

ранее сглаживающего оператора, применяемого на каждой итерации, тем самым значительно увеличилась скорость работы алгоритма.

В результате проведенного моделирования установлено, что модифицированный алгоритм по евклидовой норме остается ближе к истинному изображению, чем исходный, при различных уровнях шумов. Были продемонстрированы изображения восстановленные модифицированным и исходным методом при разных уровнях шумов, из которых видно, что при больших шумах в алгоритме Катковника теряются малоразмерные детали, в тоже время у модифицированного алгоритма этого эффекта не наблюдается.

#### Список использованных источников

1. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А.Сойфера. – М.: Физматлит, 2001. – 784 с.
2. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач.-М.: Наука, 1986.-256 с.
4. Горячкин О.В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи. – М.: Радио и связь, 2003. – 230с.
5. Katkovnik V., Paliy D., Egiazarian K., Astola J. Frequency domain blind deconvolution in multiframe imaging using anisotropic spatially-adaptive denoising // EUSIPCO, 2006. - С.5.

## СЛЕПАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ РАДИОТЕХНИКИ И СВЯЗИ

О.В. Горячкин

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара

В общем виде задачу слепой обработки сигналов (СОС) (blind signal processing) можно сформулировать как цифровую обработку неизвестных сигналов, прошедших линейный канал с неизвестными характеристиками на фоне аддитивных шумов.

«Слепая проблема» часто возникает при обработке сигналов в системах радиотехники, в том числе в системах радиолокации, радионавигации, радиоастрономии, цифрового телевидения; в системах радиосвязи; в задачах цифровой обработки речи, изображений [1-7].

Различают два основных типа задач слепой обработки сигналов: слепая идентификация канала (оценка неизвестной импульсной характеристики или передаточной функции), слепое выравнивание (или

коррекция) канала (непосредственная оценка информационного сигнала). В обоих случаях для обработки доступны только реализации наблюдаемого сигнала.

В случае слепой идентификации оценка импульсной характеристики может далее использоваться для оценки информационной последовательности, т.е. является первым этапом слепого выравнивания или коррекции.

Задачи слепой обработки предполагают широкий класс моделей для описания наблюдаемых сигналов. В наиболее общем случае непрерывная модель системы описывается следующим выражением:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(t, \tau)x(\tau)d\tau + v(t) \quad (1)$$

где  $y(t)$  – наблюдаемый векторный сигнал со значениями в  $C^m$ ,  $H(t, \tau)$  –  $m \times n$  неизвестная матрица импульсных характеристик (ИХ) с элементами  $\{h_{i,j}(\tau)\}$ ;  $v(t)$  – аддитивная помеха (векторный случайный процесс со значениями в  $C^m$ , как правило с независимыми компонентами);  $x(\tau)$  – неизвестный информационный сигнал со значениями в  $C^n$

Системы, описываемые выражением (1) называют системами с множественным входом и множественным выходом (в англоязычной литературе Multiple-Input Multiple-Output или MIMO).

В частном случае, когда  $H(t, \tau) = H(t - \tau)$ , мы имеем случай стационарной системы, при этом (1) имеет вид:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(t - \tau)x(\tau)d\tau + v(t) \quad (2)$$

Если компоненты матрицы  $H(\tau)$  имеют вид  $\{h_{i,j}\delta(\tau)\}$ , мы получаем модель, используемую в задачах слепого разделения источников (Blind Source Separation или BSS) [4]:

$$y(t) = H \cdot x(t) + v(t), \quad (3)$$

где  $H$  –  $m \times n$  неизвестная, комплексная, т.н. «смешивающая» матрица с элементами  $\{h_{i,j}\}$ ;  $x(\tau)$  – неизвестные сигналы.

В частном случае, когда сигналы источников являются реализациями стационарных, статистически независимых друг от друга случайных

процессов, мы имеем задачу, которую в последние годы все чаще называют анализом независимых компонент [6] (АНК).

При этом модель, используемую в анализе независимых компонент, часто представляют в виде:

$$y = H \cdot x + v, \quad (4)$$

где  $y$  и  $v$  – случайные векторы,  $x$  – случайный вектор с независимыми компонентами,  $H$  – детерминированная неизвестная матрица.

