

## Выбор метода миграции для обработки сигналов подповерхностной радиолокации

**А.В. Зеленков, С.А. Зеленков**

*Рижский технический университет*

*ул. Дравниеку 13-32, LV-1021, Рига, Латвия; эл. почта [Alberts.Zelenkov@RTU.lv](mailto:Alberts.Zelenkov@RTU.lv)*

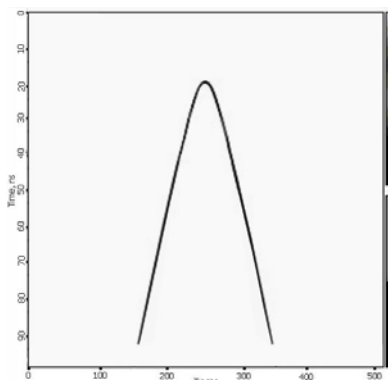
В результате дифракции каждый точечный отражатель (точечный дифрактор), находящийся в однородной среде под земной поверхностью, при равномерном движении по поверхности на радиолокационном разрезе (временном профиле) отображается в виде гиперболы (вершиной вверх) с убывающей интенсивностью отраженных сигналов вдоль нее по мере удаления от вершины. При этом истинное положение точечного объекта соответствует вершине гиперболы. Все гиперболы имеют одинаковые асимптоты. Миграционное преобразование (миграция) - это такой вычислительный метод, который выполняет операцию, обратную дифракции, являясь фактически процессом переноса всех элементарных сигналов, расположенных в местах пересечения гиперболы радиолокационными трассами, в ее вершину. Математически процесс миграции можно представить двумерной сверткой профиля с зеркальным относительно горизонтальной линии на данной глубине изображением миграционной гиперболы. При этом для каждой глубины залегания точечных объектов весь профиль ниже линии заданной глубины необходимо сворачивать со своей гиперболой. Если таким образом свернуть всего одну точку на профиле, то геометрическим местом множества отражающих точечных объектов для нее станет полуокружность (если масштаб вдоль поверхности и по глубине одинаков) с центром на поверхности земли и радиусом, равным расстоянию точки от поверхности. Эту полуокружность формально можно считать переменным по глубине (изменяется радиус) импульсным откликом процесса миграции [1,2]. С другой стороны, в смысле свертки профиля со своей зеркальной гиперболой на каждой глубине миграционное преобразование подобно процедуре согласованной двумерной фильтрации. В результате миграции длинная гиперболическая ось синфазности отраженных сигналов сжимается в фокус достаточно малых размеров, определяемых по вертикали шириной спектра принимаемого сигнала и по горизонтали - шириной полосы пространственных частот наблюдаемых данных [2]. Использование миграционного преобразования сигналов подповерхностной радиолокации является полезным для практики, так как приводит к увеличению

отношения сигнал/шум (С/Ш) и горизонтальной разрешающей способности георадара.

В практике обработки геофизической информации находит применение целый ряд методов миграционного преобразования. Наиболее популярны из них метод дифракционного суммирования по гиперболе [1,2,5]; метод фазового сдвига [1,2,3,4,6], предложенный Газдагом, как вариант метода ВКБ (Вентцеля, Крамерса и Бриллюэна) [5]; метод Столта (разновидность f-k методов) [1,2,4,6] и метод интеграла Кирхгофа [2,4,6]. При полной достаточности теоретического обоснования этих методов примеры программной реализации в литературе практически отсутствуют. Известно, например, описание алгоритмов построения программ для методов фазового сдвига и Столта в [1,2,3] и текст фортран-программы для упрощенного метода Столта в [2]. Поэтому авторам для всех 4-х методов миграции пришлось разрабатывать программы самостоятельно (на C++), опираясь только на [1,2,3], с использованием (кроме дифракционного суммирования) двумерного (2D-БПФ) и одномерного (1D-БПФ) быстрых преобразований Фурье и алгоритмов подавления помех из-за периодичности результатов дискретного преобразования Фурье [1,2].

