

Особенности многоканальной обработки сигналов при квазиколецевом расположении приемных элементов

А.Н. Левченков

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация: Рассмотрены вопросы, связанные с особенностями многоканальной обработки сигналов на основе методов сверхразрешения с использованием системы с квазиколецевым расположением приемников. Проведено сравнение выходной характеристики при использовании классического метода обработки (формируется диаграмма направленности) и метода сверхразрешения (формируется пеленгационный рельеф). В качестве основы алгоритма обработки сигналов использовано свойство 2π -периодичности угловой зависимости характеристик направленности приемников и мощности сигнала.

Представлены основные закономерности обработки сигналов при кольцевом расположении приемников - зависимость угловой ширины главного лепестка диаграммы направленности и пеленгационного рельефа от числа приемников, расстояния между ними, относительной мощности принимаемого сигнала. Отмечено в отличие от классического метода обработки существование зависимости ширины пеленгационного рельефа и уровня пеленгационного рельефа вне главного лепестка не только от числа приемников, но и от относительного уровня мощности принимаемого сигнала.

Исследованы вопросы повышения разрешающей способности по угловому направлению принимаемых сигналов при многоканальной обработке в системе приемников с кольцевым расположением. Показана возможность значительного улучшения разрешающей способности при переходе от классического метода к методу сверхразрешения.

Ключевые слова: многоканальная обработка, диаграммы направленности, Гамильтонов цикл, угловое распределение, кольцевая и квазиколецевая антенная решетка, характеристики направленности, синтез амплитудно-фазового распределения.

Целью работы является анализ особенностей многоканальной обработки сигналов полей различной физической природы (электромагнитных, акустических сейсмических) системой приемников с кольцевым расположением.

Антенные решетки с кольцевым или близким к кольцевому расположением приемников находят широкое применение в радиотехнических, акустических, сейсмических системах для приема

сигналов, приходящих с азимутального направления в секторе углов $[0, 2\pi]$. Геометрия задачи показана на Рисунке 1.

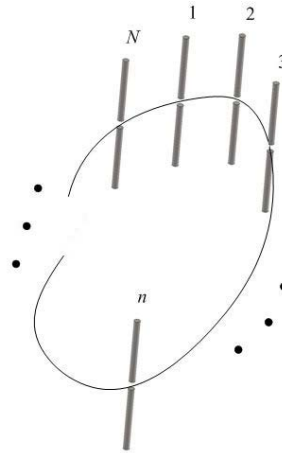


Рис.1. - Геометрия задачи

Одним из наиболее широких применений антенных решеток с кольцевым расположением излучателей является, в настоящее время, применение в радиопеленгаторных системах и системах связи в составе базовых станций [1, 2]. К диаграммам направленности (ДН) таких антенн предъявляются высокие требования по соответствию ширины луча и уровню боковых лепестков (УБЛ) заданным требованиям. В то же время не менее высокие требования могут предъявляться и к антенным решеткам акустических и сейсмических систем, что связано с необходимостью пространственного разрешения источников передаваемых или отражаемых сигналов.

Высокая разрешающая способность достигается использованием методов пространственной обработки, получивших название методов сверхразрешения. Использование указанных методов, как показано в [3-5], позволяет повысить разрешающую способность систем, извлекающих информацию из волн различной физической природы, до значений, меньше рэлеевского предела [6,7]. При этом возможность использования таких более

сложных методов определяется развитием средств цифровой обработки сигналов.

Наиболее простым с точки зрения технической реализации методов сверхразрешения является метод Кейпона. В то же время полученные при рассмотрении данного метода основные закономерности являются достаточно общими и могут быть, как правило, распространены на все методы, основанные на использовании сверхразрешения [1,2]. Однако, несмотря на достаточно большое число работ [3,4], посвященных анализу данного метода, остаются неисследованными вопросы, связанные с особенностями многоканальной обработки сигналов при кольцевом расположении приемников и потенциально достижимыми характеристиками пеленгационного рельефа (ПР) в зависимости от геометрии расположения приемников.