Задача АНК формулируется как задача поиска такой проекции вектора  $y$  на линейное пространство векторов  $x$  компоненты которой статистически независимы. При этом доступна только некоторая выборка случайного вектора  $y$  и известна статистика шумового вектора  $v$ .

АНК является некоторым развитием хорошо известного в статистике метода принципиальных компонент, где вместо более сильного свойства статистической независимости используется свойство некоррелированности.

Если в (2)  $n = 1$  и  $m > 1$ , то модель системы может быть описана более простым выражением:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau)x(\tau)d\tau + v(t), \quad (5)$$

где  $h(\tau)$  – неизвестная импульсная характеристика  $m$ -мерного канала,  $x(\tau)$  – неизвестный комплексный информационный сигнал со значениями в  $\mathbb{C}$ .

Системы, описываемые моделями вида (5), называют системами с одним входом и множественным выходом (Single-Input Multiple-Output или SIMO).

В случае, если  $n = 1$  и  $m = 1$ , то мы имеем модель системы с одним входом и выходом (Single-Input Single-Output или SISO):

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau)x(\tau)d\tau + v(t). \quad (6)$$

Задачи слепой идентификации канала на основе моделей (5) и (6) далее мы будем называть задачами стационарной слепой идентификации векторного и скалярного канала соответственно.

Поскольку задачи СОС исторически возникали в различных приложениях цифровой обработки сигналов и изображений, поэтому достаточно часто решение этих задач строилось на учете специфики конкретных приложений. По мере накопления результатов в последние годы создались предпосылки для построения систематической теории решения «слепой проблемы».

Часто задачи СОС (слепая идентификация и слепая коррекция канала) являются сопутствующими задачами, которые приходится решать в процессе извлечения информации из искаженных сигналов. В то же время, как основная задача состоит в обнаружении, различении или оценке параметров искаженных сигналов. В этих случаях иногда неэффективно разделять задачи слепой идентификации или коррекции и собственно традиционные задачи извлечения информации из сигналов радиотехнических систем. Например, пусть сигнал ФМ-2 проходит неизвестный канал с ограниченной полосой пропускания. Слепая идентификация такого канала возможна, а слепая коррекция нет. Однако, после решения задачи слепой идентификации канала, решение задачи демодуляции такого сигнала не вызывает каких-либо трудностей, кроме известных проблем с влиянием аддитивных шумов. В этой связи более корректно классифицировать данную задачу как задачу слепой демодуляции. Аналогично можно определить задачу слепого обнаружения сигналов, задачу слепого оценивания параметров, слепого разрешения и фильтрации сигналов. Не менее актуальна задача слепого корреляционного и спектрального анализа сигналов.

Все вышеперечисленные задачи СОС часто встречаются в системах радиотехники и связи, например:

**В практике радиорелейных систем передачи информации,** рассчитанных на высокоскоростную передачу через каналы с различного вида рассеянием, ИХ радиоканала, как правило, неизвестна с достаточной точностью для возможности синтеза оптимальных модуляторов и демодуляторов.

**В системах подвижной радиосвязи** в диапазоне от 1000 – 2000 МГц многолучевой характер распространения сигнала вызван в основном переотражениями радиоволн от зданий и сооружений, особенностями рельефа. Подобные эффекты возникают и в подводных акустических каналах [5].

**В системах цифровой транкинговой связи, использующих TDMA, системах удаленного радиодоступа, локальных офисных радиосетях** каналы также характеризуются существенным временным рассеянием и замираниями. Сходные проблемы могут возникать, например, в спутниковых системах глобальной радионавигации.

Тенденции развития современных систем связи характеризуются все более ужесточающимися требованиями к максимальному использованию объема канала. В системах последовательной передачи дискретных сообщений по каналам, характеризующимся возникновением эффекта межсимвольной интерференции, оценка рассеяния с помощью тестирования канала испытательным импульсом - ключевая технология реализации эквалайзеров различного типа. Однако время (от 20% до 50%), затрачиваемое на тестирование канала, - все более привлекательный ресурс для

модернизации стандартов TDMA. Альтернативой тестированию канала в этих системах является использование методов слепой обработки сигналов.