Очевидно, что такие же методы, как при миграционном преобразовании сейсмических данных, могут использоваться и при обработке данных подповерхностной радиолокации. Однако встает вопрос выбора, какой метод рекомендовать к использованию в пакетах прикладных программ обработки на РС, так как из литературы для указанных методов миграции известны лишь качественные оценки вычислительных затрат [4] и их сравнение по другим, скорее важным для обработки сейсмических, чем радиолокационных данных, характеристикам [1,2,4]. В данной статье делается попытка такой выбор обосновать с помощью количественных оценок большего числа параметров, важных для радиолокационной обработки. Перед выбором определенного метода миграционного преобразования необходимо провести их сравнение по нескольким параметрам. На наш взгляд следует рассмотреть методические помехи, устойчивость к шумам приема и время, затрачиваемое на миграционное преобразование.

К методическим мы относим интерференционные помехи, вносимые тем или иным методом по всему профилю при миграционном преобразовании исходных данных. Они могут приводить к ложной интерпретации данных после миграции. Для их детального рассмотрения следует проанализировать работу каждого метода на модели точечного объекта в плоскости отображения в виде гиперболы, рассчитанной по ее математической формуле (см. рис.1, где вершина гиперболы имеет координаты 20 ns, 255-я трасса), т.к. на реальных данных эти помехи маскируются отражениями от других объектов, а расчет гиперболы тем или иным методом обратного миграционного преобразования точечного дифрактора [2] порождает собственные помехи, разные в зависимости от принятого для обратного преобразования метода миграции. На наличие и необходимость учета таких помех обращается внимание лишь в одной работе [1], однако здесь, взяв за эталон метод фазового сдвига, автор сравнивает с ним ряд приближенных методов миграции во временной области, основанных на методе конечных разностей, по визуальным результатам миграции гипербол без количественной оценки создаваемых помех. Миграция во временной области на основе метода конечных разностей хорошо себя зарекомендовала при анализе сейсмических данных [1,2], когда среда неоднородна и необходимо учитывать вариации скорости по горизонтали и глубине. В георадиолокации такие изменения скорости практически не учитываются ввиду сравнительно небольших глубин зондирования (до 10-20 м), малого удаления антенн приемника и передатчика и, как следствие этого, небольшой ширины миграционной апертуры (ширины гиперболы). Поэтому при обработке данных георадара следует в первую очередь уделить внимание более точным 4-м методам миграционного преобразования, указанным выше. Однако для сравнения их между собой по уровню создаваемых интерференционных помех сведений недостаточно.

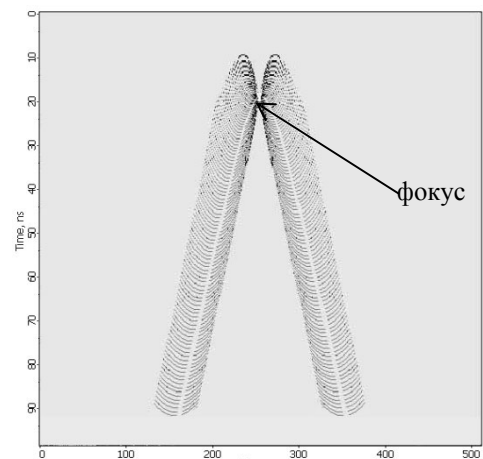


**Рис. 1.** Модель профиля для точечного объекта (математическая гипербола)

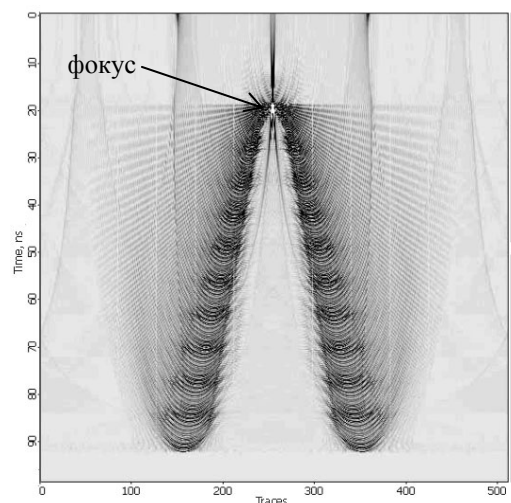
При миграционном преобразовании дифракционной гиперболы в идеале должно быть восстановлено изображение исходного отражающего объекта в виде близкого к точке фокуса миграции на

