

Об управлении диаграммой направленности группы импульсных невзрывных источников «Енисей»

Шайдунов Г.Я., Сибирский федеральный университет, г. Новосибирск
Детков В.А., ЗАО «Енисейгеофизика», г. Красноярск

Внедрение интеллектуального управления в импульсные невзрывные источники «Енисей» целесообразно как с точки зрения повышения производительности работ, выполняемых с их использованием, так и повышения геофизической информативности в направлениях:

- определение оптимального числа ударов с помощью оперативной оценки отношения сигнал/шум [1];
- снижение уровня некоррелированных с сигналом шумов при переходе на подзарядку конденсаторов ИНИ от аккумуляторов;
- управление частотой излучения группы ИНИ, обеспечивающее улучшение отношения сигнал/синхронная помеха, расширяющее предельную чувствительность сейсмоприемников при большом уровне синхронных помех [2];
- управление диаграммой направленности излучения (УДН).

Нижерассматриваются потенциальные возможности УДН в целях повышения геофизической информативности группы ИНИ.

В монографии [3] изложены основы теории и методики управления пространственной формой диаграммы направленности (ДН) сейсмического излучения, создаваемого группой источников, размещенных на поверхности полупространства воздух-Земля. Однако при этом рассматривается лишь суммирование продольных волн. Но в реальных условиях учет поперечных волн может дать дополнительный положительный для интерпретации эффект.

Из теории и практики применения передающих фазированных антенных решеток (ФАР), используемых в радиоэлектронике, известно, что путем подбора фаз и амплитуд токов элементарных излучателей, расположенных на площади апертуры антенны, производится пространственное суммирование энергии радиоволн в заданном направлении с возможностью сканирования диаграммой направленности по угловым координатам. Однако подобный подход в сейсморазведке может быть использован лишь с учетом неоднородности геологической среды, в которой распространяются сейсмические волны, поскольку длина излучаемой волны зависит от скорости ее распространения и частоты. В радиотехнике же, как известно, радиоволны распространяются в воздухе в большей части без изменения длины волны.

Приведем перечень положительных эффектов использования управления излучением группы источников, перечисленных в [3].

Управляемые интерференционные источники колебаний, используемые в методе управления фронтами сейсмических волн, коренным образом отличаются от интерференционных систем приема колебаний. Обладая высокой направленностью излучения, они позволяют создавать фронты сейсмических волн произвольной формы, изменять направление их распространения, перераспределять излученную энергию в нижнем полупространстве, концентрируя ее на объекте разведки, значительно повысить интенсивность волн от разведываемых границ и в значительной степени ослабить или полностью исключить из сейсмической записи волны-помехи. Важной отличительной особенностью рассматриваемого способа является также возможность управления кинематикой отраженных волн, благодаря чему имеются критерии выделения

на сейсмической записи полезных волн и определения их природы. В процессе исследований можно создавать такие условия, при которых отраженная от данной границы волна будет характеризоваться заранее predetermined кинематическими особенностями и, соответственно, однозначно интерпретирована. Это же обстоятельство позволяет эффективнее использовать способы группирования при лабораторном анализе информации, а также создавать высокоэффективные обрабатывающие системы с применением согласованных управляемых интерференционных источников и приемников колебаний.

Благодаря тому, что имеется возможность от одной отражающей границы зарегистрировать годографы различной конфигурации и сопоставить полученные данные, методом управления фронтами сейсмических волн могут быть проведены контрольные (ревизионные) исследования, которые ранее сейсморазведкой выполняться не могли.

Между тем, в сейсморазведочной практике указанная методика не получила распространения, по-видимому по причине сложности формирования ДН от взрывных источников, а широко распространенные вибрационные источники, излучая широкополосный сигнал с изменяющейся частотой, не позволяют формировать ДН заданной формы во всем диапазоне частот. Во всяком случае, в известных публикациях подобное направление управления виброисточниками не рассматривается.

