

ОБРАБОТКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

И. И. ГОРБАНЬ

*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины,
проспект Глушкова, 42, Киев, 03187, Украина,
тел. +38 (099) 791-0781, эл. почта: igor.gorban@yahoo.com.*

В докладе представлены основные положения двух разработанных автором теорий: теории оптимальной пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов, учитывающей в комплексе сложное перемещение антенны в пространстве, особенности действующих помех и неоднородность среды распространения колебаний, а также теории быстрой многоканальной пространственно-временной обработки сигналов для антенн сложной формы и подвижных антенн.

The main results of two theories developed by the author are presented. They are the optimization theory of space-time processing of hydroacoustical signals with account of complex antenna motion, noise, and non-uniform propagation medium together, and the theory of fast multichannel space-time signal processing for antennas with complicated form and moving antennas.

ВВЕДЕНИЕ

Подавляющее большинство гидроакустических систем работает в сложных динамических условиях. В результате волнения океана, подводных течений, движения носителя и других дестабилизирующих факторов антенны этих систем постоянно меняют свое местоположение и ориентацию в пространстве. Некоторые из них, например гибкие протяженные буксируемые антенны (ГПБА), изменять форму в процессе работы. Перемещения антенны и ее элементов, как правило, столь значительны, что игнорировать движение нельзя.

В 80 – 90-х годах автором была разработана теория пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов, учитывающая в комплексе сложное движение антенн, особенности гидроакустических сигналов, помех и среды распространения колебаний, а также теория быстрой многоканальной пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС) для антенн сложной конфигурации и подвижных антенн.

Основные положения этих теорий нашли отражение в ряде публикаций автора, послужили основой курса лекций [1] и легли в основу монографий [2, 3].

Цель доклада – представить основные положения и результаты разработанных теорий.

ТЕОРИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Теория ПВОС в сложных динамических условиях, учитывающая в комплексе сложное движение антенн, особенности гидроакустических сигналов, помех и среды распространения колебаний, построена по классической схеме и состоит из двух частей: синтеза алгоритмов оптимальной обработки и анализа эффективности работы систем обработки.

Задача синтеза алгоритмов рассмотрена для квазидетерминированных и стохастических сигналов, принимаемых на фоне гауссовских помех в сложных гидрологических

и динамических условиях, предполагающих многолучевое и многомодовое распространение колебаний и сложные перемещения антенны в пространстве с шестью степенями свободы, а в некоторых случаях и с изменением формы антенны. В качестве критерия оптимальности выбран максимум функции правдоподобия.

Предложены три подхода решения оптимизационной задачи для квазидетерминированных сигналов и два – для стохастических, позволяющие находить структуру оптимальной обработки в разных помеховых и динамических условиях. Эти подходы использованы для синтеза ряда алгоритмов обработки, учитывающих многокомпонентный состав помехи, неоднородность среды распространения колебаний и сложное перемещение антенны в пространстве.

Задача анализа эффективности работы систем обработки в сложных динамических условиях рассмотрена в двух ракурсах: оценки потенциальной точности совместного измерения частотно-угловых параметров сигнала (на основе оценок Крамера – Рао) и оценки помехоустойчивости систем обработки.

Исследования привели к неожиданным и парадоксальным, на первый взгляд, результатам:

- сложное движение антенны, вызываемое волнением океана, создает предпосылки для повышения точности измерения частотно-угловых параметров сигналов и повышения помехоустойчивости систем пространственно-временной обработки;
- при сложном движении антенны потенциальная точность измерения угловых параметров сигнала определяется не размерами антенны, как в статических условиях, а размерами области, в которой перемещается антенна. При сильном волнении океана появляется реальная возможность существенно повысить точность измерения угловых параметров сигнала при использовании антенн малых размеров;
- повышение точности измерения угловых параметров сигнала имеет место даже в том случае, когда неизвестна частота сигнала или доплеровский сдвиг частоты, и др.

Некоторые результаты расчетов помехоустойчивости различных систем ПВОС с линейной горизонтальной антенной, работающей в условиях неоднородной среды распространения колебаний и двукомпонентной помехи, содержащей некоррелированную и локальную стохастическую составляющие, приведены на рис. 1. Рисунок *a* соответствует системе обработки когерентного, а *б* – стохастического сигналов. По оси абсцисс отложен пеленг локальной составляющей помехи, а по оси ординат – отношение сигнал-помеха (ОСП).