плоскости распределения плотности сигнала (по профилю) с максимальной амплитудой сигнала в центре фокуса, соответствующем расположению точечного дифрактора. При реальном проведении миграционного преобразования рассматриваемыми методами гипербола действительно преобразуется почти в точку на профиле, но форма сечения этой «точки» отличается от идеальной в виде короткого, близкого к  $\delta$ -функции, импульса со всех сторон в локальной области вокруг точки фокуса. Кроме того, каждый метод вносит интерференционную помеху в дальней и ближней зонах периферии главного пика. Уровень методических помех, а также локальные искажения формы главного пика выходного сигнала для каждого метода отличаются. Поэтому рассмотрим все методы по порядку.

На приведенных ниже рисунках показаны методические помехи при дифракционном суммировании по гиперболе (метод 1, рис. 2), при миграции методом фазового сдвига (метод 2, рис. 3), методом Столта (метод 3, рис. 4) и методом Кирхгофа (метод 4, рис. 5). Следует отметить, что на данных рисунках для получения представления о распределении методических помех по всему профилю уровень сигналов всех трасс увеличен с ограничением максимального пика в центре фокуса миграции.



**Рис. 2.** Миграция гиперболы методом 1



**Рис. 3.** Миграция гиперболы методом 2

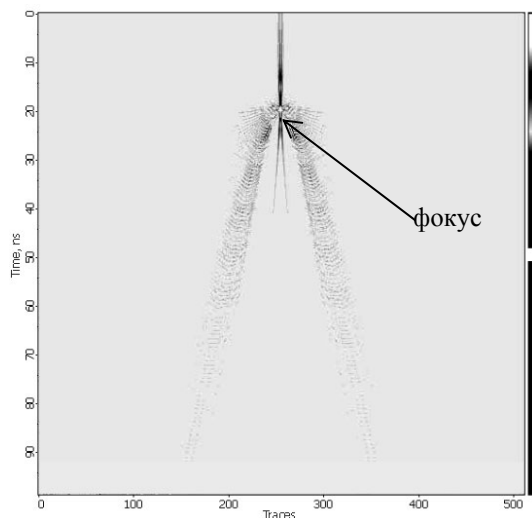


Рис. 4. Миграция гиперболы методом 3

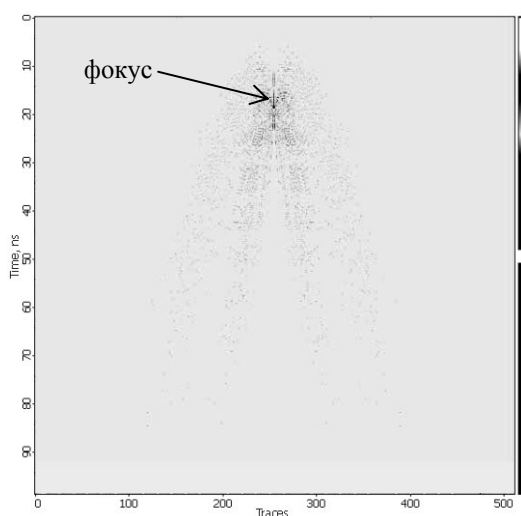


Рис. 5. Миграция гиперболы методом 4

Анализируя визуально приведенные результаты, можно уже по общему виду определить, какой из методов вносит наименьшую методическую помету - это метод Кирхгофа, а самый большой уровень помехи порождается методом фазового сдвига. Это также подтверждается табл.1, где даны величины отношения пикового уровня сигнала к среднеквадратичному уровню помехи по всему профилю и вокруг дифрактора в квадрате 100x100 (полный размер профиля 512 трасс на 512 отсчетов) для каждого из указанных методов.

