

Библиографические ссылки

1. Лейтманн Г. Введение в теорию оптимального управления. М. : Наука, 1968.
2. Wittenmark Björn, Urquhart Alexander. Adaptive extremal control // 34th Conference on Decision and Control. 1995.
3. Lefcourt H. M. (ed.). Research with the locus of control construct: extensions and limitations. Elsevier, 2013.
4. Дёмин Д. А. Применение искусственной ортогонализации в поиске оптимального управления технологическими процессами в условиях неопределенности // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. Т. 5, №. 9 (65).
5. Медведев А. В. Основы теории адаптивных систем / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. 526 с.

References

1. Leytmann G. *Vvedenie v teoriyu optimal'nogo upravleniya* [Introduction to the theory of optimal control]. M. : Nauka, 1968.
2. Wittenmark Björn, Urquhart Alexander. Adaptive extremal control // 34th Conference on Decision and Control. 1995.
3. Lefcourt Herbert M., ed. Research with the locus of control construct: extensions and limitations. Elsevier, 2013.
4. Demin D. A. *Primenenie iskusstvennoy ortogonalizatsii v poiske optimal'nogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v usloviyakh neopredelennosti* [The use of artificial orthogonalization in finding the optimum process control in the face of uncertainty] // *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2013. Vol. 5, № 9 (65).
5. Medvedev A. V., *Osnovy teorii adaptivnykh sistem* [Fundamentals of Adaptive Systems Theory, SibSAU Publishing. Krasnoyarsk, 2015. (In Russ.)

© Чжан Е. А., 2016

УДК 621.396.67

СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ В АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ

В. А. Чистяков, В. Ю. Куприц

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40
E-mail: vitalys1367@mail.ru

Промоделированы методы сверхразрешения, позволяющие оценивать угловые координаты источников радиоизлучения, а также их число. Произведена оценка среднеквадратического отклонения определения угловых координат.

Ключевые слова: сверхразрешение, антенные решетки, угловые координаты, метод Кейпона, метод Music, метод Root-Music.

SUPERRESOLUTION IN ANTENNA ARRAYS

V. A. Chistyakov, V. U. Kuprits

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
E-mail: vitalys1367@mail.ru

The research presents with simulated methods of superresolution, permissive to measure angular coordinate of radio source and their number. It evaluates the standard deviation determining the angular coordinate.

Keywords: superresolution, antenna arrays, angular coordinates, Keypona method, Music method, Root-Music method.

В настоящее время ни одно радиотехническое средство не может обходиться без антенной системы, начиная от примитивных радиоприемников и заканчивая сложными космическими системами. Так, на современных космических аппаратах (КА) связи устанавливают сложные антенные решетки, которые различаются своей конфигурацией, набором элементов и рядом других немаловажных параметров.

Основным направлением развития космических технологий является помехозащита КА связи. Для решения данной задачи в ряде случаев необходимо путем обработки исследуемого сигнала определить количество источников излучения и установить их угловые координаты. К подобным случаям относятся, например, преднамеренные помехи, создаваемые противником из разных точек пространства, или естест-

венные помехи, обусловленные особенностями распространения сигналов в околоземном пространстве и водной среде, приводящими к многолучевости в точке приема. В условиях нестационарной помеховой обстановки методы помехозащиты могут быть реализованы, если предварительно определены угловые координаты постановщиков помех и их число.

Оценить угловые координаты источников радиоизлучения позволяют методы сверхразрешения. Данные методы основаны на обращении корреляционной матрицы сигнала, полученного с выхода антенной системы.

Метод Кейпона применим к антенным решеткам любой конфигурации и дает достаточно низкий уровень боковых лепестков пеленгационного рельефа, но требует большого числа облучающих выборок. Пеленгационный рельеф формируется по формуле [1–2]

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

где R^{-1} – обратная корреляционная матрица; V – вектор-гипотеза.

Метод Music опирается на понятия сигнального и шумового подпространств корреляционной матрицы. Пеленгационный рельеф такого алгоритма формируется по формуле [1–2]

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

где P – проектор на шумовое подпространство.

Алгоритм Music так же, как и Кейпона, применим для АР любой конфигурации, но разрешение у данного метода лучше (см. рисунок).

Недостатками алгоритма Music являются необходимость предварительной оценки размерности сигнального подпространства, а также сравнительно высокая вычислительная сложность.

Метод Root-Music основан на анализе собственных векторов корреляционной матрицы R , его отличительной особенностью является более высокая точность оценивания угловых координат, чем у методов, использующих лишь непосредственно корреляционную матрицу.

Алгоритм Root-MUSIC применительно к линейным антенным решеткам можно описать следующими шагами:

1. Оценка корреляционной матрицы R .
2. Разложение корреляционной матрицы на собственные вектора и значения.
3. Формирование матрицы C , составленной из собственных векторов R .
4. Получение коэффициентов полинома путем суммирования элементов на диагоналях матрицы C .
5. Вычисление корней полинома $D(z)$.
6. Отбор значений z , лежащих на единичной окружности, которые формируют взаимно сопряженные пары.
7. Определение пеленгационных углов по формуле [3]

$$\alpha_m = \arcsin\left(\frac{1}{\pi} \arg(z_m)\right). \quad (3)$$

Таблица 1

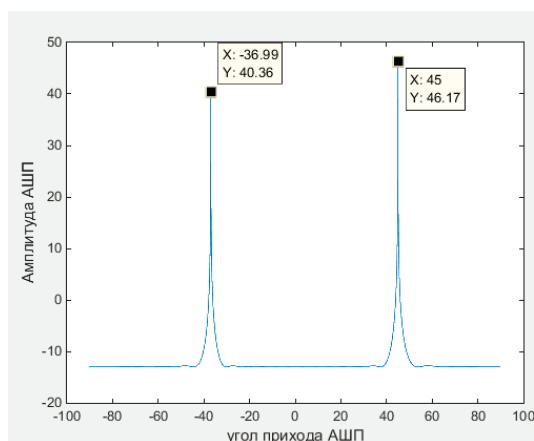
Результат моделирования алгоритма Root-Music

Корень	Угол, град.
$-0,3143 - j0,9494$	$-37,997^0$
$-0,6056 + j0,7958$	$45,998^0$

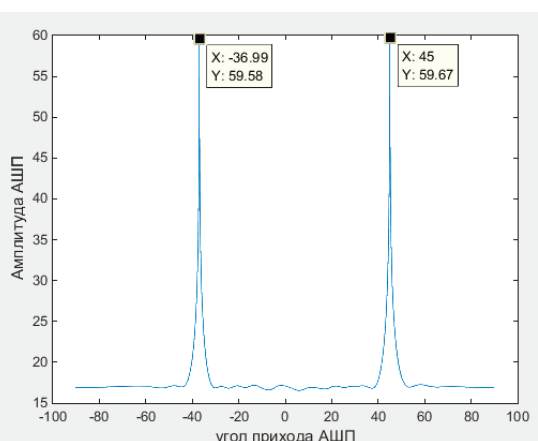
Моделируя работу данных алгоритмов в среде программирования Matlab, авторы получили результаты оценки угловых координат (табл. 1). В качестве сигналов были использованы активные шумовые помехи с углами прихода -40° и 45° .

Также проведена оценка эффективности определения угловых координат посредством измерения среднеквадратического отклонения (СКО) при изменении отношения мощности помехи к мощности внутреннего шума, результаты представлены в табл. 2.

Анализируя полученные результаты, можно смело утверждать, что метод Music является более предпочтительным среди рассмотренных методов сверхразрешения, так как он не только позволяет довольно точно оценивать угловые координаты источников радиоизлучений, но и применим для антенных решеток различных конфигураций.



а



б

Пеленгационный рельеф:
а – метод Music, б – метод Кейпона

Среднеквадратические отклонения

$P_c/P_{ш}$, дБ	σ , град		
	Кейпона	Music	Root-Music
40	0,0045	0,0043	0,0024
30	0,0212	0,0123	0,0081
20	0,0401	0,0327	0,0221
10	0,0672	0,0532	0,0476
0	0,1334	0,0903	0,0782

Библиографические ссылки

1. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение антенных решеток. М. : Радио и связь, 2003. 200 с.
2. Зотов С. А., Макаров Е. С., Нечаев Ю. Б. Методы сверхразрешения в задачах радиопеленгации. URL: <http://www.lerc.ru/informatics/0003/0002/> (дата обращения: 05.08.2016).
3. Сидоренко К. А. Разработка методик и алгоритмов повышения быстродействия определения угловых координат априорно неопределенных источников радиоизлучения: дис. ... д-ра тех. наук: 05.12.04. Омск, 2013. 127 с.

References

1. Ratynsky M. V. Adaptation and superresolution antenna arrays. M. : Radio and communications, 2003. 200 p.
2. Zotov S. A., Makarov E. S., Nechayev Y. B. Methods superresolution in problems direction finding. Access mode: <http://www.lerc.ru/informatics/0003/0002/>.
3. Sidorenko K. A. Development of methods and algorithms to improve performance determining the angular coordinates priori uncertain sources of radio signals: dis. ... doc. of techn. sc.: 05.12.04. Omsk, 2013. 127 p.

© Чистяков В. А., Куприц В. Ю., 2016

УДК 62

ДАЛЬНОМЕР ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА

Д. А. Шуринова, А. Ю. Хорошко

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: dasha.shurinova@yandex.ru, alex.khoroshko@gmail.com

При автоматическом взлете и посадке беспилотного летательного аппарата вертолетного типа необходимо определять высоту над подстилающей поверхностью. В настоящей статье рассмотрена возможность применения для решения такой задачи ультразвукового дальномера, а также предложен альтернативный алгоритм, который позволит повысить его помехозащищенность и точность.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, расстояние, дальномер, помехи.

A RANGEFINDER FOR UNMANNED AIRCRAFT

D. A. Shurinova, A. Y. Horoshko

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: dasha.shurinova@yandex.ru, alex.khoroshko@gmail.com

Height above ground level measurement is required to perform automatic takeoff and landing of unmanned aerial vehicle of helicopter type. The ultrasonic rangefinder is studied, alternative algorithm is proposed to increase measurements precision and noise tolerance.

Keywords: unmanned aircraft, distance, rangefinder, interference.

При автоматическом взлете и посадке беспилотного летательного аппарата (БПЛА) вертолетного типа необходимо с достаточной точностью измерять расстояние до подстилающей поверхности.

Для БПЛА взлетной массой 50–500 кг, по мнению авторов статьи, достаточной является точность измерения высоты не хуже 20 см на расстоянии не менее 5 м.