Кривые *1* получены для неоптимальных систем, игнорирующих наличие локальной составляющей помехи и факт поворота антенны (угол поворота антенны за время обработки сигнала составляет 10°), *2* – для оптимальных систем обработки, работающих в статических условиях, *3* – для систем, игнорирующих наличие локальной составляющей помехи и неоднородный характер среды распространения колебаний, но учитывающих факт поворота антенны неоптимальным образом (в этих системах главный лепесток функции неопределенности отслеживает изменения углового положения антенны в пространстве так, что в любой момент времени он оказывается ориентированным в направлении на сигнал), *4* – для систем, в которых игнорируется локальная составляющая помехи, а факт поворота антенны учитывается неоптимальным образом (также как и в случае кривых *3*), *5* – для систем, полностью согласованных с помехой, сигналом, особенностями среды распространения колебаний и параметрами движения антенны. Неоднородный характер среды распространения колебаний моделировался с помощью функций Грина.

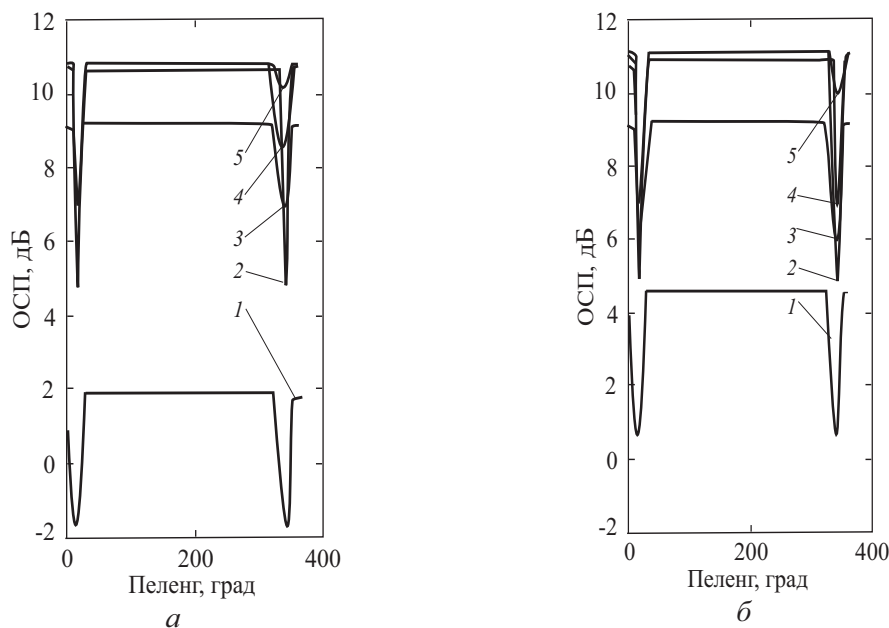


Рис. 1.

При этом полагалось, что сигнал и локальная составляющая помехи имеют трехлучевую структуру.

Из рисунка следует, что игнорирование факта движения антенны и локальной составляющей помехи приводит к существенным потерям помехоустойчивости. Корректный учет перемещения антенны в пространстве позволяет решить проблему устранения неоднозначности определения направления прихода сигнала. Высокую эффективность систем ПВОС можно обеспечить лишь при комплексной оптимизация обработки с учетом всех особенностей и параметров движения антенны в пространстве, сигналов, помех и среды распространения колебаний.

Исследования показали, что волнение океана, традиционно рассматриваемое как выраженный дестабилизирующий фактор, может способствовать улучшению характеристик гидроакустических станций. Это создает предпосылки для формирования взамен общепринятой стратегии борьбы с дестабилизирующими факторами новой стратегии использования дестабилизирующих факторов в интересах повышения потенциала гидроакустических средств.

ТЕОРИЯ БЫСТРОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЛЯ АНТЕНН СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ И ПОДВИЖНЫХ АНТЕНН

Как правило, алгоритмы ПВОС для подвижных антенн значительно сложнее, чем для неподвижных антенн. Количество каналов, по которым необходимо проводить такую обработку, достигает сотен тысяч и более. Реализация сложной обработки по столь большому числу каналов – серьезная проблема. Перспективным путем ее решения является использование высокоэкономичных в вычислительном отношении быстрых алгоритмов, таких как быстрое преобразование Фурье (БПФ) и быстрая свертка.