Таблица 1. Уровень методических помех при усреднении по всему профилю и вокруг дифрактора

Отношение сигнал/помеха	Metode 1	Metode 2	Metode 3	Metode 4
по всему профилю	22.85 dB	19.27 dB	24.85 dB	25.56 dB
вокруг дифрактора	16.66 dB	13.84 dB	17.69 dB	19.2 dB

На приведенных ниже рисунках показаны профили после миграционного преобразования

гиперболы (плотностной профиль и справа от него вертикальный разрез по максимальному пику) в крупном масштабе (от 17,5 до 22,5 ns по вертикали, всего 0-93.75 ns, и от 248-й до 263-й трассы по горизонтали) для дифракционного суммирования (рис. 6) и методов фазового сдвига (рис.7), Столта (рис. 8) и Кирхгофа (рис. 9).

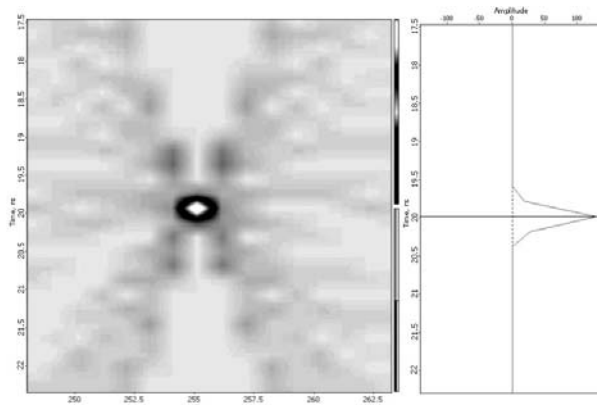


Рис. 6. Изображение фокуса в крупном масштабе в результате миграции по методу 1

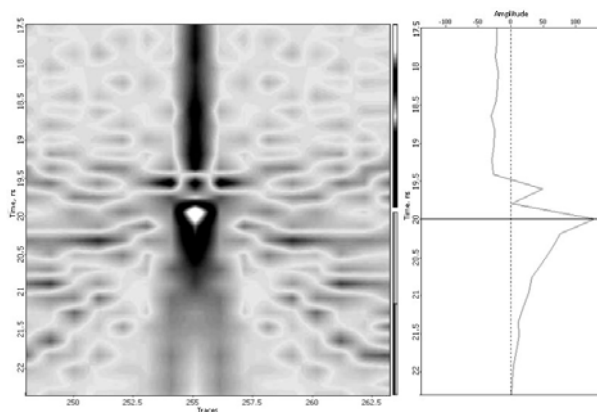


Рис. 7. Изображение фокуса в крупном масштабе в результате миграции по методу 2

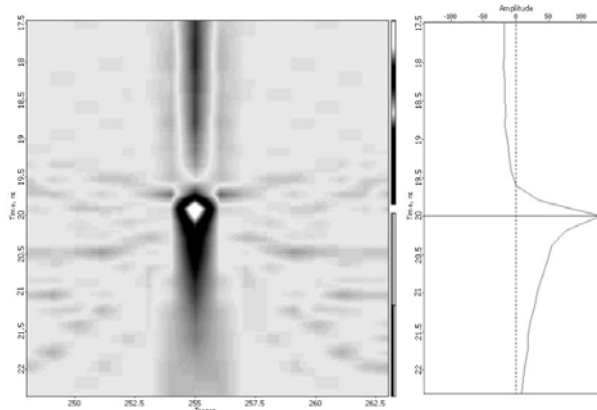


Рис. 8. Изображение фокуса в крупном масштабе в результате миграции по методу 3

Помехоустойчивость методов миграции по отношению к аддитивному белому гауссовому шуму проверялась на той же модели дифракционной гиперболы при разных пиковых отношениях С/Ш в

исходном профиле. Результаты представлены на рис. 10.