Пусть имеется система N приемников, обеспечивающая прием сигналов, приходящих с различных направлений, лежащих в плоскости расположения приемников (Figure 1). Приемники, координаты которых известны, расположены на замкнутой кривой без самопересечений, в частном случае окружности. Положение каждого приемника характеризуется расстоянием ρ_n от некоторой точки, принятой за начало системы координат, и углом ϕ_n , определяющим положение данного приемника в этой же системе координат. Характеристики направленности каждого приемника, являющихся в общем случае различными, определяются совокупностью функций $\mu_n(\phi)$, $n = 1, \dots, N$. Требуется разработать алгоритм оптимальной обработки сигналов, принимаемых системой приемников с учетом их кольцевого расположения, обеспечивающей минимальную ошибку определения направления прихода сигналов и максимальную разрешающую способность. Учитывая тот факт, что приемники расположены на некоторой кривой (в нашем случае окружности) с заданными расстояниями, получается

задача коммивояжера, решив которую, мы получаем последовательность выбора приемников, обеспечивающую оптимальную обработку сигналов. Решение задачи нахождения Гамильтонова цикла можно найти с помощью некоторой комбинации биоинспирированных алгоритмов. Приведем еще один подход решения данной задачи.

Метод оптимальной обработки

Сигнал $u(t)$ на выходе системы приемников представим в виде:

$$u(t) = Y^T(t)W, \quad (1)$$

$$Y(t) = H(t) + \sum_{l=1}^L S^{(l)}u_l(t), \quad (2)$$

где W , $Y(t)$ и $H(t)$ - соответственно N - мерные вектор-столбцы весовых коэффициентов, сигналов на выходах и тепловых шумов в приемниках; символ « T » обозначает операцию транспонирования; $u_l(t)$ - временная зависимость i -го сигнала; $S^{(l)}$ - вектор-столбец размерности N , определяемый параметрами принимаемого сигнала.

Мощность сигнала на выходе системы приемников при использовании метода Кейпона определяется соотношением [8]

$$P(\phi) = \frac{1}{v^H(\phi)R^{-1}v(\phi)}, \quad (3)$$

где $v(\phi)$ - вектор весовых коэффициентов, определяемых критерием и методом обработки весовых сигналов; R - корреляционная матрица принимаемых сигналов, определяемая соотношением $R = \langle Y(t)Y(t)^* \rangle$; $*$ - знак эрмитового сопряжения; знак $\langle \bullet \rangle$ обозначает операцию накопления по времени.

Источники сигналов, как правило, находятся по отношению к системе излучателей в дальней зоне, определяемой условием

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (4)$$

в котором D - характерный размер системы приемников.

С учетом этого можно считать, что комплексная амплитуда в волновом фронте, соответствующем φ -му сигналу, может быть представлена следующим образом

$$F^{(l)} = \exp(-ik_l \rho \cos(\phi - \Phi_l)), \quad (5)$$

где k_l - волновое число, соответствующее данному l -му процессу; Φ_l - направление прихода сигнала, соответствующее l -му процессу.

Для каждого из L сигналов отклик на выходе n -го приемника может быть определен следующим образом

$$S_n^{(l)} = \mu_n(\phi) F^{(l)}, \quad (n = 1, \dots, N, l = 1, \dots, L) \quad (6)$$

или с учетом соотношения (4) с помощью выражения

$$S_n^{(l)} = \mu_n(\phi) \exp(-ik_l \rho_n \cos(\phi - \Phi_l)). \quad (7)$$

Соотношения (1)-(7) полностью определяют решение задачи в общем случае [13]. Однако с учетом особенностей геометрии расположения приемников возможно выделение ряда зависимостей в аналитической форме, позволяющих установить основные закономерности угловой зависимости мощности принимаемого сигнала от геометрии расположения и характеристик направленности приемников [10,12]. Примерами выделения таких закономерностей являются результаты работ [8-9,11].

Особенностью рассматриваемой в предлагаемой постановке задачи является 2π -периодичность значений параметров расположения приемников и направлений прихода принимаемых сигналов. В соответствии с этим 2π -периодичностью будут обладать характеристика направленности $\mu_n(\phi)$

каждого из источников ($n = 1, \dots, N$) и угловая зависимость мощности на выходе системы приемников $P(\phi)$.

Запишем с учетом свойства 2π -периодичности геометрии задачи и характеристик направленности приемников следующие соотношения [14]

$$\mu_n(\phi) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} A_n^{(p)} \exp(it\phi), \quad (8)$$

$$\exp(-ik_l \rho \cos(\phi - \Phi_l)) = 2 \sum_{t=-\infty}^{\infty} \left\{ (-1)^t \left[\delta_{0t} J_{2t}(k_l \rho) \cos(2t(\phi - \Phi_l)) + i J_{2t+1}(k_l \rho) \cos((2t+1)(\phi - \Phi_l)) \right] \right\}, \quad (9)$$

где $\delta_{0t} = \begin{cases} 0,5 & t=0, \\ 1 & t > 0. \end{cases}$, $J_g(\cdot)$ - функция Бесселя g -го порядка, $A_n^{(p)}$ -

комплексная амплитуда в n -м излучателе p -го процесса.

