

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПЕЛЕНГАЦИИ СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ

Ботов. В.А.

Ярославский государственный университет им. П.Г.Демидова
150000, Ярославль, ул. Советская 14, тел. (0852) 79-77-51, e-mail: nvs@uniyar.ac.ru

Реферат. В работе рассмотрен ряд алгоритмов пеленгации со сверхразрешением: MUSIC, ML и ASPECT. Произведено сравнение указанных методов по угловому разрешению, чувствительности и среднеквадратичному отклонению пеленгов. Показано преимущество сверхразрешающих алгоритмов ASPECT и ML над классическим.

1. Введение

Широко используемые в настоящее время в пеленгации методы фазовой и корреляционной интерферометрии и псевдодоплеровский метод имеют существенный недостаток, заключающийся в появлении больших ошибок пеленгов при наличии интерференции и многолучевого распространения. Особенно эта проблема характерна для мобильных пеленгаторов, работающих в условиях городской застройки.

Цифровые алгоритмы обработки сигналов с антенных решеток, описанные в [2-4], позволяют разрешать несколько источников излучений в одном частотном канале. Это так называемые методы со сверхразрешением. Использование данных алгоритмов в мобильных пеленгаторах позволяет значительно улучшить их характеристики, как по времени пеленгации, так и по точности.

Данная работа посвящена сравнительному анализу алгоритмов пеленгации со сверхразрешением на основе математического моделирования.

2. Методы пеленгации со сверхразрешением

Вектор выходного сигнала антенной решетки (АР) из N элементов в случае падения на неё M плоских волн от удалённых источников излучения можно записать следующим образом:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{S} \cdot \mathbf{m}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (1)$$

где \mathbf{S} - $N \times M$ матрица из векторов направленности АР $\{\mathbf{s}(\theta_i, \varphi_i)\}; i = 1..M$.

$\mathbf{m}(t)$ - M -мерный вектор комплексных огибающих радиосигналов.

$\mathbf{n}(t)$ - N -мерный вектор, описывающий белый гауссовский шум.

Задача алгоритма - извлечь информацию о пеленгах источников, содержащуюся в $\mathbf{x}(t)$.

Классический метод формирования луча [2-4] использует для этого суммирование сигналов с элементов АР с комплексными весовыми коэффициентами $w_i = s_i(\theta, \varphi)$:

$$y(t) = \sum_{k=1}^N x_k(t) w_k^* = \mathbf{w}^H \mathbf{x}, \quad (2)$$

что эквивалентно пространственной фильтрации сигналов по углам прихода. Пеленги сигналов определяются по максимумам углового спектра:

$$P(\theta, \varphi) = \langle |y(t)|^2 \rangle = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} = \mathbf{s}^H(\theta, \varphi) \mathbf{R}_{xx} \mathbf{s}(\theta, \varphi),$$

(3)

где \mathbf{R}_{xx} корреляционная матрица выходных сигналов АР.

Основной недостаток классического метода - низкое угловое разрешение. Этот недостаток позволяют преодолеть алгоритмы со сверхразрешением. Рассмотрим наиболее известные из них.

Метод MUSIC [1] применяет разложение исходной корреляционной матрицы \mathbf{R}_{xx} по собственным векторам и собственным значениям и разделение собственных векторов на подпространство сигналов и подпространство шума:

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{R}_{\text{сигнала}} + \mathbf{R}_{\text{шума}}.$$

Пеленги источников соответствуют максимумам псевдоспектра:

$$P_{MUSIC}(\theta, \varphi) = \frac{1}{\mathbf{s}^H(\theta, \varphi) \mathbf{P}_{\text{шума}} \mathbf{s}(\theta, \varphi)}, \quad (4)$$

где $\mathbf{P}_{\text{шума}}$ - оператор проектирования на подпространство шума.