Априорная неопределенность в рассматриваемом контексте может возникать не только вследствие прохождения информационных сигналов систем передачи через неизвестный искажающий канал, но и в случаях неизвестной структуры и параметров тестовых сигналов, используемых в системе передачи. Подобная проблема может возникнуть в задачах радиоразведки и радиоконтроля.

Методы СОС могут найти эффективные приложения в хаотических системах связи. В последние годы большой интерес исследователей в области связи вызывает возможность использования шумовых сигналов.

В задачах цифрового телевидения линейные искажения возникают в результате передачи телевизионного сигнала по радиоканалу, характеризующемуся переотражениями от элементов рельефа или городской застройки, а также в результате ограничения полосы пропускания в аналоговых системах записи и хранения телевизионного сигнала.

В современной радиолокации использование для зондирования все более широкополосных электромагнитных импульсов напрямую связано с увеличением временной разрешающей способности и, следовательно, информативности этих систем. Однако влияние тракта и среды распространения радиоволн возрастает пропорционально полосе частот используемых сигналов, что часто приводит к потере когерентности системы. Особенно этот эффект существенен для сверхширокополосной радиолокации. Задачу слепой обработки сигналов в данном случае можно сформулировать как проблему оптимального когерентного приема неизвестных сигналов, отраженных от протяженного объекта конечных размеров.

Такая проблема возникает в частности, при активной радиолокации космических объектов через атмосферу Земли в РЛС противозушной и космической обороны, системах предупреждения о ракетном нападении. Помимо военного применения подобные РЛС используются в задачах контроля за космическим «мусором», который за 40 лет космической эры заполняя околоземное космическое пространство, создает все больше проблемы для космической деятельности человечества.

В системах радиоразведки и системах радиоэлектронной борьбы и радиопротиводействия актуальной является проблема слепого разделения источников радиоизлучения, адаптации диаграмм направленности активных фазированных решеток к создаваемой противником помеховой обстановке.

Радиолокация поверхности Земли с летательных аппаратов с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) за последние 30 лет прошла путь от единичных научных экспериментов до устойчиво

развивающейся отрасли дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [2]. Расширение областей применения РСА стимулирует постоянный рост требований к их пространственному разрешению, а также освоению новых частотных диапазонов.

При этом становится все более значимым эффект деградации пространственного разрешения радиолокационных изображений (расфокусировка), который возникает в этих системах вследствие погрешности траекторных измерений, влияния среды распространения, движения цели.

Задача непараметрической фокусировки (слепой идентификации) в РСА возникает в основном вследствие эффектов распространения сигналов РСА в атмосфере и характерна в большей степени для РСА космического базирования и авиационных РСА, уровень пространственного разрешения которых достигает единиц сантиметров и требует использования сверхширокополосных сигналов.

**Задача компенсации линейных искажений в системах формирования изображений** является одним из самых массовых приложений СОС. В отличие от активной радиолокации коррекция линейных искажений изображений различного происхождения (радиометрических, радиоастрономических, оптических, акустических, рентгеновских, инфракрасных) это задача восстановления двумерного, пространственно ограниченного, неотрицательного сигнала [4,5], искаженного линейным оператором.

Слепая коррекция изображений (blind image deconvolution) задача, возникающая в случае отсутствия априорной информации об ИХ канала формирования. Особенно актуальна задача слепой коррекции линейных искажений изображений в задачах дистанционного зондирования Земли, астрономии, медицине.

Одна из центральных проблем в практике приложений нейронных сетей, статистике, задачах ЦОС - это задача нахождения наиболее компактного представления данных. Это важно для последующего анализа, которым может быть распознавание образов, классификация и принятие решений, сжатие данных, фильтрация шумов, визуализация.

Одно из перспективных направлений развития современных систем ДЗЗ является синхронная съемка земной поверхности в различных диапазонах электромагнитного спектра. Совместная обработка многозональных оптических изображений, многочастотных и многополяризационных радиолокационных изображений, радиометрических изображений - перспективное направление исследований и практических приложений последнего времени.

Разработка технологий совместного анализа изображений различной природы включает в себя разработку методов визуализации, классификации,

сегментации, сжатия данных. При этом, как правило, стремятся сократить число признаков автоматической классификации объектов, обеспечить их наглядное представление (визуализацию), сократить объемы хранимой информации. Мощным инструментом для совместного анализа изображений могут стать методы АНК.

