

УДК 621.391.2 : 519.24

СОПРОВОЖДЕНИЕ НЕСКОЛЬКИХ ОБЪЕКТОВ В СЕЙСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ

С. А. Алямкин, Е. С. Нежевенко

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: nejevenko@iae.nsk.su*

Исследованы методы обработки сейсмических сигналов с антенн из двух сейсмоприёмников для пеленгации нескольких объектов. Возможность такой пеленгации обеспечивается путём мультипликативной или широкополосной обработки, в результате которой из двух датчиков синтезируется многоэлементная антенна, имеющая узкую диаграмму направленности. Эффективность подходов при пеленгации двух источников сигнала показана на основе моделирования и на реальных сейсмических данных.

Ключевые слова: сейсмические системы охраны, пеленгация, характеристика направленности, мультипликативная антенна.

Введение. Сейсмические системы обнаружения (ССО) являются одним из наиболее эффективных средств охраны границ объектов за счёт достаточно высокой обнаружительной способности, скрытности установки и низкой стоимости в расчёте на 1 км рубежа. Такая система, обрабатывая полученный сигнал, должна не только обнаружить сейсмический объект, но и распознать его, т. е. определить класс принадлежности (пешеход, группа, автомобиль, животное). Известно, что одним из важнейших этапов распознавания является выбор системы признаков. В подавляющем большинстве ССО в качестве признаков выбираются временные или спектральные характеристики сейсмического сигнала распознаваемого объекта и не учитываются параметры его движения. Поэтому, если вероятность обнаружения объекта приближается к 1, вероятность распознавания (например, различение пешехода и автомобиля) остаётся на уровне 0,9, а время наработки на ложную тревогу не превышает 200 ч [1]. Ещё сложнее провести разделение таких классов объектов, как пешеход и животное, за счёт близкого характера сейсмических сигналов, соответствующих этим объектам.

Известно, что основным способом повышения вероятности правильного распознавания является увеличение числа информативных признаков. Одна из главных перспектив ССО в этом направлении — использование информации о траектории и скорости передвижения объекта. Такие данные могут иметь как самостоятельное значение, так и быть дополнительными к признакам, полученным на основе спектральной или временной обработки.

Цель предлагаемой работы — создание и исследование методов траекторного анализа одного или нескольких объектов при ограниченном количестве сейсмоприёмников (СП). Отметим, что траекторный анализ в случае одного объекта особых затруднений не вызывает, хотя некоторые проблемы, связанные с изменением скорости звука в различных грунтах, возникают. Вариант их решения описан в следующем разделе. Далее анализируются варианты траекторного анализа в случае получения сейсмосигналов от нескольких объектов датчиками, состоящими из двух сейсмоприёмников.

Варианты решения задачи пеленгации одного объекта. Для определения координаты источника колебаний вычисляются его пеленги минимум в двух точках, разнесённых на расстояние 50–100 м. Характерное расстояние источник—приёмник при решении

этой задачи составляет несколько длин волн, и в подавляющем большинстве случаев можно считать, что на таких расстояниях мы имеем однородный грунт и это позволяет не учитывать распространение сейсмических волн в разных направлениях. Для получения двух пеленгов необходимы две антенны. Минимальное число сейсмоприёмников в антенне два. Для определения пеленга при одном источнике звука достаточно измерить время относительной задержки сигнала, принятого датчиками. При измерении этой задержки возникает ряд проблем, обусловленных частотной дисперсией и затуханием сейсмических волн. Изменение формы сейсмосигнала во временной и спектральной областях происходит на дистанции в несколько метров, что приводит к большим погрешностям при измерении временных задержек.

Существует ряд известных методов измерения временной задержки сигналов в задаче пассивной сейсмической локации движущихся наземных объектов. В работе [2] эти методы делятся на две группы: частотные (кепстральный, на основе функции когерентности, псевдофазовый) и временные (корреляционный). Отмечено, что псевдофазовый алгоритм даёт лучшие характеристики (критерий — среднеквадратичная ошибка пеленга), чем кепстральный и алгоритм, основанный на функции когерентности. Исследования показали идентичность псевдофазового и корреляционного алгоритмов как по среднеквадратичной ошибке пеленга (4 угл. град), так и по трудоёмкости операций вычисления задержки. Все экспериментальные исследования проводились на одном полигоне, что значительно сужает степень общности анализа алгоритмов. Кроме того, для сейсмических датчиков необходима автономная работа в течение продолжительного времени, что требует экономичности алгоритма, определяемой количеством операций, которые выполняет процессор датчика в единицу времени. Рассмотренные в [2] методы характеризуются ресурсоёмкостью операций вычисления временных задержек сейсмических сигналов, что исключает возможность долгой автономной работы сейсмического средства обнаружения.

