

УДК 621.37.037

СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА «ТЕПЛОВОГО ШУМА»

*А.О. БЕЗДЕЛЬ, канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены результаты теоретического анализа сверхразрешения источников излучения с помощью антенных решеток с использованием метода «теплового шума». Применены методы цифровой обработки, обеспечивающие эффективные характеристики подавления помех и высокие качества обработки радиолокационных сигналов. Приведены результаты исследований для одного и двух источников излучения. Проанализированы функции углового разрешения объектов. Даны рекомендации по уменьшению вычислительной сложности алгоритмов обработки. Модифицирован метод «теплового шума». Результаты исследований могут быть использованы в радиопеленгации и радиолокации.

Введение. Одной из важнейших задач радиолокационной станции (РЛС) как информационно-измерительной системы является измерение угловых координат источника излучения полезного сигнала, которое основано на определении направления прихода электромагнитных волн, излученных или отраженных целью.

Актуальность исследования обусловлена тем, что к современным РЛС предъявляют жесткие ограничения по массе, габаритным размерам и энергопотреблению, которые исключают применение мощных передающих устройств и ограничивают размеры полотна антенной решетки (АР). Наложение на малогабаритные РЛС данных ограничений, а также исключительная сложность электромагнитной обстановки приводят к новой, требующей детального исследования задаче синтеза на базе «малоэлементной» антенны алгоритмов цифровой обработки, обеспечивающих эффективные характеристики подавления различного рода помех и высокое качество обработки радиолокационных сигналов.

Теоретический анализ. Идея метода опирается на свойства адаптивной АР, критерием эффективности которой является величина отношения мощности сигнала к средней суммарной мощности внешней помехи и собственного шума на выходе (ОСШ). Допустим, что полезный сигнал, принимаемый АР, задается вектором S ф, а корреляционная матрица (КМ) помеховых сигналов описывается некоторой матрицей M . Без ограничения общности можно предположить, что амплитуда волны полезного сигнала и средняя мощность собственного шума в одном элементе АР равны единице. Тогда величина ОСШ на выходе равна

$$\eta = \frac{W^H S S^H W}{W^H M W}, \quad (1)$$

где W – весовой вектор обработки принимаемых сигналов.

Решение этой задачи хорошо известно [1 – 8].

Оптимальный весовой вектор адаптивной АР равен

$$W = M^{-1} S \text{ ф}. \quad (2)$$

Адаптивная АР подавляет помеховые сигналы. Вместе с помеховыми сигналами подавляется и часть собственного шума. Это можно объяснить следующим образом. Собственный шум однороден в N -мерном сигнальном пространстве и его КМ равна $\sigma^2 E$. Любое направление в этом пространстве содержит долю шума.

Пусть внешний источник возбуждает в АР сигнальный вектор S . Некоторая доля шума, приходящая на этот вектор, добавляется к сигналу. Теперь, если АР подавляет вектор сигнала S , она неизбежно подавляет и эту часть собственного шума. В результате собственный шум становится неоднородным в N -мерном пространстве. Это значит, что собственный шум на выходе адаптивной АР несет информацию об угловых положениях источников. Метод «теплового шума» основан на анализе свойств собственного шума адаптивной АР.

Допустим, что в пространстве имеется некоторое количество помеховых источников, и АР, оценив КМ, использует для обработки сигналов весовой вектор (2). Вычислим величину мощности собственного шума P_0 на выходе системы. В результате получим, что

$$P_0 = W^H (\sigma^2 E) W = \sigma^2 \left[S^H \text{ ф} M^{-2} S \text{ ф} \right]. \quad (3)$$

В качестве функции, которая обеспечивает угловое разрешение в методе «теплового шума», рассматривается величина, обратная мощности собственного шума P_0 , т.е.

$$\eta_2 \varphi = \frac{1}{S^H \varphi M^{-2} S \varphi}. \quad (4)$$

1. Допустим, что в пространстве имеется один источник. Этот пример полезно рассмотреть, хотя в случае одного источника вопрос об угловом разрешении не имеет смысла. В данном случае КМ принимает вид

$$M = \sigma_1^2 S \varphi_1 S^H \varphi_1 + \sigma^2 E. \quad (5)$$

На рисунке 1 изображена функция (4). Расчеты выполнялись для линейной эквидистантой АР с числом элементов $N = 16$ и полуволновым расстоянием между элементами. Предполагалось, что плоская волна от источника приходит по направлению нормали к АР, т.е. $\varphi_1 = 0$. Средняя мощность полезного сигнала и собственного шума в каждом элементе принимались соответственно $\sigma_1^2 = 1$, $\sigma^2 = 1$.