Импульсные невзрывные источники сейсмических волн, на наш взгляд, идеально подходят для такого рода задач, поскольку позволяют путем простого подбора временной синхронизации формировать ДН заданной формы. Особенно это важно для сейсморазведки в Восточной Сибири с весьма неоднородным верхним слоем геологической среды. В этом случае может быть поставлена актуальная задача формирования ДН «бутылочной формы», т.е. с минимальной интенсивностью излучения вблизи верхней границы раздела, например, до глубины 500-1000 м и максимально возможной интенсивностью на больших глубинах.

Поскольку в обычной практике работ с импульсными невзрывными источниками используется обычно 3-5 источников, мы рассмотрим задачу в указанной выше постановке для управления группой из пяти источников.

Пусть на поверхности двухслойной среды расположена линейная схема из пяти источников с управляемым расстоянием X_i между ними и управляемым временем запаздывания τ_i между моментами возбуждения центрального и боковых источников (рис. 1, а).

Поставим условие фазовой компенсации суммарной интенсивности излучения в точке O_1 на глубине h_1 , т.е. получение минимального уровня сейсмического излучения F_2 в точке O_1 (рис. 1, б) на границе раздела с разными скоростями распространения.

Поскольку угловая зависимость составляющих вектора сил может быть записана как:

$$F_x = mF \sin \Theta \text{ — для поперечной волны} \quad (1)$$

$$F_p = F \cos \Theta \text{ — для продольной волны,} \quad (2)$$

где $m = 0 \div 1$, в среднем $m = 1/2$, то суммарный вектор сил от всех пяти источников:

«ВСТРЕЧИ НА ВОЛГЕ»: ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

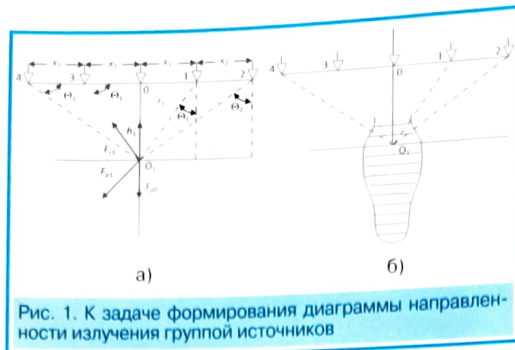


Рис. 1. К задаче формирования диаграммы направленности излучения группой источников

$$F_{\Sigma p} = F_{p0} + 2F_1 \cos^2 \Theta_1 - 2F_1 m \sin \Theta_1 \cos \Theta_1 + 2F_2 \cos^2 \Theta_2 - 2F_1 m \sin \Theta_2 \cos \Theta_2 \quad (3)$$

Здесь коэффициент 2 перед парциальными силами F_1 и F_2 учитывает вклад третьего и четвертого источников в силу симметрии задачи.

В записанном уравнении:

$$\cos \Theta_1 = \frac{h}{\sqrt{h_1^2 + x_1^2}};$$

$$\cos \Theta_2 = \frac{h}{\sqrt{h_1^2 + (x_1 + x_2)^2}}$$

$$\sin \Theta_1 = \frac{x_1}{\sqrt{h^2 + x_1^2}};$$

$$\sin \Theta_2 = \frac{h}{\sqrt{h^2 + (x_1 + x_2)^2}}$$

$$m \approx \frac{1}{2}.$$

Для обеспечения условия $F_{\Sigma p} = 0$ необходимо, чтобы все составляющие сил давления в (3) приходили в точку O_1 , с фазовым сдвигом 180° , что обеспечивается подбором времени запаздывания:

$$t_i = \frac{r_i}{v_i}.$$

Пусть скорость распространения продольной волны в верхнем слое будет равна v_{op} , а длина волны $\lambda = \frac{v_{op}}{f}$; (f – рабочая частота).

В этом случае для обеспечения фазового запаздывания $\varphi = 180^\circ$, для продольной волны необходимо обеспечить условие:

$$\Delta \varphi_p = \pi = \varphi_i - \varphi_0 = 2\pi f \left[\frac{r_i}{v_{ip}} - \frac{h}{v_{op}} \right]. \quad (4)$$

Для поперечной волны:

$$\Delta \varphi_s = \pi = 2\pi f \left[\frac{r_i}{v_{is}} - \frac{h}{v_{op}} \right], \quad (5)$$

где $v_{is} = mv_p \sin \Theta_i$; v_{op} – скорость распространения продольной волны от центрального источника.