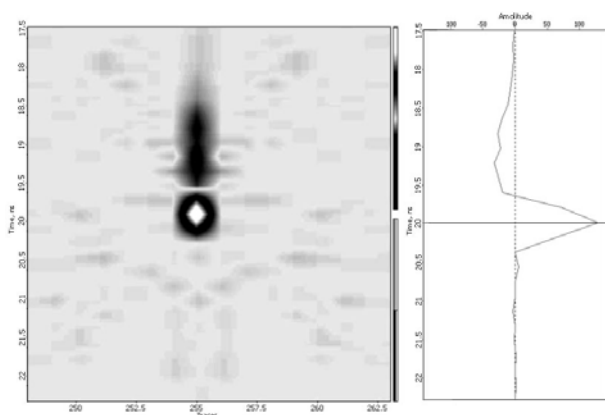


Рис. 9. Изображение фокуса в крупном масштабе в результате миграции по методу 4

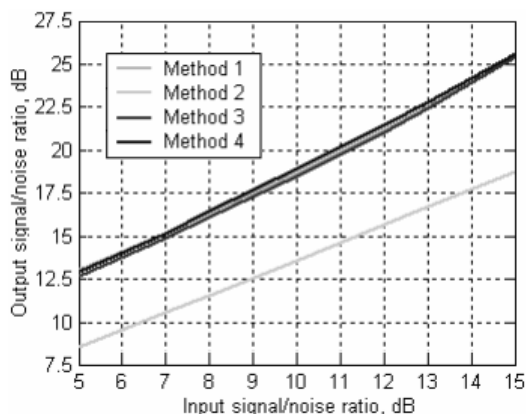


Рис. 10. Зависимость пикового отношения С/Ш после миграции от отношения С/Ш в исходном профиле

Из графика рис. 10 видно, что пиковое отношение С/Ш после миграции больше, чем в исходном профиле. Это является следствием эффекта синфазного суммирования сигналов всех трасс из точек пересечения ими гиперболы в фокусе миграции. Величина этого выигрыша для всех методов, кроме метода фазового сдвига, достигает величины примерно 10 dB. А для метода фазового сдвига – всего 3,5 dB. С ростом пикового отношения С/Ш до миграции после нее оно возрастает для всех методов линейно (в dB), т.е. увеличение на определенную величину входного значения приводит к увеличению выходного значения примерно на такую же величину. Так, например, метод фазового сдвига при входном отношении С/Ш 5 dB на выходе дает 8,52 dB, а при 15 dB, как и следовало ожидать, это отношение увеличивается примерно на 10 dB и получаем 18,71 dB.

Так как с глубиной изменяется форма гиперболы (растет радиус кривизны у вершины), следует проверить зависимость помехоустойчивости методов миграции от глубины залегания точечного дифрактора. Рассмотрим ту же модель профиля для точечного объекта, увеличив лишь глубину залегания последнего, т.е. задержку до вершины гиперболы, в 3 раза. Ввиду линейности рассмотренных методов миграции, нет

смысла проверять помехоустойчивость при разных исходных пиковых отношениях С/Ш, достаточно это сделать лишь при каком-то одном значении, например, 10 dB. Результаты измерений даны в табл.2.

Таблица. 2. Пиковое отношение С/Ш после миграции при входном отношении С/Ш, равном 10 dB

Задержка на глубину	Метод 1	Метод 2	Метод 3	Метод 4
20 ns	18,64 dB	13,59 dB	18,5 dB	18,86 dB
60 ns	18,63 dB	13,52 dB	18,34 dB	18,41 dB

Из приведенных результатов видно, что от изменения глубины помехоустойчивость зависит, но мало, незначительно уменьшаясь. Эти малые изменения связаны с некоторым увеличением среднего уровня вносимой методической помехи (из-за большей глубины залегания вершины гиперболы), индивидуальной для каждого метода. Сравнение методов по количеству вычислительных операций и по времени, затрачиваемому на обработку, можно объединить, т.к. второе напрямую зависит от первого. Полученные результаты лишь доказывают правильность приведенных в [3, стр. 95-97, 106-107] соображений о сравнительной вычислительной сложности 2-го, 3-его и 4-го методов.

Сравнение методов по времени обработки проводилось для массива данных из  $M=512$  трасс с  $N=512$  отсчетами (последние 32 равны нулю) в каждой из них, а результаты усреднялись по 10 запускам каждой из программ миграции на PC со следующими характеристиками: CPU – Intel Pentium 4, 1.61 GHz; RAM – 384 MB; OS – Windows XP.