Методы ASPECT и ML [3] оптимизируют по пеленгам источников некоторую функцию. Алгоритм ASPECT использует так называемую функцию качества, характеризующую степень совпадения с подпространством сигналов. В методе максимального правдоподобия (ML) в качестве оптимизируемой функции выступает логарифм условной плотности вероятности. Оценки пеленгов для методов ASPECT и ML даются выражениями (5), (6).

$$\{\hat{\theta}_i, \hat{\varphi}_i\}_{ASPECT} = \arg \min_{\{\theta_i, \varphi_i\}} \{trace(\mathbf{P}_S^\perp \mathbf{P}_V)\}, \quad (5)$$

$$\{\hat{\theta}_i, \hat{\varphi}_i\}_{ML} = \arg \max_{\{\theta_i, \varphi_i\}} \{trace(\mathbf{P}_S \mathbf{R}_{xx})\},$$

(6)

где \mathbf{P}_S^\perp - матрица, зависящая от структуры AP и от углов $\{\theta_i, \varphi_i\}$,

\mathbf{P}_V - матрица проектирования на подпространство сигналов.

3. Результаты математического моделирования

Исследовались три основные характеристики пеленгационных алгоритмов – это азимутальная разрешающая способность, среднеквадратичное отклонение (СКО) оценки пеленга, чувствительность, и их зависимости от отношения С/Ш. Для моделирования была выбрана круговая AP из 8 элементов, равномерно расположенных по окружности радиуса $R = 0.5\lambda$. Такая AP наиболее подходит для использования в мобильных пеленгаторах.

1) Разрешение и его зависимость от отношения сигнал/шум (С/Ш).

В качестве модели электромагнитного поля, использовалась сумма двух плоских электромагнитных волн равной амплитуды и белого (в полосе канала) гауссовского шума. Азимуты источников 20° и $20^\circ + \Delta\theta$. Количество временных выборок, по которым формировалась оценка корреляционной матрицы, равно 64.

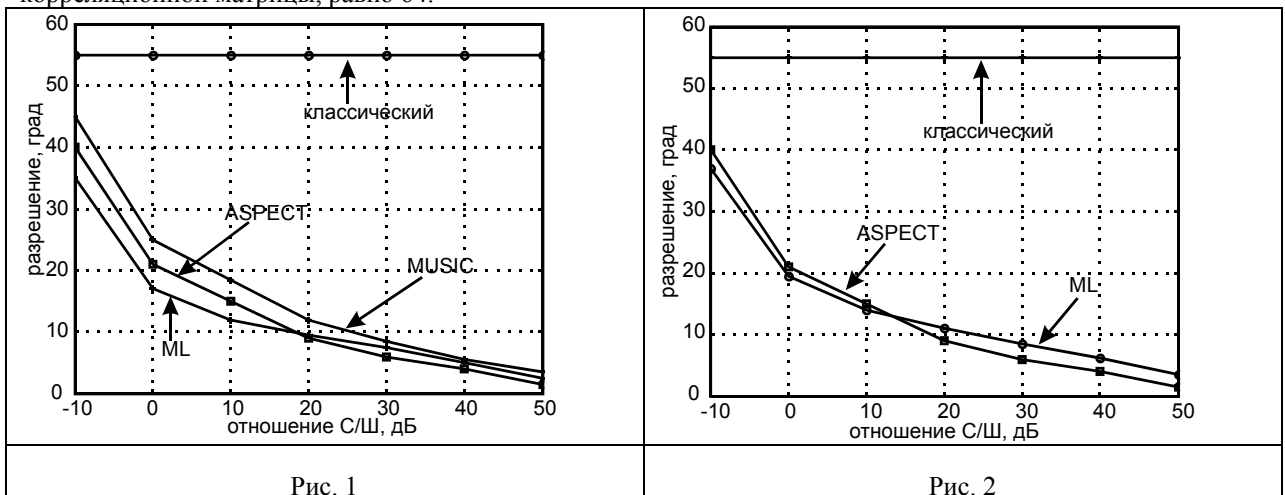


Рис. 1

Рис. 2

На Рис.1 и Рис.2 приведены полученные зависимости азимутальной разрешающей способности от отношения С/Ш (Рис.1 соответствует случаю некогерентных источников, а Рис.2 случаю полностью коррелированных сигналов). Отметим сильную зависимость разрешающей способности от шумов для всех алгоритмов кроме классического, что связано с их нелинейностью. Но даже при отношении С/Ш порядка 0 дБ выигрыш в разрешении у методов ASPECT, ML и MUSIC по сравнению с классическим методом составляет 2-3 раза. Для случая полностью когерентных источников рассмотрены только три алгоритма, так как метод MUSIC не способен различать полностью коррелированные сигналы.