Использование преобразований (8) и (9) позволяет перейти от физической системы N приемников к системе T виртуальных излучателей, каждый из которых соответствует одному из членов при разложении угловых зависимостей характеристик направленности в ряд (T - число учитываемых гармоник в представлении угловых зависимостей характеристик направленности).

С использованием разработанной модели процесса обработки сигналов при кольцевом расположении приемников проведены исследования закономерностей углового распределения мощности $P(\phi)$ и ДН $F(\phi)$ при различных значениях параметров расположения приемников (параметры расположения излучателей) и принимаемых сигналов (число и относительные мощности).

На рисунках 2-4 приведены угловые зависимости $P(\phi)$ (сплошная линия) и ДН $F(\phi)$ (штриховая линия) системы десяти приемников ($N = 10$)

при различных значениях signal-to-noise ratio (SNR) и двух значениях радиуса кольцевой решетки $\rho_n = \rho$.

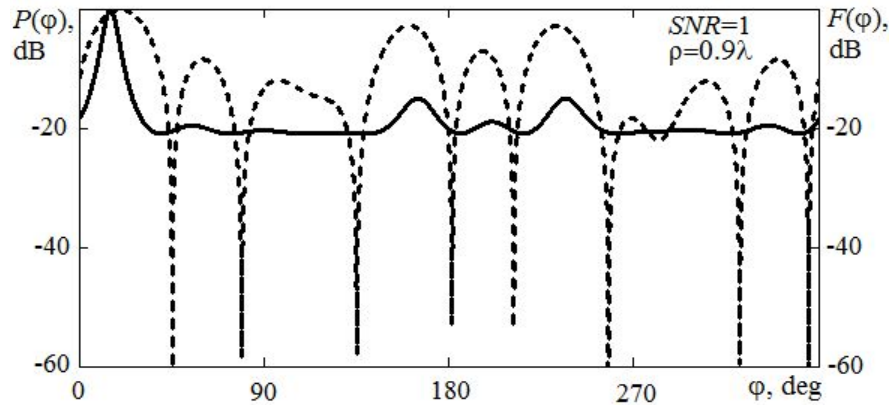


Рис. 2. - Угловое распределение мощности и диаграмма направленности при $SNR = 1$ и $\rho = 0.9\lambda$

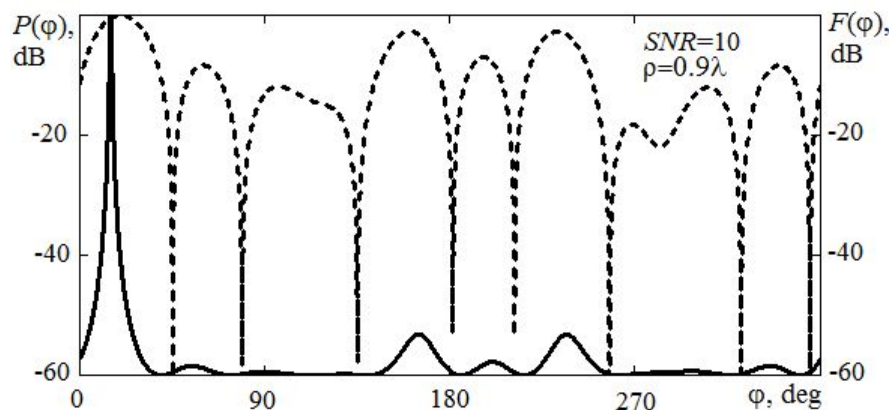


Рис. 3. - Угловое распределение мощности и диаграмма направленности при $SNR = 10$ и $\rho = 0.9\lambda$

