

В.В. Набатов, Р.М. Гайсин

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ПОЛОСТЕЙ В ЗАОБДЕЛОЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Рассмотрены основные приемы обработки георадиолокационных данных, позволяющие подчеркнуть аномальные участки радарограмм, которые могут указывать на наличие полости за обделкой. Описаны особенности выравнивания амплитуд, применения преобразования Гильберта, горизонтальной фильтрации. Показаны причины, по которым применение этих методов обработки оказывается эффективным. Выравнивание амплитуд позволяет скорректировать быстрое затухание сигнала, указывающего на полость за обделкой. Наиболее оптимальным оказывается использование статистических параметров вычисляемых в скользящем окне, которые далее используются как выравнивающий коэффициент. Горизонтальная фильтрация в скользящем окне позволяет обострить детали волнового поля и подчеркнуть аномалии на радарограмме. Преобразование Гильберта позволяет получить огибающую сигнала, количество информации в которой по сравнению с исходной трассой редуцировано. В результате по упрощенной волновой картине, с подчеркнутыми особенностями сигналов-идентификаторов легче принимать интерпретационное решение.

Ключевые слова: обработка георадиолокационных данных, преобразование Гильберта, выравнивание амплитуд, горизонтальная фильтрация, обделка, полость, «звон», «звенящий» сигнал.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-19-25

Полости на границе «обделка-грунт» могут оказывать существенное влияние на безопасность движения в транспортных тоннелях и особенно в тоннелях метрополитенов. Предотвращение аварийных ситуаций связанных с полостями в заобделочном пространстве производят с помощью тампонажных процедур, подразумевающих нагнетание через технологические отверстия специального раствора. Главной предварительной задачей здесь является выявление участков тоннелей, где полости достаточно велики и требуют ремонтных работ. Описываемую задачу решают с помощью геофи-

зических методов, среди которых для поиска полостей и нарушений наиболее часто используют различные варианты сейсмоакустических методов [1, 2, 3, 4, 5], а также георадиолокацию [6, 7, 8, 9].

Сейсмоакустические методы характеризуются высокой скоростью обследования, но при этом низкой разрешающей способностью, что приводит к съемке с существенным шагом между измерительными точками [10]. Повышение плотности сети обследования и использование вариантов сейсмоакустических методов обладающих высокой разрешающей способностью, существенно уве-

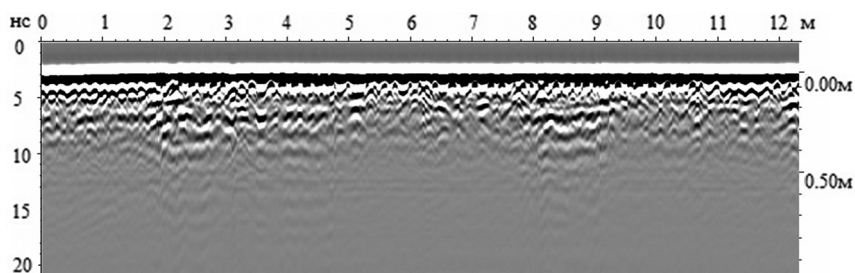


Рис. 1. Необработанная радарограмма, полученная на обделке тоннеля метрополитена

личивают время обследования, снижая оперативность контроля. Большая протяженность тоннелей и малый отрезок времени, в течение которого возможно производить обследование во время так называемого «ночного окна» делают оперативность контроля важным параметром исследований.

Отдельной проблемой является процедура интерпретации результатов, которая характеризуется такими недостатками как субъективность и трудоемкость. Эта проблема приводит к тому, что нередко контроль заобделочного пространства строится как полное обследование сейсмоакустическими методами дополняемое обследованием с помощью георадаров на отдельных участках. Решение проблемы лежит в разработке методов обработки получаемого волнового поля, способных облегчить или даже автоматизировать процесс принятия решения на стадии интерпретации. Эта статья посвящена выбору наиболее оптимальных процедур обработки георадиолокационных данных.