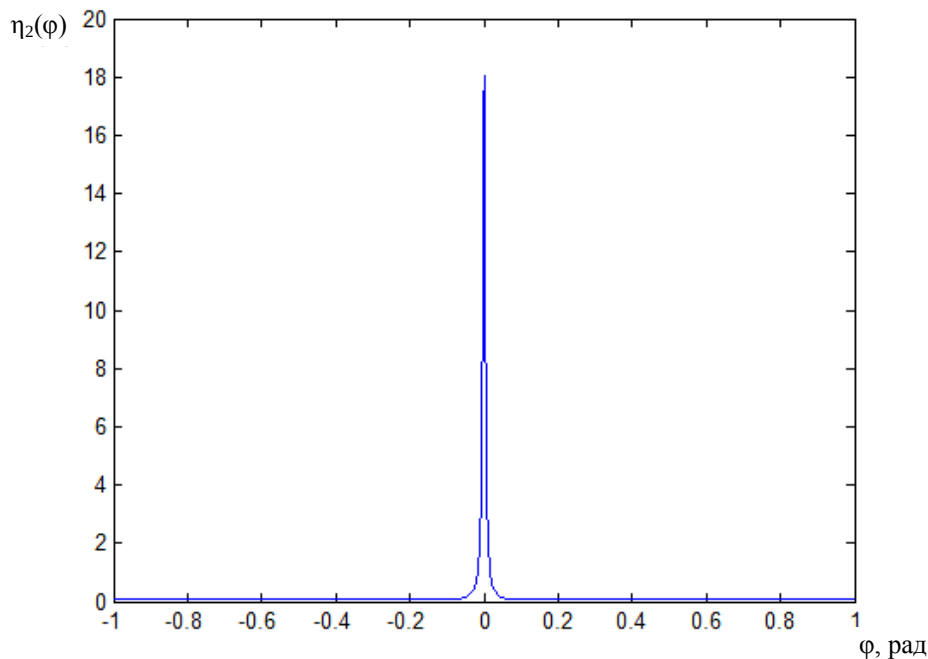


Рис. 1. Зависимость $\eta_2 \varphi = \psi \varphi$ при наличии одного источника

2. Допустим теперь, что в пространстве имеется два источника. Тогда КМ принятых сигналов принимает вид

$$M = \sigma_1^2 S \varphi_1 S^H \varphi_1 + \sigma_2^2 S \varphi_2 S^H \varphi_2 + \sigma^2 E. \quad (6)$$