При импульсном излучении необходимо создать условие компенсации для всего группового сигнала в диапазоне $(0 - 1/\tau_u)$, где τ_u – длительность импульса излучения, что представляется проблематичным.

В то же время вблизи поверхности формируются волны определенных частот, представляющие собой синхронные помехи (СП), уровень которых необходимо минимизировать. По этой

причине в качестве частоты компенсации можно в (4 и 5) использовать частоту f_n основной гармонической волны СП, доминирующей на данном георазрезе.

Разность времен запаздывания сейсмических волн относительно нулевого источника определяется из уравнений:

Для первого источника:

$$\Delta t_{ip} = \left[\frac{\sqrt{x_1^2 + h_1^2}}{v_{ip}} - \frac{h}{v_{op}} \right]. \quad (6)$$

$$\Delta t_{is} = \left[\frac{\sqrt{x_1^2 + h_1^2}}{v_{is}} - \frac{h}{v_{op}} \right]. \quad (7)$$

Для второго источника:

$$\Delta t_{ip} = \left[\frac{\sqrt{(x_1 + x_2) + h_1^2}}{v_{ip}} - \frac{h}{v_{op}} \right], \quad (8)$$

$$\Delta t_{is} = \left[\frac{\sqrt{(x_1 + x_2) + h_1^2}}{v_{is}} - \frac{h}{v_{op}} \right]. \quad (9)$$

При соблюдении обычных условий $x_i \ll h$, $v_{ip} = v_{op}$, разложение в ряд этих уравнений по малому параметру $\frac{x_i}{h} \ll 1$ дает:

$$\Delta t_{ip} = \frac{1}{2} \frac{2}{h v_{ip}}. \quad (10)$$

где для первого источника $x = x_1$, $x = x_1 + x_2$.

Для поперечной волны:

$$\Delta t_{is} = \frac{h}{v_{is}} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x_p}{h} \right)^2 - \frac{v_{is}}{v_{op}} \right\}. \quad (11)$$

$$\text{Или при } v_{is} = \frac{1}{2} v_{ip},$$

$$\Delta t_{is} = \frac{h}{2v_{is}} \left[1 + \frac{x^2}{h^2} \right]. \quad (12)$$

Так, при $x=10\text{м}$, $h=500\text{м}$, $v_{ip}=2000\text{м/с}$ из (3.62) получим $t_i=50\text{мкс}$.

Для обеспечения компенсации волн на частоте 40Гц необходимое время запаздывания для первого излучателя, при условии (4) составит:

$$\Delta t_k = 12,5\text{мс}$$

Такое запаздывание можно обеспечить путем разноса источников на расстояние:

$$x_i = \sqrt{2v_{ip} h t_{ik}} \quad (13)$$

Откуда $x_i=150\text{м}$ при $\Delta t_{ik}=12,5\text{мс}$, $h=500\text{м}$, $v_{ip}=2000\text{м/с}$.

Используя формулу (10), оценим время запаздывания по отношению к нулевому источнику на глубине $h=4000\text{м}$, $v_{ip}=4000\text{м/с}$, $x_i=150\text{м}$. В этом случае $\Delta t_{ip} = 800\text{мкс}$.

Если частота полезного сигнала при распространении ниже горизонта верхнего слоя составит $f=40\text{Гц}$, то подобное время запаздывания даст сдвиг по фазе:

$$\Delta \varphi = \omega t_{ip} = 2\pi f t_{ip} = 2\pi \cdot 40 \cdot 300 \cdot 10^{-6} = 0,2\text{рад} \approx 29^\circ$$

Приведенные оценки позволяют сделать вывод, что компенсация помеховых волн в верхнем неоднородном слое георазреза приводит к значительному ослаблению продольной волны полезного сигнала на больших глубинах.