Основным идентифицирующим полость признаком является так называемый «звон» — длительный квазигармонический сигнал высокой амплитуды [11, 12]. Причиной возникновения «звонящего» сигнала на георадиолокационной трассе часто называют влияние областей с высокой проводимостью [13], которыми являются полости заполненные водой. Поскольку «звон» возникает и в случае если полость заполнена воздухом

[14], то, возможно, «звон» формируется и как множественные переотражения в полости [15].

Опираясь на данное выше определение «звона» можно выделить его особенности, которые стоит подчеркнуть обработкой. Это высокая амплитуда, большая длительность, квазигармонический характер волновой формы.

При этом стоит заметить, что далеко не всегда «звон» хорошо виден на необработанной радарограмме (см. рис. 1, георадар ОКО-2, АБ-1200). Высокая амплитуда «звона» имеет тенденцию к быстрому спадаению, из-за чего гармонический характер сигнала просматривается только на первых полупериодах. Это дает слабые различия между трассами снятыми над полостью и трассами, снятыми над точкой, где контакт между грунтом и обделкой хороший.

Выходом здесь является использование выравнивания амплитуд, которое можно реализовать с помощью применения корректирующих функций. Вариантами таких корректирующих функций могут быть возрастающие со временем трассы функции, заданные аналитическим выражением (экспоненциальная, линейная). Коэффициенты таких функций подбираются эмпирически. Либо это могут быть таблично заданные функции, основанные на вычислении статистических характеристик [12]. Последний вариант предполагает получение статистических оценок  $\theta$ , описывающих спадание амплитуды в двумерном скольз-

щем окне. Получаемая при этом статистическая оценка  $\theta(t)$  используется как оператор  $\theta^{-1}(t)$ , корректирующий спадающие амплитуды с увеличением времени трассы. Критерием выбора оценки  $\theta(t)$  является гладкость получаемой выравнивающей функции.

Рис. 2 иллюстрирует применение выравнивания ( $n$  — номер отсчета,  $A(n)$  — мгновенная амплитуда). К обеим трассам рис. 2 применена одна и та же процедура (функция выравнивания, основанная на статистических оценках). При этом трасса рис. 2, а получена при съемке на участке, где с обратной стороны находится полость, трасса рис. 2, б — там где полости нет. После выравнивания на рис. 2, а стал хорошо виден выраженный «звон» (сравнить его выраженность с исходной трассой, для которой не применялось выравнивание можно по рис. 2, в; непосредственно сам звон выделен пунктирным прямоугольником). В тоже время выравнивание для трассы, где полость отсутствовала «звон» не выделяет (см. рис. 2, б).

Другая проблемная особенность связана с особенностями визуализации волновых полей. Многопериодная, обладающая множественными переходами через ноль и множественными максимумами и минимумами функция, которую представляют из себя трассы, читается значительно хуже, чем плавно меняющееся поле значений. Соответственно из-за избытка информации гораздо хуже считаются места, где амплитуда сигнала повышается. Это не очень сильно мешает считать очевидные случаи, но мешает работать со спорными участками, которые трудно вычлнять из почти хаотично ведущего себя волнового поля. Поэтому в ряде случаев желательно сокращать представляемое на радарограмме количество информации.

Одним из наилучших решений здесь можно назвать использование преобразования Гильберта, часто используемого при обработке георадиолокационных сигналов [16, 17, 18]. Исходный сигнал преобразуется в так называемый аналитический сигнал, представляющий собой