Таблица.3. Время миграции при различных методах

Методы	Метод 1	Метод 2	Метод 3	Метод 4
Время, sec	0.47	61.6	1.53	12.28

Полученные результаты в табл.3 примерно соответствуют соотношениям для числа операций сложения/умножения для каждого из методов миграции. При этом следует иметь ввиду, что методы 2, 3 и 4 требуют использования 2D-БПФ и 1D-БПФ с комплексными операциями. Из этих результатов видно, что самым медленным методом является метод фазового сдвига, так как для его реализации после 2D-БПФ необходимо выполнить  $N$  раз умножение двухмерного спектра профиля на комплексный множитель фазового сдвига,  $M$  суммирований всех частотных компонент после каждого умножения и 1D-БПФ всякий раз после умножения и затем суммирования [1,2,3,5]. Для методов Столта и дифракционного суммирования время проведения миграционного преобразования существенно меньше. В методе Столта необходимо вначале выполнить 2D-БПФ, перейти с помощью линейной интерполяции («столтова» растяжения [1,2,4]) от равномерной сетки по оси частот к такой же по оси пространственных

частот по глубине и выполнить обратное 2D-БПФ [1,3]. При дифракционном суммировании (почему этот метод является самым быстрым) все операции – это суммирование целых чисел (типа *int*) по *N* рассчитанным гиперболам в *N*\**M* точках временного профиля. В методе Кирхгофа требуется выполнить два 1D-БПФ для каждой трассы - вначале трасса преобразуется в частотную область прямым 1D-БПФ и ее спектр фильтруется с помощью функции  $(j\omega)^{1/2} = \sqrt{\omega} \exp(j\pi/4)$ , а затем с помощью обратного 1D-БПФ вычисляется так называемая «полупроизводная» по времени каждой трассы исходного профиля - и, наконец, уже во временной области вещественных чисел суммированием вычисляется интеграл Кирхгофа преобразованного профиля [3,5]. Вычисление интеграла Кирхгофа увеличивает время обработки по сравнению с методом Столта в 8 раз, однако, это время в 5 раз меньше, чем для метода фазового сдвига. Эти выводы подтверждают примерные оценки, данные в [3].

Окончательный выбор рассмотренных методов миграции для практического использования основывается на ряде факторов. Рассмотрим их по порядку. Во-первых, это качество изображения точечного дифрактора, полученного в результате миграции гиперболы. Как было показано выше, ближе всего изображение к точечному получается при методах дифракционного суммирования, Кирхгофа и Столта, причем методы Кирхгофа и дифракционного суммирования дают наиболее близкое к точечному изображение фокуса преобразования. Однако, метод дифракционного суммирования из всех трех имеет наибольший уровень методической помехи на периферии главного максимума, в то время как метод Кирхгофа - самый наименьший уровень.

С другой стороны, следует отметить, что исследование методов производилось на модельных профилях при наличии лишь одного точечного дифрактора (одной гиперболы). Однако, на практике приходится работать с реальными данными, что накладывает определенные ограничения. Например, на реальных профилях всегда имеются, кроме отражений от точечных объектов в виде гипербол, отражения от распределенных объектов сложной конфигурации. На этом фоне, в случае методов Столта и Кирхгофа, вносимые методические помехи даже от очень сильных отражателей, лежащих у поверхности, настолько малозаметны, что визуально определить их влияние практически не представляется возможным, а вот помехи, вносимые методом дифракционного суммирования и, особенно, методом фазового сдвига, отчетливо видны.