Потребление энергии микроконтроллером датчика зависит от вычислительной производительности микропроцессора. Для уменьшения ресурсоёмкости алгоритма пеленгации, основанного на расчёте корреляционной функции, был использован подход [3], в котором для расчёта временных задержек сейсмического сигнала между соседними СП умножение заменяется сложением.

Одна из главных проблем в задаче сеймопеленгации — изменение характеристик среды (грунта) в зависимости от сезона (увлажнения, промерзания, наличия снежного покрова и т. д.), что приводит к изменению фазовой скорости распространения сейсмической волны в грунте. Использование всего двух СП привело бы к необходимости часто производить процедуру измерения скорости волны в грунте. Для решения этой проблемы была предложена схема из трёх СП, установленных в углах прямоугольного равнобедренного треугольника, два из которых представляют собой антенну, а третий применяется для коррекции скорости распространения волны в грунте (предполагается здесь и далее, что волна, приходящая на датчик, квазиплоская, т. е. расстояние от датчика до объекта существенно больше, чем расстояние между датчиками). Схема детектирования объекта датчиком из трёх сейсмоприёмников приведена на рис. 1. Угол θ между нормалью N к линии СП1—СП2 и направлением на объект излучения (пеленг объекта) вычисляется из выражения

$$\theta = \operatorname{arctg}(\tau_{12}/\tau_{13}),$$

где τ_{12} , τ_{13} — временные задержки сейсмосигналов между парами линий СП1—СП2 и СП1—СП3.

Решение задачи восстановления траектории движущегося объекта с помощью вышеописанных сейсмических пеленгующих датчиков выглядит следующим образом: при по-

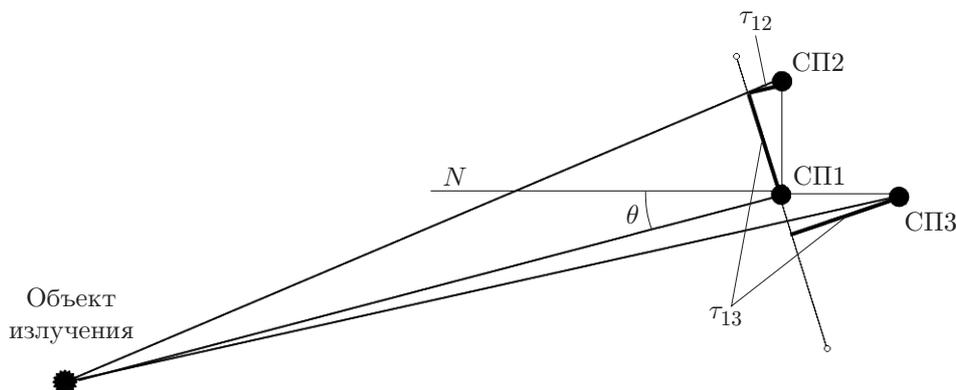


Рис. 1

явлении объекта в зоне обнаружения каждый датчик с определённой частотой по радиоканалу посылает значения пеленга объекта на блок обработки, где производится восстановление траектории объекта, а затем его распознавание.

Эксперимент по пеленгации одного объекта (шагающего человека) таким способом показан на рис. 2, *a*. Среднеквадратическое отклонение пеленга в этом случае, вычисляемое по отклонению показаний датчиков от истинной траектории, имеет порядок 3° , что приемлемо для большинства задач пеленгации, поэтому приведённый вариант решения задачи пеленгации одного объекта можно считать удовлетворительным. Сложности возникают при пеленгации более одного объекта. Эксперимент по пеленгации описанным способом двух объектов представлен на рис. 2, *b*. Как видно, пеленгуется то один, то другой объект.

Уже отмечалось, что одним из преимуществ ССО является её низкая стоимость, определяемая числом сейсмоприёмников на 1 км рубежа, поэтому вполне закономерен поиск решения задачи пеленгации нескольких объектов без увеличения числа СП в каждом датчике.