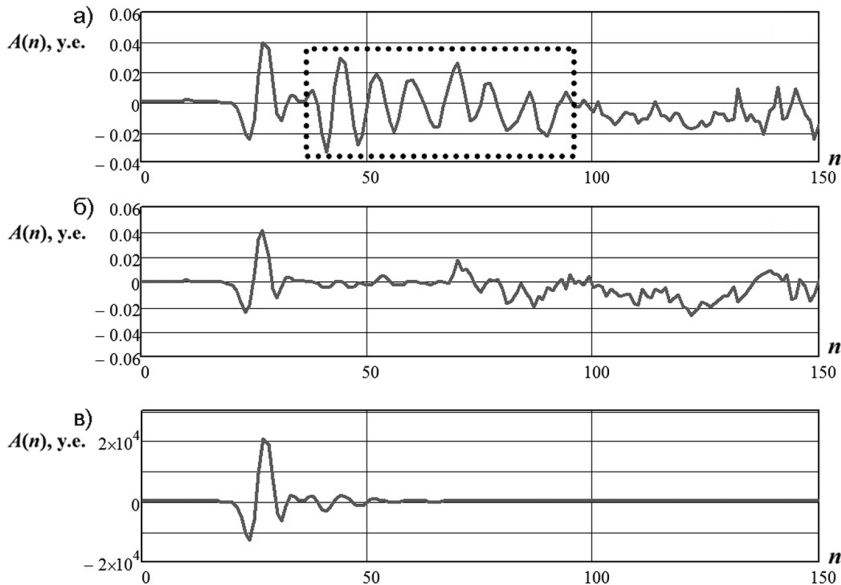


Рис. 2. Выравнивание трасс: выровненная трасса, полученная вне влияния полости (а); выровненная трасса, полученная над полостью (б); не выровненная трасса, полученная над полостью (в)

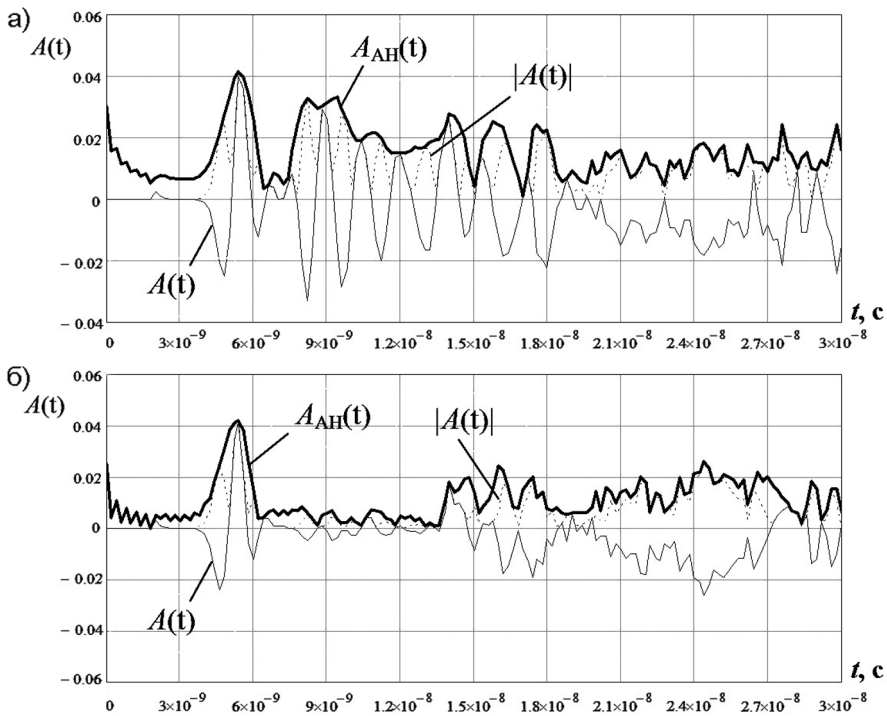


Рис. 3. Результаты обработки трасс: трасса, снятая над полостью (а); трасса, снятая вне влияния полости (б);  $A_{АН}(t)$  – исходный сигнал,  $A(t)$  – волновая форма после амплитудного преобразования Гильберта,  $|A(t)|$  – модуль амплитуд сигнала

комплексную функцию. Модуль и аргумент этой функции в свою очередь позволяют получать функции, которые интерпретируются как функции мгновенных амплитуды, фазы и частоты. Функция мгновенных амплитуд представляет собой огибающую сигнала и интерпретируется как сигнал, лишенный информации о частоте и фазе, что упрощает форму

сигнала и позволяет гораздо легче его читать.