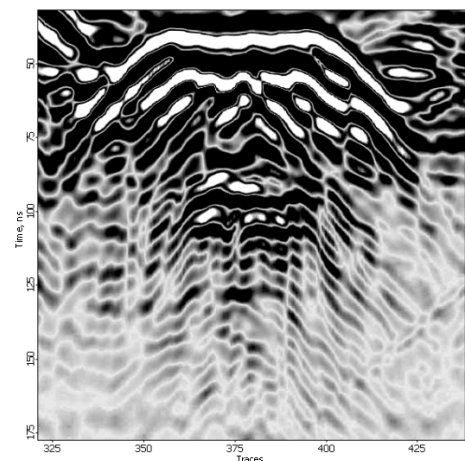
Следующий наиболее важный фактор – это время вычислений. Здесь из полученных данных (см. табл.3) видно, что наименьшие временные затраты на обработку требуют методы дифракционного суммирования и Столта, а метод Кирхгофа и, тем более, метод фазового сдвига (~62 секунды) требуют существенно большего времени.

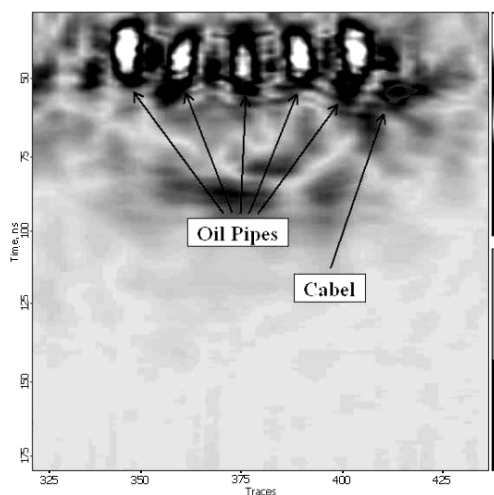
Основываясь на этих двух факторах, можно сделать вывод, что метод фазового сдвига требует

наибольших ресурсных затрат, а результаты имеет хуже, чем все остальные методы. Кроме того, метод фазового сдвига показал себя с наихудшей стороны и с точки зрения помехозащищенности, тогда как остальные три метода дали практически одинаковые, гораздо лучшие результаты. Следуя логике, вслед за методом фазового сдвига можно отбросить метод Кирхгофа, так как он требует времени для миграционного преобразования в 8 раз больше, чем метод Столта и в 26 раз больше, чем метод дифракционного суммирования, а по всем остальным факторам методы Столта, Кирхгофа и дифракционного суммирования достаточно близки.

Теперь остаются два метода – это метод дифракционного суммирования и метод Столта. Они относительно близки по временным затратам (метод Столта медленнее в 3,23 раза), однако уровень помех, вносимых методом Столта, существенно меньше, чем от метода дифракционного суммирования. Однако последний проще с точки зрения его программирования. Минусом метода дифракционного суммирования является также то, что он хуже показывает слабые полезные сигналы на фоне более интенсивных преобразованных гипербол, а метод Столта, наоборот, выделяет лучше, так как «столтова» обработка ближе к оптимальной, чем равновесное суммирование по гиперболе. Поэтому предпочтение, на наш взгляд, следует отдать методу Столта. Однако, если профиль длинный (много трасс), дифракционное суммирование дает заметную экономию времени. Поэтому в состав программного обеспечения обработки данных, наряду с методом Столта, рекомендуется включить и метод дифракционного суммирования по гиперболе. Примером может служить программный пакет обработки данных “Prism for Windows” для георадара Zond 12c фирмы Radar Systems, Inc (<http://www.radsys.lv>).

В заключение приведем пример миграции по Столту реальных данных. На рис.11 показан фрагмент исходного профиля и он же после миграционного преобразования и вычисления огибающей с помощью дискретного преобразования Гильберта – ДПГ (вычисляется с помощью быстрого преобразования Хартли – БПХ, алгоритм ДПГ и текст С-программы БПХ приведены в [7]).





**Рис. 11.** Исходное изображение профиля бетонного короба с пятью трубами и одним кабелем (слева) и изображение того же профиля после миграции по методу Столта и вычисления огибающей (справа)

Эффект применения миграции очевиден. Разделение объектов было бы еще более заметным (особенно для кабеля на рис.11 справа), если для отображения разных уровней сигнала использовать не

шкалу серого, как на рис. 11, а специально подобранную цветную шкалу.