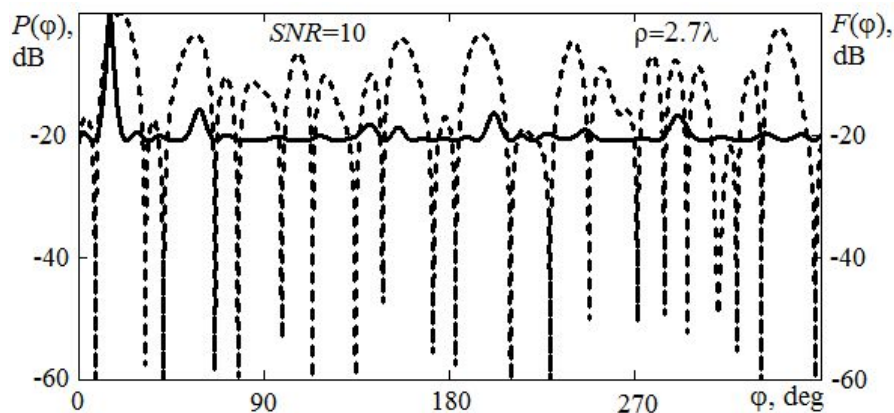


Рис. 4. - Угловое распределение мощности и диаграмма направленности при $SNR = 10$ и $\rho = 2.7\lambda$

Как следует из приведенных результатов, увеличение мощности принимаемого сигнала по отношению к мощности теплового шума в 10 раз не изменяет ДН системы приемников. В то же время при использовании алгоритма сверхразрешения наблюдается уменьшение ширины пика ПР с 6° до $0,6^\circ$ и снижение уровня ПР вне угловой области главного пика на 40 дБ. Указанное свойство определяет возможность повышения точности определения углового положения источника сигнала.

Еще одним интересным с теоретической точки зрения свойством является эффект возникновения дифракционных лепестков в ДН и ПР при увеличении расстояния между приемниками. Исследование данного эффекта позволяет при обработке сигналов уменьшить необходимое число приемников. Сравнение ДН и ПР, приведенных на рисунках 3 и 4 показывает, что увеличение межэлементного расстояния приводит к смещению максимума диаграммы направленности $F(\phi)$. В то же время положение главного максимума ПР остается неизменным. Таким образом, в случае применения алгоритма сверхразрешения при кольцевом расположении приемников позволяет сохранить неизменным положение максимума ПР при увеличении расстояния между приемниками при кольцевом их расположении.

В ходе проведения исследований было отмечено, что уменьшение ширины главного луча ПР по сравнению с ДН позволяет повысить разрешение принимаемых сигналов. Результаты исследований, иллюстрирующих достигаемое повышение разрешающей способности, приведены на рисунках 5 и 6. Анализ приведенных результатов показывает, что при приеме двух сигналов, угловое расстояние между которыми меньше рэлеевского предела, формирование ДН не позволяет обеспечить разрешение двух источников сигналов. При этом при равной мощности сигналов максимум ДН ориентирован в направлении биссектрисы угловых

положений источников сигналов. В случае превышения мощности одного сигнала над другим максимум ДН смещается в направлении источника более мощного сигнала. При использовании алгоритмов сверхразрешения при кольцевом расположении приемников обеспечивается разрешение источников сигналов не только при равных мощностях (рисунок 5), но и при значительном превышении мощности сигнала одного источника над другим.

Выводы

Проведенные в работе исследования позволили выявить ряд особенностей многоканальной обработки сигналов при кольцевом расположении приемников. В частности, можно отметить, что ширина лепестка ПР, формируемого системой приемников зависит не только от геометрического расстояния между приемниками и их числа, но и от отношения мощности принимаемого сигнала к мощности теплового шума в канале обработки приемника. Кроме того, использование алгоритмов сверхразрешения позволяет значительно увеличить расстояние между приемниками, при котором отсутствует эффект возникновения дифракционных лепестков.

Еще одной важной особенностью многоканальной обработки при кольцевом расположении приемников является повышение разрешающей способности при приеме сигналов, практически независимо от соотношения их мощностей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-01-00391

Литература

1. Саломатов Ю.П., Панько В.С., Сугак М.И. Кольцевые излучатели и антенные решетки / Под ред. Саломатова Ю.П., СПб.:Изд-во СПбГТУ "ЛЭТИ", 2014. С.16-41.
2. Виноградов А.Д., Литвинов А.С., Оптимизация структуры малоэлементной антенной решетки широкополосного корреляционно-интерферометрического радиопеленгатора // Антенны, 2003. Вып.2 (69). С.32-36.
3. Пистолькорс А.А., Литвинов О.С. Введение в теорию адаптивных антенн. М.: Наука, 1991. С.5-15.
4. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь. 2003. С. 51-56.
5. Григорьев В..А. Комбинированная обработка сигналов в системах радиосвязи.- М.: Эко-трендз, 2002. С. 71-79.
6. Johnson, D.H., Miner G.E. Comparison of. superresolution algorithm for radio direction finding // *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*,1986. Vo.22. № 4. pp. 432-441.
7. Литвинов О.С.. Алгоритм сверхразрешения по методу Кейпона при обработке сигналов в адаптивной антенной решетке с неидентичными каналами // Антенны. 2004. Вып.8-9 (87-88). С.72-79.
8. Габриэльян Д.Д., Лысенко А.В. Особенности формирования пеленгационного рельефа плоской антенной решетки при использовании методов сверхразрешения // Успехи современной радиоэлектроники.-2013. № 8. С.88-93.
9. Габриэльян Д.Д., Лысенко А.В. Пеленгационный рельеф прямоугольной фазированной антенной решетки при использовании метода Кейпона // 23 Международная Крымская конференция СВЧ-техника и