Варианты решения задачи пеленгации двух и более объектов. Очевидно, что при пеленгации более одного объекта проблема возникает из-за формы диаграммы направленности (ДН) антенны с двумя датчиками. Диаграмма направленности такой антенны для соотношений $d/\lambda = 0,5, 1,0, 1,5$ (d — расстояние между датчиками, λ — длина волны) показана на рис. 3 [4]. Здесь θ — угол между фронтом волны и линией, проходящей через датчики (азимутальный угол). Такие ДН получаются в случае аддитивной антенны. Если она мультипликативная (т. е. сигналы от датчиков перемножаются), то ДН будут такой

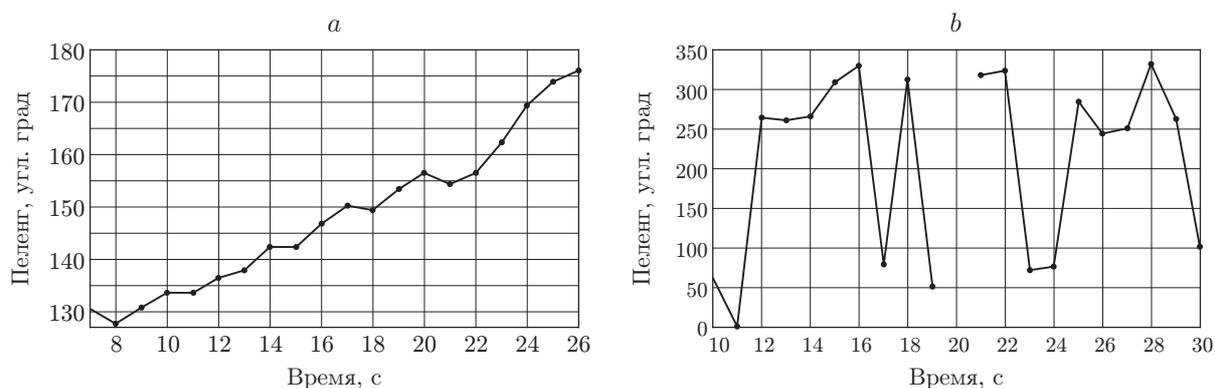


Рис. 2

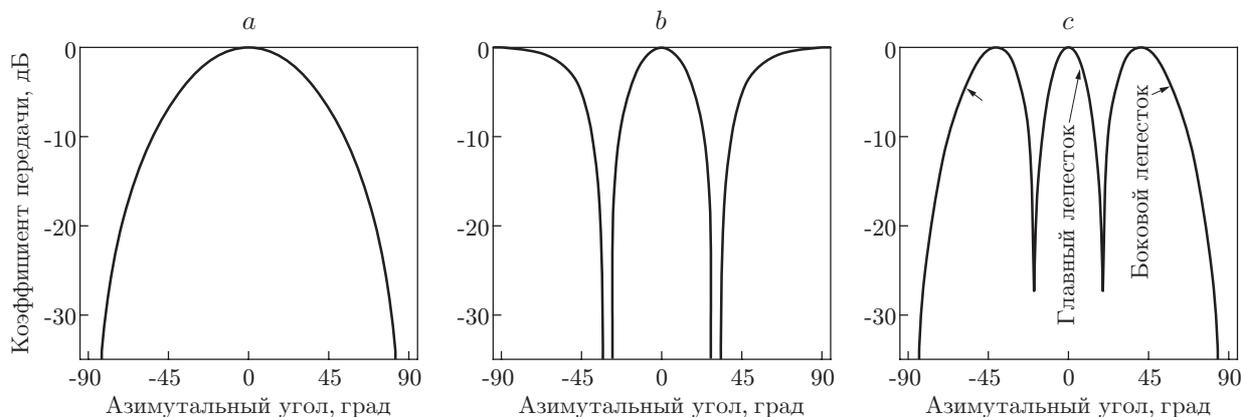


Рис. 3

же формы, но в 2 раза уже. Из ДН видно, что в случае двух и более сигналов их удельный вес зависит от того, на какую часть ДН они попадут, и отклик антенны будет зависеть как от направления прихода, так и от отношения интенсивностей сигналов. Если интенсивность сигнала одного источника существенно превышает интенсивность другого, то максимум отклика антенны будет соответствовать пеленгу на первый источник. В случае близкой интенсивности сигналов от двух источников за счёт накопления и усреднения корреляционной функции значение пеленга может не соответствовать ни первому, ни второму источнику.