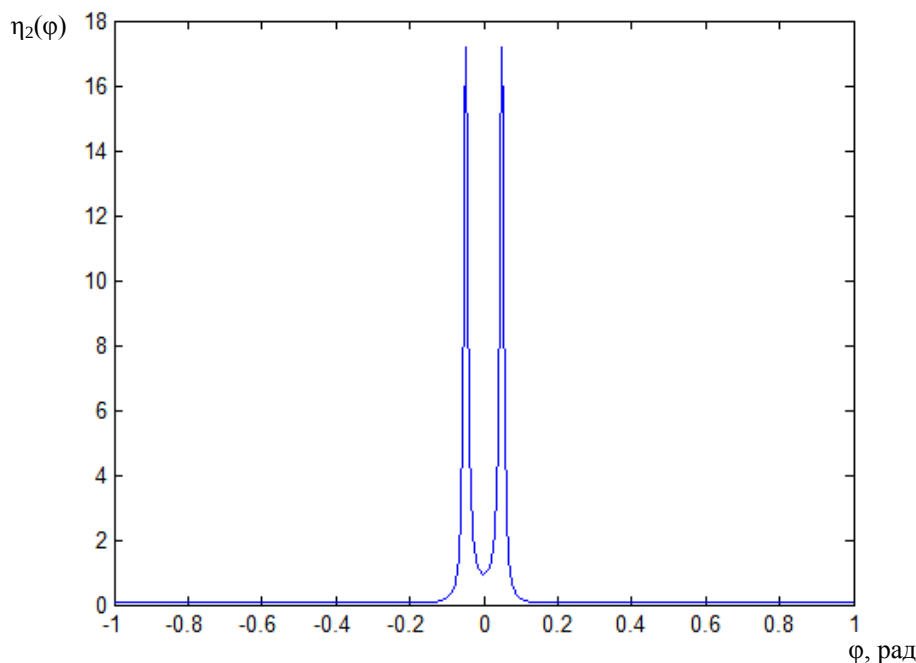
Предполагаем, что оба источника имеют одинаковые средние мощности в каждом элементе АР.

Полагаем, что отношение мощности сигнала одного источника к мощности собственного шума в каждом элементе равно единице, т.е. $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2 = 1$.

Углы прихода волн полагаем равными: $\varphi_1 = \pi/64$ и $\varphi_2 = -\pi/64$.

Как и прежде, предположим, что измерение углов прихода волн выполняется с помощью линейной эквидистантой АР из 16 элементов ($N=16$) и полуволновым межэлементным расстоянием ($d/\lambda = 0,5$). Зависимость $\eta_2 \varphi = \psi \varphi$ приведена на рисунке 2.

Из рисунка 1 максимум функции точно совпадает с направлением прихода волны источника излучения. На рисунке 2 видим два максимума, которые совпадают с направлениями прихода волн от двух источников, хотя источники находятся на расстоянии меньшем, чем ширина главного луча. Данный метод позволяет превысить релейевский предел разрешения.

Рис. 2. Зависимость $\eta_2 \varphi = \psi \varphi$ при наличии двух источников

В ходе анализа метода были найдены пути уменьшения вычислительной сложности данного алгоритма. Для уменьшения вычислительной сложности алгоритма можно воспользоваться симметричностью КМ, представленной на рисунке 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	0.9763	1.9059	1.7903	1.6324	1.4359	1.2053	0.9463	0.6648	0.3676	0.0617	-0.2457	-0.5472	-0.8358	-1.1046	-1.3473
2	0.9763	1	1.9763	1.7903	1.6324	1.4359	1.2053	0.9463	0.6648	0.3676	0.0617	-0.2457	-0.5472	-0.8358	-1.1046	-1.3473
3	1.9059	1.9763	1	1.9763	1.9059	1.7903	1.6324	1.4359	1.2053	0.9463	0.6648	0.3676	0.0617	-0.2457	-0.5472	-0.8358
4	1.7903	1.9059	1.9763	1	1.9763	1.9059	1.7903	1.6324	1.4359	1.2053	0.9463	0.6648	0.3676	0.0617	-0.2457	-0.5472
5	1.6324	1.7903	1.9059	1.9763	1	1.9763	1.9059	1.7903	1.6324	1.4359	1.2053	0.9463	0.6648	0.3676	0.0617	-0.2457
6	1.4359	1.6324	1.7903	1.9059	1.9763	1	1.9763	1.9059	1.7903	1.6324	1.4359	1.2053	0.9463	0.6648	0.3676	0.0617
7	1.2053	1.4359	1.6324	1.7903	1.9059	1.9763	1	1.9763	1.9059	1.7903	1.6324	1.4359	1.2053	0.9463	0.6648	0.3676
8	0.9463	1.2053	1.4359	1.6324	1.7903	1.9059	1.9763	1	1.9763	1.9059	1.7903	1.6324	1.4359	1.2053	0.9463	0.6648
9	0.6648	0.9463	1.2053	1.4359	1.6324	1.7903	1.9059	1.9763	1	1.9763	1.9059	1.7903	1.6324	1.4359	1.2053	0.9463
10	0.3676	0.6648	0.9463	1.2053	1.4359	1.6324	1.7903	1.9059	1.9763	1	1.9763	1.9059	1.7903	1.6324	1.4359	1.2053
11	0.0617	0.3676	0.6648	0.9463	1.2053	1.4359	1.6324	1.7903	1.9059	1.9763	1	1.9763	1.9059	1.7903	1.6324	1.4359
12	-0.2457	0.0617	0.3676	0.6648	0.9463	1.2053	1.4359	1.6324	1.7903	1.9059	1.9763	1	1.9763	1.9059	1.7903	1.6324
13	-0.5472	-0.2457	0.0617	0.3676	0.6648	0.9463	1.2053	1.4359	1.6324	1.7903	1.9059	1.9763	1	1.9763	1.9059	1.7903
14	-0.8358	-0.5472	-0.2457	0.0617	0.3676	0.6648	0.9463	1.2053	1.4359	1.6324	1.7903	1.9059	1.9763	1	1.9763	1.9059
15	-1.1046	-0.8358	-0.5472	-0.2457	0.0617	0.3676	0.6648	0.9463	1.2053	1.4359	1.6324	1.7903	1.9059	1.9763	1	1.9763
16	-1.3473	-1.1046	-0.8358	-0.5472	-0.2457	0.0617	0.3676	0.6648	0.9463	1.2053	1.4359	1.6324	1.7903	1.9059	1.9763	1