информационные технологии. Материалы конференции. 8-13 сентября 2013 г. Севастополь, Крым, Украина. С. 568-569.

10. Gabriel'yan D.D., Zvezdina M.Yu., Shokova A.V., Ogayan P.S. Potentially Achievable Characteristics Analysis for Superresolution Techniques // Journal of Electrical and Control Engineering 2013. Vol.3, 4. pp.17-20.

11. Митько В.Н., Эсси-Эзинг А.С. Проектирование и моделирование антенны гидролокатора бокового обзора // Инженерный вестник Дона, 2016, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2016/3534/.

12. Кириченко М.А. Повышение эффективности направленных свойств адаптивных гидроакустических систем с параметрическими антеннами // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3845/.

13. Габриэльян Д.Д., Левченков А.Н., Федоров Дан. С., Федоров Ден. С. Методика определения амплитудно-фазового распределения в квазиколецевой антенне // Инженерный вестник Дона, 2017, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/40205/.

14. Справочник по специальным функциям. Под ред. Абрамовича М. и Стригана И. - М.: Наука, Гл. ред. Физ.-мат.лит., 1979. 47 с.

References

1. Salomatov Ju.P., Panko V.S., Sugak M.I. Kolcevye izluchateli i antennye reshetki [Ring emitters and antenna arrays]. Pod red. Salomatova Ju.P., SPb.:Izd-vo SPbGTU "LJeTI", 2014. pp. 16-41.

2. Vinogradov A.D., Litvinov A.S., Antenny, 2003.Vyp.2 (69). pp.32-36.

3. Pistol Kors A.A., Litvinov O.S. Vvedenie v teoriju adaptivnyh antenn [Introduction to Adaptive Antenna Theory]. M.: Nauka, 1991. pp. 5-15.

4. Ratynskij M.V. Adaptacija i sverhrazreshenie v antennyh reshetkah [Adaptation and Super Resolution in Antenna Arrays]. M.: Radio i svjaz. 2003. pp. 51-56.
 5. Grigor'ev V.A. Kombinirovannaja obrabotka signalov v sistemah radiosvjazi [Combined signal processing in radio communication systems]. M.: Jeko-trendz, 2002. pp. 71-79.
 6. Johnson, D.H., Miner G.E. Comparison of. superresolution algorithm for radio direction finding. IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst., 1986. Vol.22. № 4. pp. 432-441.
 7. Litvinov O.S. Antenny. 2004. Vyp.8-9 (87-88). pp.72-79.
 8. Gabrijeljan D.D., Lysenko A.V. Uspehi sovremennoj radioelektroniki. 2013. № 8. pp.88-93.
 9. Gabrijeljan D.D., Lysenko A.V. Pelengacionnyj relief prjamougolnoj fazirovannoj antennoj reshetki pri ispol'zovanii metoda Kejpona [Directional relief of a rectangular phased antenna array using the Cape Method].23 Mezhdunarodnaja Krymskaja konferencija SVCh-tehnika i informacionnye tehnologii. Materialy konferencii. 8-13 sentjabrja 2013 g. Sevastopol', Krym, Ukraina. pp. 568-569.
 10. Gabriel'yan D.D., Zvezdina M.Yu., Shokova A.V., Ogayan P.S. Journal of Electrical and Control Engineering 2013. Vol.3, 4. pp.17-20.
 11. Mitko V.N., Jessi-Jezing A.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2016/3534/.
 12. Kirichenko M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3845/.
 13. Gabrijeljan D.D., Levchenkov A.N., Fedorov Dan.S., Fedorov Den. S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/40205/.
-



14. Spravochnik po special'nyh funkcijam [Special Features Reference].
Pod red. Abramovicha M. i Strigana I. M.: Nauka, Gl. red. Fiz.-mat.lit., 1979. 47
p.