На рис. 3 представлены примеры получаемых функций (обе функции предварительно выровнены). Исходный сигнал  $A(t)$  представляет собой сложную функцию с обилием выраженных максимумов. Модуль этого сигнала  $|A(t)|$  практически не решает проблему (суще-

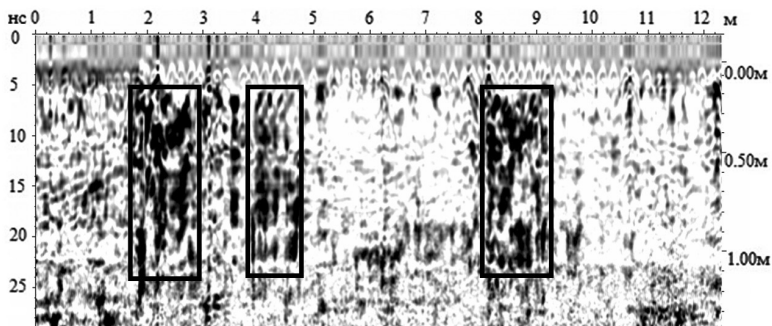


Рис. 4. Результат обработки радарограммы

ственные вариации амплитуд сохраняются). Огибающая  $A_{АН}(t)$ , полученная с помощью амплитудного преобразования Гильберта существенно упрощает картину. В результате увеличение амплитуды при наличии «звона» становится хорошо заметным — между 6-й нс и 15-й нс на рис. 3, а, б хорошо видно различие в ходе функций  $A_{АН}(t)$ . При визуализации в виде радарограммы область звона будет выглядеть как выраженное пятно аномалии. При этом практика также показывает, что аномалии желательнее подчеркивать горизонтальной фильтрацией с вычитанием скользящего среднего.

На рис. 4 представлен пример, радарограммы после обработки (выравнивание амплитуд, преобразование Гиль-

берта, горизонтальная фильтрация), позволяющий достаточно легко выделять аномалии волнового поля, являющиеся «звоном» при поиске полостей в заобделочном пространстве. Принимать решение по такой картине гораздо проще (на рис. 4 прямоугольниками выделены аномалии, указывающие на наличие полости в заобделочном пространстве).

В качестве развития методики обработки может выступить использование методов принятия решения работающих в  $n$ -параметрическом пространстве. В этом случае качестве параметров могут выступать значения амплитуды, спектральные параметры, результаты статистической обработки амплитудных значений трасс.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Писецкий В. Б., Власов С. В., Зудилин А. Э., Самсонов В. И., Шинкарьюк В. А. Опережающий прогноз устойчивости горного массива на основе метода 3D-3C-сейсмолокации в процессе проходки транспортных тоннелей // Известия вузов. Горный журнал. — 2012. — № 3. — С. 130–138.

2. Бауков А. Ю. Опыт комплексного применения геофизических методов неразрушающего контроля при обследовании подземных объектов и памятников культуры г. Москвы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2005. — № 7. — С. 87–92.

3. McCann D. M., Forde M. C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures // NDT&E International. 2001. Vol. 34. pp. 71–84.

4. Вознесенский А. И., Набатов В. В., Симонов Н. Н., Ромашенко В. А. Опыт акустического контроля границы «обделка-грунт» тоннелей метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 9. — С. 201–207.

5. Шилин А. А., Кириленко А. М., Знайченко П. А. Комплексные обследования бетонных и железобетонных обделок транспортных тоннелей ультразвуковым и ударно-акустическим методом // Транспортное строительство. — 2014. — № 5. — С. 12–14.

6. Фролов Ю. С. Обеспечение эксплуатационной надежности железнодорожного тоннеля при проходке над ним автотранспортных тоннелей на трассе-дублере Курортного проспекта в городе Сочи // Промышленное и гражданское строительство. — 2012. — № 6. — С. 21–23.