В 60 – 70-х годах [4, 5] для статических линейных и кольцевых антенн были предложены на основе БПФ и быстрой свертки быстрые алгоритмы формирования веера

характеристик направленности. Основная сложность применения таких алгоритмов для многоканальной ПВОС в более сложных случаях заключается в том, что требуемые для обработки сигналов преобразования существенно отличаются от преобразования Фурье или свертки. К тому же, в динамических условиях тип преобразования постоянно меняется.

Для реализации высокоэкономичной в вычислительном отношении сложной многоканальной ПВОС для антенн сложной конфигурации и подвижных антенн автором были разработаны два метода обработки: с расширением выборки поля и секционированной обработки. Оба метода применимы для антенн сложной формы и подвижных антенн. Их основой являются быстрые функциональные преобразования – БПФ и быстрая свертка.

Показано, что быстрый алгоритм с расширением выборки поля может быть эффективно использован при слабокоррелированной помехе, однако практически не эффективен при наличии сильнокоррелированных помех.

Быстрый же алгоритм секционированной обработки лишен этого недостатка и обеспечивает экономичную многоканальную обработку сигналов при наличии многокомпонентных помех, содержащих локальные составляющие. Он одинаково эффективен как для неподвижных, так и подвижных антенн, подверженных сложным перемещениям в пространстве. Выигрыш от использования быстрой секционированной обработки составляет многие десятки и сотни раз.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ ТЕОРИЙ

Основные положения новых теорий были подтверждены множеством экспериментов, в частности, проведенных в научных экспедициях в Тихом и Северно-Ледовитом океанах.

Разработанные теории использованы в ряде разработок, в частности, ГАС «Кентавр-СК», станциях серии «Звезда» и др. На базе ГАС «Кентавр-СК» в России недавно была создана ГАС «Виньетка - ЭМ», а на базе ГАС «Звезда» – ГАС «Заря МЭ».

Новые методы обработки гидроакустических сигналов нашли применение в отечественной морской береговой РЛС МР-244-2М.

ВЫВОДЫ

Из разработанных теорий следует:

1. точность измерения частотно-угловых параметров сигнала и помехоустойчивость систем обработки оказывается выше в сложных динамических условиях, чем в статических условиях. Наблюдается парадоксальное явление: дестабилизирующие факторы, приводящие к сложным перемещениям антенны в пространстве, способствуют повышению качества обработки сигнала;
2. стратегия оптимизации обработки сигнала с учетом реальных условий эксплуатации представляется более предпочтительной, чем стратегия борьбы с дестабилизирующими факторами, вызывающими сложные перемещения антенны в пространстве;
3. в интересах повышения точности измерения параметров сигнала и помехоустойчивости систем ПВОС иногда целесообразно создавать условия, при которых дестабилизирующие факторы вызывают более сильные и сложные перемещения ан-

тенны в пространстве (например, размещать антенну как можно дальше от центра массы носителя, работать на циркуляции и др.);

4. в системах с линейной антенной динамические эффекты могут быть эффективно использованы для устранения неоднозначности определения направления прихода сигнала;
5. повышение качества систем ПВОС может быть достигнуто за счет комплексной оптимизация обработки с учетом всех особенностей и параметров движения антенны в пространстве, сигналов, помех и среды распространения колебаний. Частичная оптимизация, игнорирующая некоторые особенности условий работы системы ПВОС приводит к потерям качества;
6. разработанная быстрая секционированная обработка, может быть эффективно использованы при многоканальной ПВОС в сложных динамических условиях, как при некоррелированных, так и коррелированных помехах. Вычислительные затраты, необходимы для реализации такой многоканальной ПВОС, существенно меньше, чем для реализации обычной обработки.
7. результаты разработанных теорий подтверждены натурными экспериментами и использованы при построении ряда гидроакустических станций для надводных кораблей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gorban I.I. New approach in optimization of space-time signal processing in hydroacoustics. Nice, France: The course notes of the tutorial on the conference IEEE Ocean'98. 1998.
2. Горбань И.И. Обработка гидроакустических сигналов в сложных динамических условиях. К.: Наукова думка, 2008.
3. Gorban I.I. Mobile Sonar Systems: Optimization of Space-Time Signal Processing – Kiev: Naukova dumka, 2008. – 240 p.
4. Williams J.R. Fast beamforming algorithm // J. Acoust. Soc. Am. – 1968. – Vol. 44. – P. 1455.
5. Farrier D.R., Durrani T.S., and Nightingale J.M. Fast beamforming techniques for circular arrays // J. Acoust. Soc. Am. – 1975. – Vol. 58 (4). – P. 920 – 922.