Для решения подобных задач в радиолокации и гидроакустике применяются многоэлементные антенные решётки, имеющие ДН с узким главным лепестком, сканирующим пространство. Как уже указывалось, для сейсмических охранных систем этот вариант не подходит, поскольку с точки зрения экономии необходимо использовать наименьшее число приёмников. Таким образом, наиболее предпочтительной является конструкция датчика, состоящая из трёх СП: два из них — это антенна, сигнал от третьего служит для коррекции скорости звука.

Рассмотрим два метода создания двумя сейсмоприёмниками такой же характеристики направленности, как у многоэлементной антенны. Один из них основан на нелинейной обработке сигнала после мультипликативной обработки (как и при пеленгации одного источника [5]). Сигнал на выходе многоэлементной антенны при падении на антенну плоской волны единичной амплитуды под углом θ можно представить в виде суммы членов $\cos^m u$ с весовыми коэффициентами, в качестве которых выбираются коэффициенты амплитудного распределения конкретной антенны.

На рис. 4 приведён пример из [5], показывающий, каким образом характеристику направленности линейной антенны, состоящей из $2n + 1$ элементов, можно воспроизвести с помощью всего лишь двух элементов. Здесь θ — угол падения волны на антенну из двух СП, расстояние между которыми d ; сигналы сейсмоприёмников перемножаются и интегрируются, после чего формируется $x = \cos u$, где

$$u = \frac{\pi(2d) \sin \theta}{\lambda}.$$

Затем производится нелинейная обработка путём возведения в степень x и формирования полиномов Чебышева $T_0(x) - T_{2n}(x)$; $(a_0 - a_n)$ — коэффициенты амплитудного распределения антенны. Следует отметить, что экономия на числе элементов антенны сопряжена с ухудшением отношения сигнал/помеха, когда оно меньше 1. Но в этом случае получаем характеристику направленности антенны в виде узкого лепестка, который

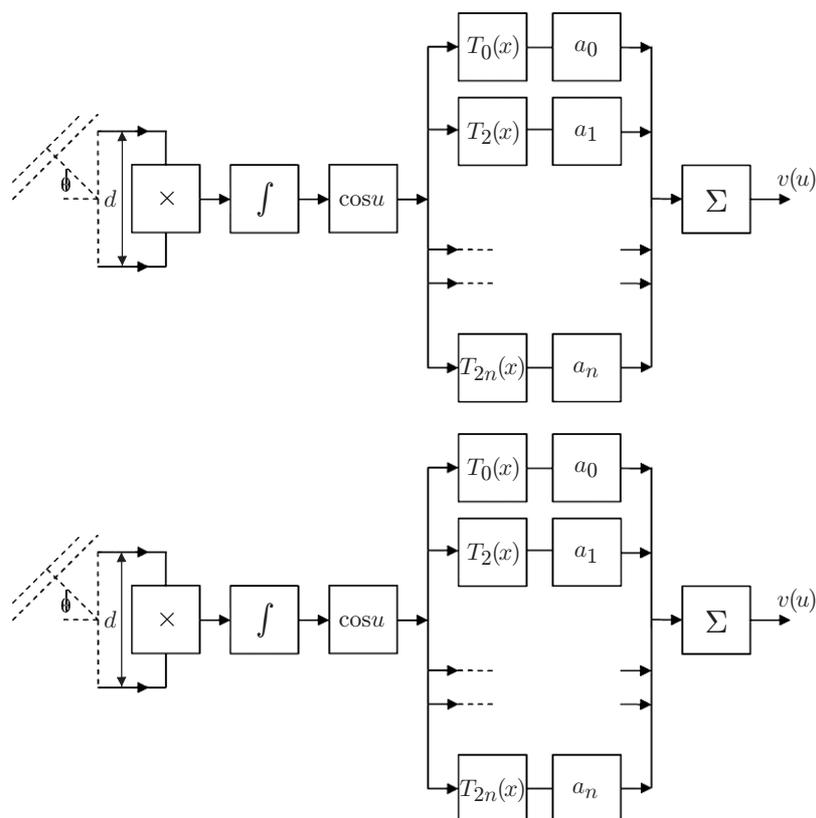


Рис. 4

при сканировании пространства позволяет поочерёдно детектировать объекты (если, конечно, их пеленги достаточно различаются). На рис. 5 показаны примеры моделирования пеленгования двух объектов с помощью антенны из двух СП без нелинейной обработки (а) и этих же сейсмоприёмников с нелинейной обработкой (сформирована антенна из 20 элементов) (б).