Поскольку изображения, формируемые радиотехническими системами (радиолокаторы бокового обзора, РСА, радиометры) имеют существенно негауссову статистику, то применение нелинейных методов АНК может существенно расширить возможности данных приложений.

Классическим приложением АНК и методов слепого разделения источников являются **биомедицинские компьютерные технологии**.

Возможности цифровой обработки электрокардиограмм, энцефалограмм, электромиограмм, магнитоэнцефалограмм существенно расширили возможности диагностики широкого класса заболеваний. Особенностью применения данных методов является необходимость разделения сигналов изучаемых органов от шумов различного происхождения и мешающих сигналов (например, разделение кардиограмм матери и ребенка). В этих технологиях находят своё прямое применение методы слепого разделения источников и анализа независимых компонент.

**Проблема распознавания речи** - ключевая задача во многих областях робототехники и кибернетики. Технологии распознавания речи могут использоваться для управления действием различного рода машин и механизмов, ввода и поиска данных в компьютере и т.п.

В системе регистрации звуковой информации доступный для распознавания сигнал это свёртка первоначального речевого сигнала и импульсной характеристики датчика и окружающей среды.

При этом параметры датчика также как и параметры среды изменяются чрезвычайно. Телефонные трубки различаются по степеням искажения, спектрального состава и уровням сигнала. Микрофоны изготавливаются разнообразными способами и расположены в различных позициях телефонной трубки, с отверстиями различных размеров, расположены в различных точках в пределах звукового поля вокруг рта. Устройство распознавания, которое хорошо подходит для одного специфического датчика в одной специфической среде, могло бы работать очень плохо в других условиях. Поэтому, желательно, чтобы эти параметры не влияли на работу алгоритма распознавания. Слепая идентификация используется в данной задаче для восстановления первоначального речевого сигнала. Борьба с реверберацией необходима в тех случаях, когда первоначальный речевой сигнал искажён акустикой окружающей среды, т.е. акустика окружающей среды зависит от геометрии и материалов комнаты и местоположения микрофона. Так как первоначальный речевой сигнал

неразличим и акустика окружающей среды неизвестна, слепая идентификация может использоваться в адаптивной борьбе с реверберацией.

Одной из показательных задач, иллюстрирующих проблематику слепого разделения независимых источников, является т.н. проблема разделения нужного разговора на фоне других говорящих людей, музыки, посторонних шумов (cocktail party problem). Мы можем заметить, что наш мозг легко с этим справляется, в тоже время, для компьютера это очень сложная задача.

Прикладное значение эта проблема имеет, например, для разработки адаптивных систем прослушивания при записи звуковой информации на несколько микрофонов, установленных в помещении.

**В задачах геологии, сейсмологических исследованиях** используются технологии регистрации сигналов источников механических или электрических колебаний (забойные телеметрические системы), как искусственного происхождения (закладка в шурф динамита) так и естественного (землетрясение). Эти сигналы используются для оценки коэффициентов отражения различных пластов земной коры. Слепая проблема возникает здесь вследствие непредсказуемости и соответственно неопределенности формы возбуждающего импульса.

#### **Список использованных источников**

1. Горячкин О.В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи. – М.: Радио и связь, 2003. – 230с.
2. Басараб М.А., Волосюк В.К., Горячкин О.В. и др. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / Под ред. Кравченко В.Ф. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 544с.
3. Abed-Meraim K., Hua W. Qiu, Y. Blind System Identification // IEEE Proceeding. - 1997. - vol.85. - P.1308-1322.
4. Cardoso J. Blind signal separation: statistical principles // Proceedings of the IEEE. - 1998. - vol.9. - N10. - P.2009-2025.
5. Cichocki A., Amari S. Adaptive blind signal and image processing. – John Wiley & Sons Ltd. - 2002.
6. Comon P. Independent component analysis: a new concept? // Signal Processing. - 1994. – Vol. SP-36. – P. 287-314.
7. Kundur D., Hatzinakos D. Blind Image Deconvolution: An Algorithmic Approach to Practical Image Restoration // IEEE Signal Processing Magazine. – 1996. - №4. – P.1-42.