Рис. 3. Пример корреляционной матрицы

При вычислении КМ размерностью N необходимо вычислить N^2 элементов. При использовании же симметричности нам необходимо $2N-1$ вычислений. Также можно использовать симметричность этой матрицы при вычислении обратной КМ, которая также симметрична (рис. 4).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	0.8549	-0.1400	-0.1315	-0.1200	-0.1056	-0.0887	-0.0697	-0.0491	-0.0273	-0.0049	0.0177	0.0398	0.0610	0.0808	0.0986
2	0.8549	1	0.8626	-0.1316	-0.1227	-0.1109	-0.0964	-0.0797	-0.0610	-0.0410	-0.0199	0.0016	0.0230	0.0439	0.0638	0.0822
3	-0.1400	-0.1316	1	0.8714	-0.1225	-0.1135	-0.1018	-0.0877	-0.0716	-0.0537	-0.0346	-0.0146	0.0057	0.0258	0.0454	0.0638
4	-0.1315	-0.1227	0.8714	1	0.8807	-0.1134	-0.1048	-0.0937	-0.0804	-0.0651	-0.0484	-0.0305	-0.0118	0.0071	0.0258	0.0439
5	-0.1200	-0.1109	-0.1225	0.8807	1	0.8893	-0.1053	-0.0974	-0.0873	-0.0750	-0.0610	-0.0456	-0.0291	-0.0118	0.0057	0.0230
6	-0.1056	-0.0964	-0.1018	-0.1048	0.8893	1	0.8967	-0.0989	-0.0921	-0.0832	-0.0722	-0.0596	-0.0456	-0.0305	-0.0146	0.0016
7	-0.0887	-0.0797	-0.0877	-0.0937	0.8967	0.8967	1	0.9020	-0.0948	-0.0893	-0.0818	-0.0722	-0.0610	-0.0484	-0.0346	-0.0199
8	-0.0697	-0.0610	-0.0716	-0.0804	-0.0921	-0.0989	0.9020	1	0.9048	-0.0934	-0.0893	-0.0832	-0.0750	-0.0651	-0.0537	-0.0410
9	-0.0491	-0.0410	-0.0537	-0.0651	-0.0750	-0.0832	-0.0893	0.9048	1	0.9048	-0.0948	-0.0921	-0.0873	-0.0804	-0.0716	-0.0610
10	-0.0273	-0.0199	-0.0346	-0.0484	-0.0610	-0.0722	-0.0818	-0.0893	0.9048	1	0.9020	-0.0989	-0.0974	-0.0937	-0.0877	-0.0797
11	0.0177	0.0016	0.0146	0.0258	0.0305	0.0456	0.0596	0.0722	-0.0832	-0.0921	1	0.9867	-0.1053	-0.1048	-0.1018	-0.0964
12	0.0398	0.0230	0.0057	-0.0118	-0.0291	-0.0456	-0.0610	-0.0750	-0.0873	-0.0974	0.9867	1	0.8893	-0.1134	-0.1135	-0.1109
13	0.0610	0.0439	0.0258	0.0071	-0.0118	-0.0305	-0.0484	-0.0651	-0.0804	-0.0937	-0.1048	-0.1053	1	0.8807	-0.1225	-0.1227
14	0.0808	0.0638	0.0454	0.0258	0.0057	-0.0146	-0.0346	-0.0537	-0.0716	-0.0877	-0.1018	-0.1135	-0.1225	1	0.8714	-0.1316
15	0.0986	0.0822	0.0638	0.0439	0.0230	0.0016	-0.0199	-0.0410	-0.0610	-0.0797	-0.0964	-0.1109	-0.1227	-0.1316	1	0.8626
16	0.1141	0.0986	0.0808	0.0610	0.0398	0.0177	-0.0049	-0.0273	-0.0491	-0.0697	-0.0887	-0.1056	-0.1200	-0.1315	-0.1400	1