Исходные данные для моделирования: пеленги объектов 30 и 70°; полоса частот излучения первого объекта 11–15 Гц, второго объекта 15–20 Гц; скорость распространения волны 100 м/с; расстояние между приёмниками 2,5 м.

Сканирование пространства производилось стандартным методом управления характеристикой направленности путём вращения фазового фронта сигналов (подробнее оно

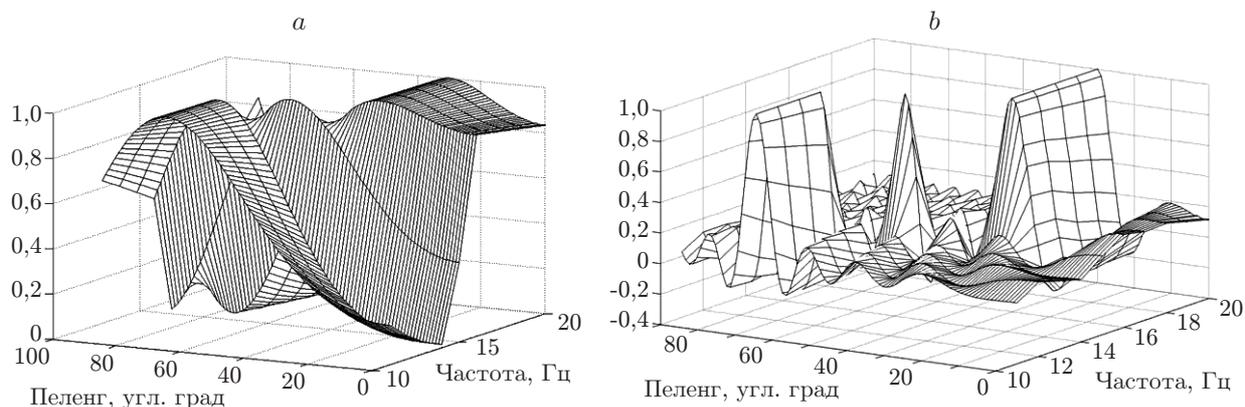


Рис. 5

описано далее). Видно, что в первом случае ширина откликов двухэлементной антенны на объекты не позволяет чётко разделить их (это особенно хорошо заметно, если присутствует шум, для ясности картины он не наложен), во втором же случае отклики 20-элементной синтезированной антенны гораздо уже и траектории объектов чётко разделяются.

Другой метод формирования двухэлементной антенной характеристики направленности многоэлементной антенны реализуем, если сигналы объектов широкополосные [6]. Когда такой сигнал попадает на двухэлементную антенну, после обработки каждой полосе частот как бы соответствует свой приёмник, в результате чего образуется многоэлементная антенна. Алгоритм формирования многоэлементной антенны следующий.

Пусть $v_k(t)$ ($k = 1, 2$) — сигнал с датчика. Для каждого направления θ производим операцию

$$D(\Theta) = \left\langle \sum_{n=1}^N [V_1(\omega_n)\Psi_n(\Theta) - V_2(\omega_n)\Psi_n(\Theta)] \exp(j\omega_n t) \right\rangle.$$

Здесь $V(\omega_n) = \int_0^T v(t) \exp(-j\omega_n t) dt$ — преобразование Фурье от функции $v(t)$; $\Psi_n(\Theta) = -\pi d \sin(\Theta)\omega_n/c$; Θ — направление главного лепестка; n — число полос частот, на которое разбита ширина полосы частоты сигнала; c — скорость звука в среде; ω_n — центральная частота диапазона; $\langle \cdot \rangle$ — оператор усреднения за заданный интервал времени.

Множители $\Psi_n(\Theta)$ вводятся для «вращения» фазового фронта относительно линии расположения СП, определяющего направление главного лепестка ДН (или амплитудные коэффициенты). В каждый момент времени необходимо просканировать направления $\Theta = 0-360^\circ$, в этом и заключается алгоритм пеленгации. Величина $\Psi_n(\Theta)$ зависит от частоты сигнала так, что сигналы от одного источника на разных частотах находятся в фазе. Усреднение за некоторое время осуществляется для увеличения отношения сигнал/шум. Функция $D(\Theta)$ есть ДН антенны, состоящей из n элементов. Покажем, как работает такая антенна на модельном эксперименте.

