удобства представим полученные результаты в виде графика, рисунок 3.

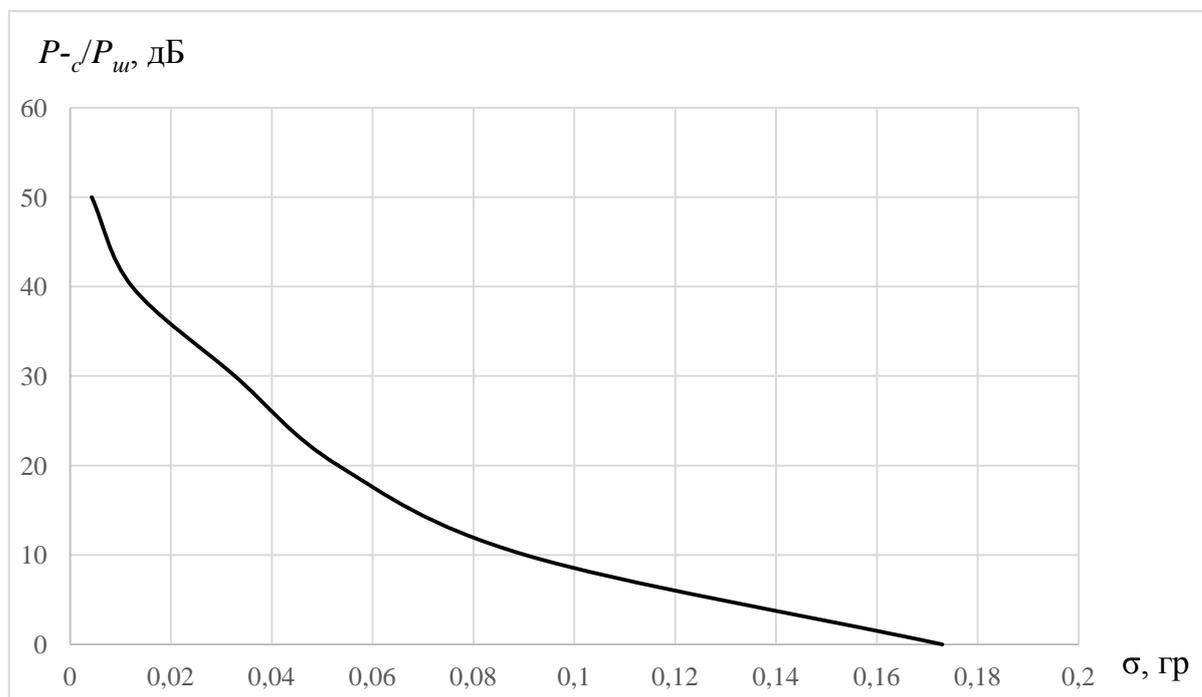


Рисунок 3 – Зависимость СКО от отношения сигнал/шум

Теперь определим разрешающую способность данного метода, то есть способность различать источники радиоизлучения при схожих угловых координатах. В качестве критерия оценки разрешающей способности понимается глубина провала между пиками пеленгационных максимумов, которая должна составлять не менее 3 дБ.

Таблица 3

Разрешающая способность методов сверхразрешения

$P_c/P_w$ , дБ	$\Delta$ , гр
50	<0,01
40	0,2
30	0,8
20	1,8
10	5,7
0	>15

Для удобства представим полученные результаты в виде графика, рисунок 4.