Рис. 4. Пример обратной корреляционной матрицы

Квадрат обратной матрицы также симметричен, что требует проведения меньшего количества вычислений. Её симметричность можно использовать при вычислении разрешающей функции для метода «теплого шума», что позволит уменьшить количество вычислений в 2 раза.

Для увеличения быстродействия можно предложить модификацию, в которой антенная решетка разделяется на две подрешетки. Корреляционная матрица размерностью N разделяется на две КМ размерностью $N/2$, что позволяет уменьшить количество её элементов до $N^2/2$, а также уменьшить количество вычислений в 2 раза. Вместе с тем применение данной модификации приводит к незначительному ухудшению разрешающей способности (рис. 5). Однако если сравнить их при одинаковой вычислительной сложности, то модифицированный метод обладает лучшими разрешающими свойствами, чем оригинальный, что видно из рисунка 6.

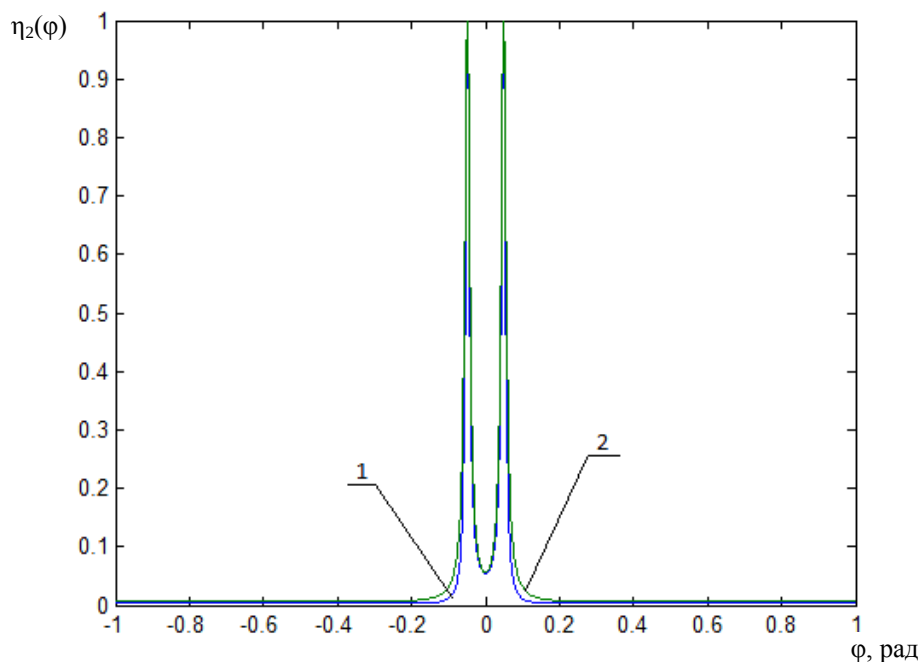


Рис. 5. Зависимости $\eta_2 \varphi = \psi \varphi$ для оригинального (кривая 1) и модифицированного (кривая 2) метода «теплого шума»