Исходные данные для моделирования: движутся один или два объекта (люди) по прямой мимо датчика на расстоянии 30 м. Объект генерирует широкополосный сейсмический сигнал в диапазоне 10–40 Гц, на него накладывается широкополосный белый шум. Отметим, что в реальных сейсмических сигналах шум, как правило, окрашенный, однако при моделировании предположение о «белизне» шума допустимо, тем более что перед синтезированием имеется возможность «выбеливания» сигнала, как рекомендуется в работах [7, 8]. Отношение сигнал/шум составляет 3 : 1.

Приём ведут два СП, расстояние между ними 6 м. Скорость распространения звука 170 м/с. Частоты сигнала $\omega_n = (10 + 2n)$ Гц, $n = 0, \dots, 15$, что после обработки эквивалентно 16-элементной антенной решётке (каждой частоте соответствует элемент решётки). Результат пеленгования одного объекта показан на рис. 6, *a*. На рис. 6, *b* приведён модельный эксперимент по пеленгованию двух объектов. Горизонтальные оси — это время и пеленг, по вертикальной оси отложен отклик антенны. Траектория объекта находится путём пороговой обработки отклика антенны. Как видно, траектории двух объектов чётко разделяются.

Результаты обработки реальных сигналов приведены на рис. 7. Исходные данные в реальном эксперименте такие же, как и в модельном. На рис. 7, *a* представлено нахождение траектории для одного объекта, на рис. 7, *b* — для двух объектов. Естественно, в случае реальных сигналов траектории разделяются менее чётко. Хотя отношение сигнал/шум здесь меньше, но можно с полной уверенностью идентифицировать движение двух объектов, что весьма проблематично без синтезирования многоэлементной решётки из двух датчиков.