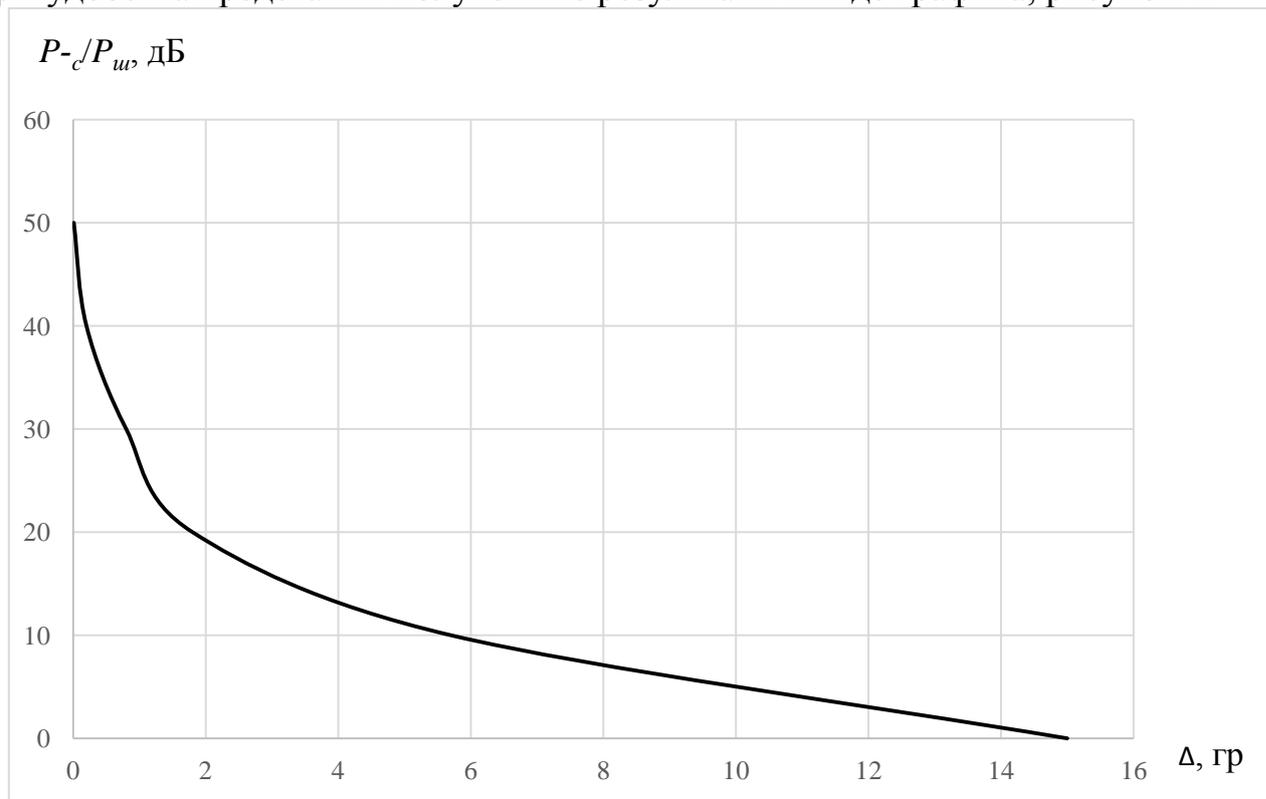


Рисунок 4 – Зависимость разрешающей способности от отношения сигнал/шум

Анализируя полученные результаты можно смело утверждать, что метод классификации множественных сигналов позволяет достаточно точно оценивать угловые координаты ИРИ, а также обладает оптимальной разрешающей способностью. Следовательно, метод MUSIC является более предпочтительным при оценки угловых координат источников радиоизлучения в антенных системах.

### Библиографический список

1. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн. - М.: Вузовская книга, 2009. - 360 с.

2. Быстров Р.П. Особенности развития радиотехнических систем радиоэлектронной борьбы // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 8. С. 3 - 28.
3. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы. - М.: Академия, 2008. - 592 с.
4. Кудряков С.А., Кульчицкий В.К. Радиотехнические системы. Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электросвязь. - СПб.: Свое Издательство, 2016. - 124 с.
5. Ермак С.Н. Тактика радиотехнических войск. - Минск: БГУИР, 2010. - 281 с.
6. Вакин С.А., Шустов Л.Н. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки. - М.: Советское радио, 1968. - 448 с.
7. Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. - М.: Радиотехника, 2008. - 432 с.
8. Иванов С.Л., Аврамов А.В., Ткаченко С.С. Комплексование бортовых радиоэлектронных локационных систем в интересах косвенной идентификации целей // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69746>
9. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем. - М.: Вузовская книга, 2007. - 468 с.
10. Гусев Д.И. Оценка параметров системы определения взаимных координат перспективных самолетов при реализации режима группового самолетовождения // Труды МАИ. 2011. № 44. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24996>
11. Родионов В.М. Зарождение радиотехники. - М.: Наука, 1985. - 240 с.

12. Коптев А.Н. Авиационное и радиоэлектронное оборудование воздушных судов гражданской авиации. - Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва, 2011. - 555 с.
13. Чистяков В.А. Алгоритм адаптивной фильтрации помех в цифровых антенных решетках спутниковой связи // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104239>
14. Godara L.C. Smart Antennas, CRC Press, 2004, 472 p.
15. Haupt R.L. Antenna arrays: A Computational Approach, Wiley-IEEE Press, 2010, 534 p.
16. Джонсон Д.Х. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения // ТИИЭР. 1982. № 9. С. 126 - 139.
17. Тимановский А.Л., Пирогов Ю.А. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения. - М.: Радиотехника, 2017. - 160 с.
18. Chandran S. Advances in Direction-of-Arrival Estimation, Artech House, 2006, 499 p.
19. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. Principles of Modern Radar: Vol. I. Basic Principles, SciTech Publishing, 2010, 924 p.
20. Гейбриелл У.Ф. Спектральный анализ и методы сверхразрешения с использованием адаптивных решеток // ТИИЭР. 1980. № 6. С. 19 - 32.
21. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. - М.: Радио и связь, 2003. - 200 с.

22. Зотов С.А. Методы сверхразрешения в задачах радиопеленгации // Информационные процессы и технологии в обществе и экономике. 2006. № 3. С. 12 - 26.
23. Ратынский М.В. Анализ характеристик алгоритмов пеленгации со сверхразрешением // Радиотехника. 1992. № 10. С. 63 - 66.
24. Романовский В.И. Математическая статистика. Кн. 1. Основы теории вероятностей и математической статистики. - Ташкент: АН УзССР, 1961. - 638 с.