Действительно разность двух сигналов одинаковой частоты равна:

$$\Delta U = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) - U_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2).$$

При $U_{m1} \approx U_{m2} = U_m$

$$\Delta U = 2U_m \cos \omega t \cdot \sin \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}. \quad (14)$$

При $\Delta \varphi = 29^\circ$ величина сигнала снижается в два раза, что указывает на нецелесообразность постановки задачи компенсации продольных волн в ближней зоне источника.

Однако, поскольку скорость распространения поперечных сейсмических волн вдвое меньшей скорости продольных волн, длина волны поперечных волн в два раза короче продольных, возникает другая интересная возможность фокусировки поперечных волн в точке компенсации, заключающаяся в том, что в точку компенсации продольных волн поперечные волны придут с фазовым сдвигом 0° или 2π , т.е. их энергия в точке 0 будет складываться. При этом в точке сложения энергий возникает новый сферический источник поперечных волн, которые позволяют в ряде случаев улучшить результаты интерпретации сейсмических данных.

На рис. 2 с помощью (6-9) построены зависимости необходимого времени запаздывания возбуждения источников в функции глубины точки компенсации и при $x_1 = x_2 = 10\text{ м}$, $v_{ip} = 2000\text{ м/с}$.

Запаздывание в возбуждении источников необходимо производить последовательно начиная от 2,4, затем 1,3 и далее 0, т.е. центрального, с тем чтобы в точку компенсации сейсмические волны пришли одновременно и со сдвигом фаз 180° , обеспечиваемого согласно условиям (4) и (5).

Далее рассмотрим возможность управления диаграммой направленности по критерию максимума интенсивности волны в точке фокусировки.

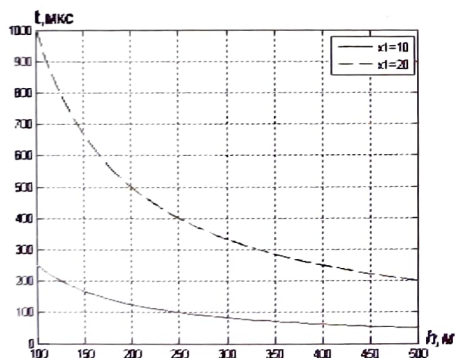


Рис. 2. Зависимость времени запаздывания возбуждения источников от глубины точки компенсации при $x_1 = x_2 = 10\text{ м}$, $v_{ip} = 2000\text{ м/с}$.

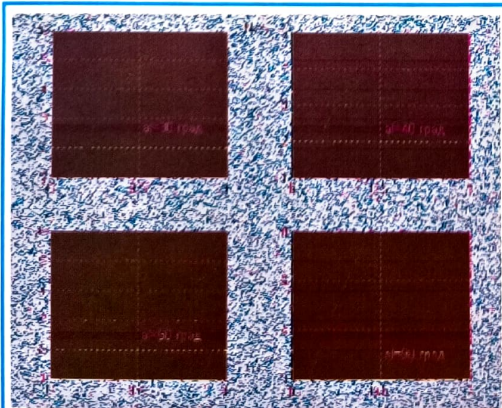


Рис.3. Зависимости КНД от l/λ для различных углов α .

Для этого используем те же соотношения, полученные выше, однако для случая суммирования интенсивностей побочных волн всех источников на глубине h . В этом случае в точку фокусировки волны всех источников должны подойти в одинаковой фазе, при этом последним должен включаться центральный источник.

Например, при $x_1 = x_2$, $h = 4000\text{ м}$ и $v_{ip} = 4000\text{ км/с}$, источники 2 и 4 должны включаться первыми, опережая центральный на время порядка 3 мкс, что находится в рамках погрешностей синхронизации импульсных источников «Енисей».

Однако, при $x_1 = 100\text{ м}$, из (10) получим $\Delta t_{ip} = 300\text{ мкс}$. То есть, в этом случае, для фокусировки поля продольных волн на глубине необходим подбор времен запаздывания излучения источников в группе.