2) Среднеквадратичное отклонение(СКО) пеленгов и чувствительность.

Другой важной характеристикой является СКО пеленгов. Моделировалась ситуация наличия двух когерентных источников с угловым расстоянием 55° между ними. Зависимость СКО пеленга одного источника от отношения С/Ш представлена на рис.3. В таблице 1 приводятся результаты измерения чувствительности, под которой подразумевается пороговое отношение С/Ш, при котором СКО пеленгов меньше 1° .

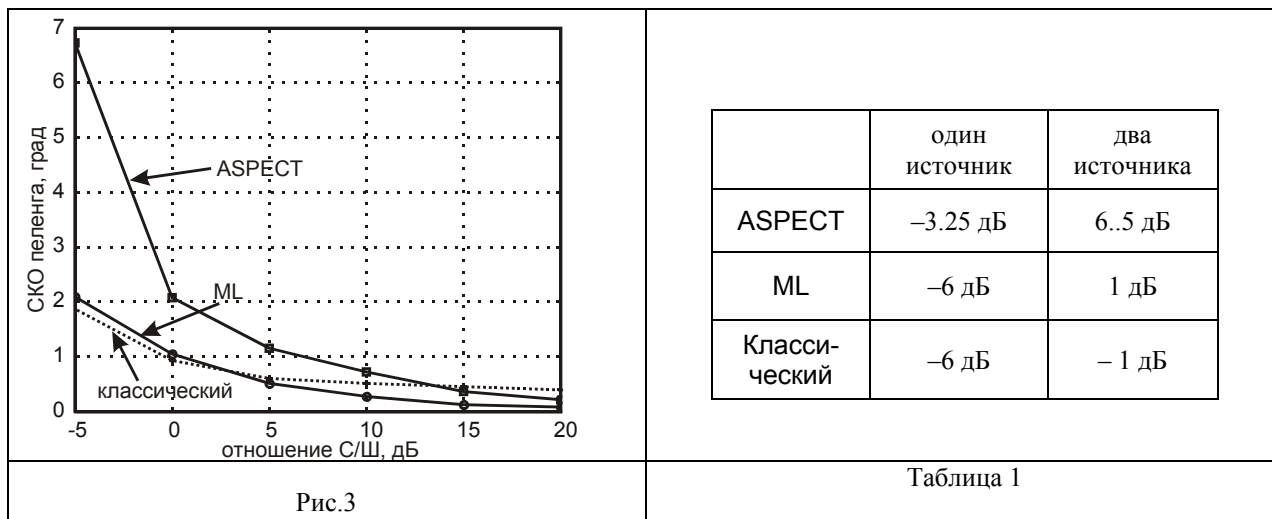


Рис.3

Таблица 1

При больших шумах наименьшее СКО пеленгов имеют классический метод и метод максимального правдоподобия. Поэтому они обладают и наибольшей чувствительностью. В случае наличия только одного источника радиосигнала чувствительность становится лучше. Воздействие на АР двух источников радиосигналов приводит к увеличению СКО.

3) Смещение пеленгов.

В результате моделирования выяснилось, что смещение пеленгов характерно только для классического метода. Это объясняется влиянием источников друг на друга в пространственно-спектральной области через боковые лепестки окна. Смещение достигает 3°-5°, что является неприемлемым для решения пеленгационных задач.

4. Выводы

Моделирование показало, что наилучшими пеленгационными характеристиками обладают алгоритмы ASPECT и ML. Основной их недостаток - большие вычислительные затраты необходимые для многомерного поиска, однако его можно преодолеть, используя быстрые алгоритмы глобальной оптимизации. Применение алгоритмов со сверхразрешением, в частности методов ASPECT и ML, позволит решить проблему радиопеленгации в условиях интерференционных помех.

Литература

1. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990.
2. Сверхбольшие интегральные схемы и современная обработка сигналов: Пер. с англ. / Под ред. С.Гуна, Х.Уайтхауса, Т.Кайлата. – М.: Радио и связь, 1989. – 472 с.:ил.
3. Manikas A. Evaluation of Superresolution Array-Techniques as applied to Coherent Sources. // International Journal of Electronics. January 1997, Vol. 82, № 1, pp. 77-105.
4. Gething P.J.D. Radio Direction Finding and Superresolution // IEE Electromagnetic Waves Series, № 33.