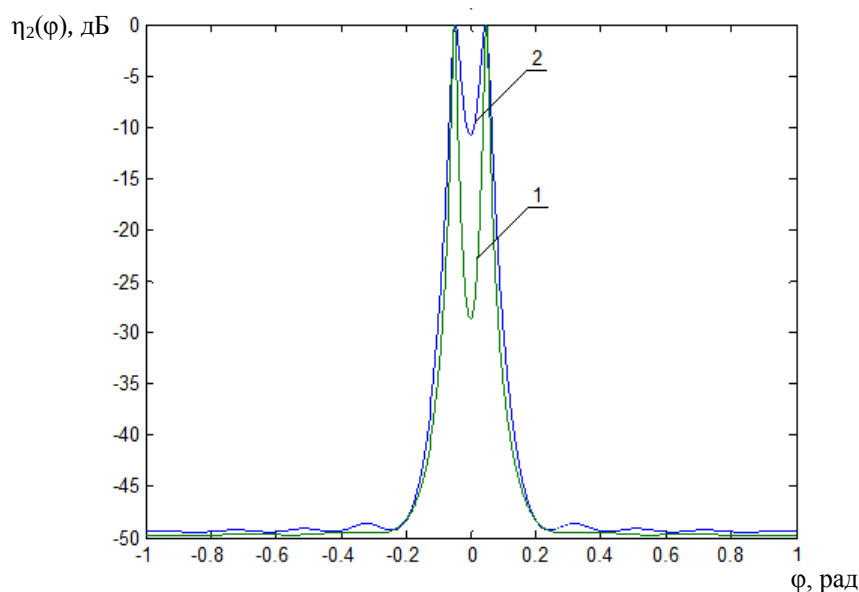


Рис. 6. Зависимости $\eta_2 \varphi = \psi \varphi$ для оригинального (кривая 1) и модифицированного (кривая 2) метода «теплого шума»

Заключение

Проведен анализ метода «теплового шума» для получения сверхразрешения.

Разработаны рекомендации, основанные на симметричности матриц. Это позволяет уменьшить вычислительную сложность алгоритмов и дает возможность упростить их цифровую реализацию.

Представлена модификация для метода «теплового шума», позволяющая уменьшить вычислительную сложность данного алгоритма.

Результаты исследований могут быть использованы в радиопеленгации и радиолокации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлев, А.К. Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках / А.К. Журавлев, А.П. Лукошкин, С.С. Поддубный. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. – 240 с.
2. Караваев, В.В. Статистическая теория пассивной локации / В.В. Караваев, В.В. Сазонов. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.
3. Ширман, Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
4. Монзинго, Р.А. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию / Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
5. Уидроу, Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С. Стирнз; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
6. Куликов, Е.И. Оценка параметров сигналов на фоне помех / Е.И. Куликов, А.П. Трифонов. – М.: Сов. радио, 1978. – 296 с.
7. Пистолькорс, А.А. Введение в теорию адаптивных антенн / А.А. Пистолькорс, О.С. Литвинов. – М.: Наука, 1991. – 200 с.
8. Турчин, В.И. Введение в современную теорию оценки параметров сигналов / В.И. Турчин. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 2005. – 116 с.

Поступила 20.08.2012

***SUPER-RESOLUTION OF LIGHT SOURCES
ON THE BASIS OF “THERMAL NOISE” METHOD***

A. BEZDEL, V. YANUSHKEVICH

The results of theoretical analysis of super-resolution light sources using antenna arrays with the help of “thermal noise” method have been presented. Digital techniques to ensure effective noise reduction features and high-quality processing of radar signals have been applied. The results of studies for one or two light sources are given. The function of the angular resolution of authorization objects is analyzed. Recommendations are given to reduce the computational complexity of algorithms. The method of “thermal noise” has been modified. The results of the research can be used in radio position finding and radiolocation.