По мере снижения глубины точки фокусировки и увеличения разнорасположения источников по поверхности могут сложиться условия, когда целесообразна постановка задачи синфазного суммирования волн всех источников.

Отметим, что выбор геометрии расположения источников на поверхности, например, расположение 4-х источников по углам квадрата с нулевым в его центре, дает одинаковое запаздывание для всех периферийных излучателей.

Управление запаздыванием по времени излучения группы источников позволяет изменять положение диаграммы направленности в полупространстве, например подсвечивать крутопадающие пласты.

Для дальней зоны излучения зависимость амплитуды колебаний от параметров линейного источника

$$A^2 = a^2 \frac{\sin^2 \left[N \frac{1}{2} kl (\sin \theta - \sin \alpha) \right]}{\sin^2 \left[\frac{1}{2} kl (\sin \theta - \sin \alpha) \right]}, \quad (15)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число;

α — угол между центральной осью диаграммы направленности и произвольным направлением, l — разнос между источниками.

Ширина диаграммы направленности по уровню 0,7:

$$\gamma_{0.7} = \frac{0.8}{(N-1) \frac{l}{\lambda} \cos \alpha} \quad (16)$$

На рис.4 показана форма диаграммы направленности группы линейно расположенных пяти излучателей при различных соотношениях l/λ .

Зависимость величины коэффициента направленности действия (КНД) от отношения l/λ для различных углов максимального излучения α представлена на рис.3.

Как видно из этих графиков, наибольший КНД получается при соотношении $l/\lambda = 0.4$.

Управление положением диаграммы направленности в пространстве при заранее заданном фиксированном разнесе источников можно производить временем запаздывания, путем установки моментов синхронизации излучателей.

Расчетная зависимость необходимого времени запаздывания произвольного излучателя относительно центрального при скорости распространения сейсмических волн $l/\lambda = 4000\text{ м/с}$ представлена в таблице 1.

Далее рассмотрим влияние линейно расположенной группы импульсных источников на формирование суммарной сейсмической волны в некоторой точке А вдоль профиля наблюдения на поверхности геологического разреза (рис. 5).



Сдвиг фазы на частоте f поверхностной, например поперечной волны: $\varphi = 2\pi f \left(\frac{x_i}{v} + t_{ji} \right)$ (17)

где x_i – расстояние между i -м и первым источниками, t_{ji} – электронное время запаздывания, определяемое системой синхронизации. Для компенсации поверхностной волны при излучении парой источников необходимо выполнить условие $\varphi = 180^\circ$.

С учетом этого, из (17) будем иметь:

$$t_{ji} = \frac{1}{2f} - \frac{x_i}{v} \quad (18)$$

Например, при $x_1 = 10$ м; $f = 40$ Гц; $v = 2000$ м/с, из (18) получим: $t_{ji} \approx 12,5$ мс.

Эффект компенсации поверхностной волны можно получить как подбором электронного времени запаздывания t_{ji} , так и разносом источников на величину $x_i = \lambda/2$. Так, для $f = 40$ Гц и $v = 2000$ м/с, $x_i = 2,5$ м.

Без учета затухания интенсивности волны на расстоянии x_i эффект компенсации может быть получен подбором пар x_i , t_{ji} расчетным путем с помощью измерения скорости запаздывания поверхностной волны с использованием акселерометров, установленных на источниках.

Если электронное время запаздывания устанавливается для источников в группе в соответствие с ожидаемой частотой полезного сигнала, а расстояние между источниками определено принятой для данного профиля методикой работ, то в точке наблюдения А (рис. 5) будет наблюдаться интерференционное поле сейсмической волны.

В частотном представлении:

$$u(p) = S_i(p) \left(1 + e^{-p\tau_1} + e^{-p\tau_2} + \dots + e^{-p\tau_i} \right) = S(p) \sum_{i=0}^n e^{-p\tau_i} \quad (19)$$

$$\text{где } \tau_1 = \frac{x_1}{v}; \quad \tau_2 = \frac{x_1 + x_2}{v}; \quad \tau_i = \frac{x_1 + x_2 + x_i}{v}; \quad p = j\omega;$$

$S(p)$ – спектральная характеристика излучаемого сигнала.