## Литература

1. **Yilmaz ÖZ.** Seismic Data Analysis. Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data. – Vol. 1. – Society of Exploration Geophysics, 2001.
2. **Claerbout J.F.** Imaging the Earth's Interior - Blackwell Scientific Publications, 1985. Перевод на русский язык. – Издательство «Недра», 1989.
3. **Claerbout J.F.** Earth Soundings Analysis: Processing versus Inversion - Blackwell Scientific Publications, 1992.
4. **Stolt R.H. and Benson A.K.** Seismic Migration: Theory and Practice. – Vol. 5. – Geophysical Press Limited, 1986.
5. **Robinson E.A.** Migration of Geophysical Data – International Human Resources Development Corporation, 1983. Перевод на русский язык. – Издательство «Недра», 1988.
6. **Gazdag J. and Sguazzero P.** Migration of Seismic Data // Proc. IEEE, 1984. – Vol. 72, №10. – P.1302-1315. Перевод на русский язык. –Издательство «Мир», редакция «ТИИЭР», 1984.
7. **Zelenkov A. and Stroitelev V.** An Application of the Discrete Hilbert Transform for Digital Processing of Subsurface Radar Signals // Baltic Electronics, 1996. – Vol.2, №3. – P.37-40.

Pateikta spaudai 2004 01 30

**A. Zelenkov, S. Zelenkov. Migracijos metodo parinkimas paviršinės radiolokacijos signalams apdoroti // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr. 3(52). – P. 41-46.**

Aprašomi Gazdago, Stolto ir Kirchhofo signalų fazinio delsimo metodai. Įrodomi jų teigiamybės ir trūkumai bei siūlomas geriausias iš jų – georadarinis signalų apdorojimas. Metodų palyginimas bei parinkimas atliekamas panaudojant interferencinių triukšmų lygmenis. Analizuojama laikinė baltojo triukšmo įtaka radiolokacinių signalų visumai. Teoriniai ir eksperimentiniai rezultatai leidžia teigti, kad geriausia naudoti Stolto metodą, kuris pasižymi greitaiegiškumu ir mažu interferencinių signalų triukšmu. Teigiama, kad analogiškomis savybėmis pasižymi ir difrakcinio sumavimo metodas. Šie abu metodai padidina signalo ir triukšmo lygį. Pateikiami konkretūs eksperimentiniai duomenys, gauti taikant Stolto metodą. Il. 11, bibl. 7 (rusų kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

**A. Zelenkov, S. Zelenkov. The Choice of the Migration Method for Subsurface Radiolocation Signals Processing // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2004. – No. 3(52). – P. 41-46.**

There is a comparison four basic migration transform methods in the article, these are method of diffraction summation, Gazdag phase shift method, Stolt method and Kirchhoff method. The objective is the choice of the best method for practice application of georadar signal processing. The methods comparison is based on the level methodical interference, noise immunity and PC time consumption. Chosen methods are Stolt method and method of diffraction summation. Stolt method is quick enough and has small level of methodical interference. Method of diffraction summation is quickest. Both methods increase S/N ratio after migration. An example of real georadar profile migration by Stolt method is given. Ill. 11, bibl. 7 (in Russian; summaries in Lithuanian, English and Russian).

**A. В. Зеленков, С. А. Зеленков. Выбор метода миграции для обработки сигналов подповерхностной радиолокации // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2004. – № 3(52). – С. 41-46.**

Сравниваются четыре основных метода миграционного преобразования – метод дифракционного суммирования, метод фазового сдвига Газдага, метод Столта и метод Кирхгофа. Целью статьи является выбор наилучшего из них для применения в практике обработки сигналов георадара. Сравнение методов проводится по уровню методических интерференционных помех, по помехоустойчивости к аддитивному белому шуму и по временным затратам на РС. В результате предлагается использовать метод Столта как достаточно быстрый с малым уровнем интерференционных помех и метод дифракционного суммирования как наиболее быстрый. Оба метода дают увеличение отношения С/Ш после миграции. Приводится пример миграции методом Столта реального георадарного профиля. Ил. 11, библи. 7 (на русском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).