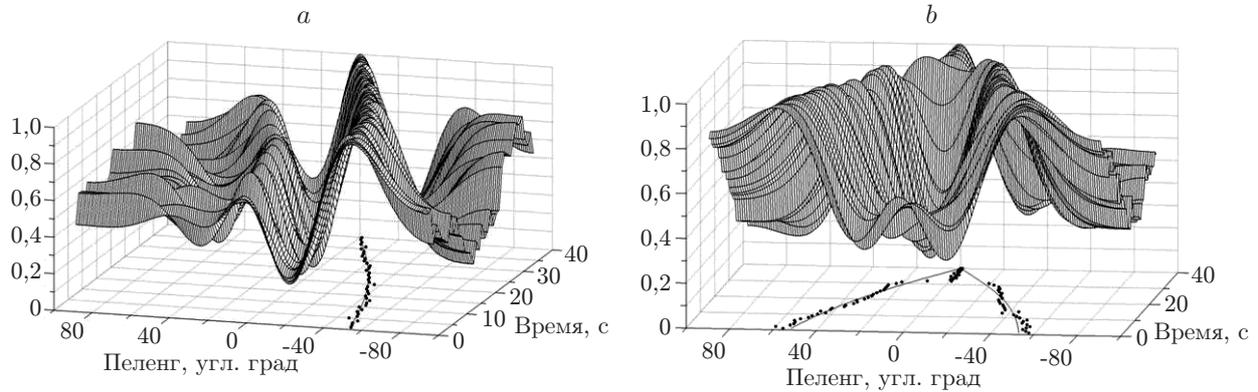


Рис. 6

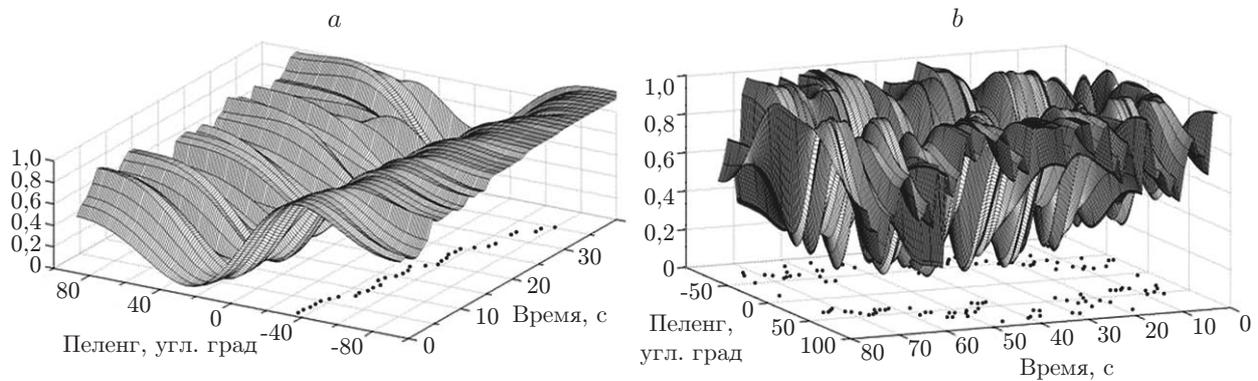


Рис. 7

Ещё один вариант обработки широкополосного сигнала для реализации узкого лепестка при приёме сигнала двумя датчиками представлен в [9]. Этот способ основан на том, что в случае приёма широкополосного сигнала антенной из двух датчиков и перемножения их сигналов (т. е. реализации интерферометра) путём фильтрации можно получить узкий лепесток диаграммы направленности по нулевому пеленгу, изменение же пеленга производится задержкой сигнала одного датчика относительно другого перед перемножением.

При приходе плоской волны с направления θ время задержки между сигналами датчиков $\tau = 2d \sin \theta / c$, сигнал на выходе интерферометра примет вид

$$D_{11}(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T v(t)v(t + \tau)dt,$$

где T — время отклика, определяемое параметрами фильтра. Практически (при $T \rightarrow \infty$) эта функция пропорциональна автокорреляционной функции сигнала, и по теореме Винера — Хинчина ДН антенны и спектральная плотность сигнала $S(\omega)$ являются взаимными преобразованиями Фурье. Если параметры трактов интерферометра неодинаковы (т. е. в каждом из них происходит фильтрация), то ДН антенны

$$D_{12}(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T v_1(t)v_2(t + \tau) dt,$$

а $S_{12}(\omega) = V(\omega)H_1^*(j\omega)H_2(j\omega)$ — её преобразование Фурье (взаимная спектральная плотность), где $V(\omega)$ — спектр сигнала $v(t)$. Эти соотношения показывают, что, меняя параметры фильтров $H_1(\omega)$ и $H_2(\omega)$, можно создавать требуемую диаграмму направленности антенны из двух датчиков.

Заключение. В предлагаемой работе показано, что в сейсмических системах обнаружения при использовании антенны из двух датчиков (третий необходим для коррекции скорости звука) можно синтезировать линейную антенну из нескольких виртуальных датчиков, что даёт возможность сформировать узкий главный лепесток ДН и соответственно идентифицировать объекты, находящиеся в направлении только этого лепестка. Изменение направления лепестка позволяет обнаруживать несколько объектов, что невозможно без синтеза линейки. Примеры определения траекторий двух объектов показаны в модельных и реальных экспериментах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Звездинский С. С.** Всепогодная система охраны. Технические особенности построения периметровых вибрационных средств обнаружения. Ч. III // БДИ. 2005. **58**, № 1. С. 62–66.
2. **Чистова Г. К., Первуинских В. А., Вольсков А. А.** Методы измерения временных задержек сейсмических сигналов территориально распределенной радиотехнической системы охраны // Радиотехника. 2008. № 3. С. 32–37.
3. **Алямкин С. А., Еременко С. И.** Алгоритм распознавания пешехода на основе анализа автокорреляционной функции сейсмического сигнала // Автометрия. 2011. **47**, № 2. С. 26–32.
4. **Монзинго Р. А., Миллер Т. У.** Адаптивные антенные решетки. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
5. **Урик Р. Дж.** Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
6. **Постнов Г. А.** Антенные решетки. М.: Мир, 1960. 367 с.
7. **Спектор А. А., Филатова С. Г.** Определение временных положений сигналов для оценки движения человека в сейсмической системе охранного наблюдения // Науч. вестн. НГТУ. 2009. № 3. С. 57–66.
8. **Соколова Д. О., Спектор А. А.** Классификация движущихся объектов по спектральным признакам сейсмических сигналов // Автометрия. 2012. **48**, № 5. С. 112–119.
9. **McCartney B. S.** Theoretical and experimental properties of two-element, multiplicative multi-frequency receiving arrays including superdirectivity // Radio and Electron. Eng. 1964. **28**, N 2. P. 129–143.

Поступила в редакцию 18 июня 2012 г.