Поскольку фазовый сдвиг волны соответствует $\varphi = \omega\tau_i$, то совокупное интерференционное поле группы источников с соблюдением условия взаимной компенсации фаз должно приближаться к нулю.

$$U_{\Sigma A} = \left[\sum_{i=0}^n u_i^2 \right]^{1/2} \Rightarrow 0. \quad (20)$$

Здесь квадратичный закон сложения интенсивностей поверхностных волн учитывает случайный характер отклонения фаз сигналов излучаемых источниками в группе.

В любом случае, суммарная интенсивность поверхностной волны в произвольной точке наблюдения на поверхности раздела при последовательном возбуждении источников в группе будет всегда меньше, чем при одновременном излучении источников.

Таким образом, адаптивное управление парой x_i , t_{ji} на основе учета оперативной информации о скорости распространения разных типов волн, получаемой на данном типе геологического разреза, расширяет информативные возможности сейсморазведки и позволяет по-новому решать некоторые поисковые задачи.

Выводы

1. Режим управления пространственным положением диаграммы направленности (ДН) группы излучателей, исследованный в работах украинских геофизиков [17], позволяет в ряде случаев решать по-новому задачи сейсморазведки в сложных геолого-геофизических условиях.

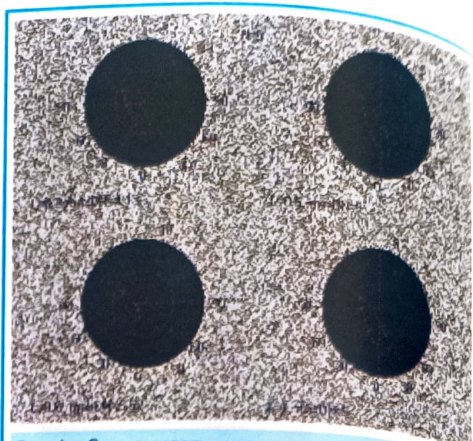


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения и формы диаграммы направленности от относительного разнеса группы пяти излучателей

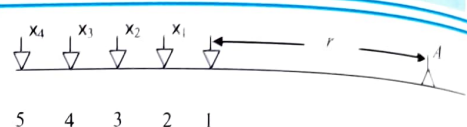


Рис. 5.

Таблица 3.1

h_m	x_m						t_{ji} мкс
	10	20	30	40	100	200	
2000	6,25	25	56,2	100	625	2500	t_{ji} мкс
4000	3,12	12,5	28,1	50	312,5	1250	t_{ji} мкс

Для решения этих задач импульсные невзрывные источники «Енисей» идеально подходят для смещения ДН как путем подбора пространственного разнеса источников по поверхности георазреза, так и путем управления временем их синхронизации в группе.

2. Путем управления временем запаздывания излучения источников в группе, возможна реализация режима генерации преимущественно поперечных волн, обеспечивающих в ряде случаев более высокую геолого-геофизическую информативность по сравнению с продольными волнами.

3. Последовательный режим включения источников в группе позволяет более гибко решать задачи подавления поверхностных волн, например, в сложных геолого-геофизических условиях Восточной Сибири.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта 2010-218-01-082 Правительства РФ по созданию при участии вузов высокотехнологичных производств

Литература

1. Детков В. А. Шайдуров Г. Я. О возможности адаптивного управления импульсными невзрывными источниками II. Приборы и системы разведочной геофизики. Саратовское отд. Евро-Азиатского геофизического общества (СО ЕАГО), г. Саратов, №4, 2009. С. 14-16.
2. Детков В. А. Шайдуров Г. Я. Частотно-импульсный режим возбуждения сейсмических волн группой импульсных невзрывных источников. СО ЕАГО г. Саратов, №4, 2007. С. 1-13.
3. Бендерский В. Я., Рейхер Л. Д., Хараз И. И. Метод управления фронтами волн в сейсморазведке. М.: Недра. 1973. - 200 с.