7. Барышников В. Д., Хмелинин А. П., Денисова Е. В. Диагностика состояния бетонной обделки горных выработок на наличие в ней неоднородностей с помощью георадиолокационного метода // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 1. — С. 30–38.

8. Nigel J. Cassidy, Rod Eddies, Sam Dods. Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground-penetrating radar and ultrasonic techniques // Journal of Applied Geophysics. Vol. 74. 2011, pp. 263–276.

9. Изюмов С. В., Дручинин С. В., Вознесенский А. С. Теория и методы георадиолокации: Учебное пособие. — М.: Изд-во «Горная книга», 2008. — 196 с.

10. Семенова А. А., Супилин М. А., Родионова А. Е., Родионова М. Е. Опыт комплексного применения виброакустического, термометрического и георадиолокационного методов контроля при изучении состояния перегонных тоннелей нижегородского метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 8. — С. 219–223.

11. *Mapping Voids, Debonding, Delaminations, Moisture, and Other Defects Behind or Within Tunnel Linings* // TRB's second Strategic Highway Research Program (SHRP 2) Report S2-R06G-RR-1. — 2013, 555 pp. DOI: 10.17226/22609.

12. *Набатов В. В., Гайсин Р. М., Вознесенский А. С.* Георадиолокационная оценка качества контакта «грунт-обделка» в условиях тоннелей метрополитенов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 9. — С. 157–163.

13. *Копейкин В. В.* Распространение электромагнитных импульсов в подземной среде. URL: <http://www.geo-radar.ru/articles/article5.php> (дата обращения: 15.01.2017).

14. *Набатов В. В., Вознесенский А. С.* Георадиолокационное обнаружение полостей в заобделочном пространстве тоннелей метрополитенов // Горный журнал. — 2015. — № 2. — С. 15–20.

15. *Изюмов С. В., Дручинин С. В., Вознесенский А. С.* Теория и методы георадиолокации: учебное пособие. — М.: Изд-во «Горная книга», 2008. — 196 с.

16. *Владов М. Л., Судакова М. С.* Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие. — М.: Изд-во «ГЕОС», 2017. — 240 с.

17. *Саввин Д. В., Федорова Л. Л., Омеляненко А. В.* Динамическая фильтрация георадиолокационных данных мерзлого горного массива неоднородной структуры // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 6. — С. 143–147.

18. *Семашкин К. В.* Практика инженерно-геологического обследования подтопленной дорожной насыпи методом георадиолокации // Вестник ВолГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. — 2013. — вып. 30 (49). — С. 320–327. **ПВВ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Набатов Владимир Вячеславович*<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент,

*Гайсин Роберт Мударасович*<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», e-mail: ftkp@mail.ru.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 1, pp. 19–25.

**V.V. Nabatov, R.M. Gaysin**

## HANDLING OF GPR DATA ON VOIDS IN ANNULAR SPACE

The article describes the basic methods of GPR data processing which used to help emphasize radIn focus of the discussion are the approaches to GPR data handling so that to distinguish anomalous patterns in radar charts which may be indicative of the presence of voids behind the lining. The data on voids are the basis for starting grouting. The features of amplitude equalization, Hilbert transformation and horizontal filtering are described, and the efficiency of these data processing techniques is explained.

The amplitude equalization allows correcting for quick signal attenuation pointing at the presence of voids behind the lining. The best way is the use of statistical parameters calculated in sliding window and used later on as equalizing coefficients. The horizontal filtering in the sliding window makes it possible to accentuate details of wave field and anomalies in the radar charts. The Gilbert transform produces a waveform envelop containing reduced information as compared with the initial path. As a result, the simplified wave pattern, with the highlighted features of signals-identifiers, facilitates the interpretive decision-making.

Key words: GPR data handling, Gilbert transform, amplitude equalization, horizontal filtering, lining, void, ringing effect, ringing signal.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-19-25

## AUTHORS

Nabatov V.V.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences,  
Assistant Professor,

Gaysin R.M.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences,  
Assistant Professor,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS»,  
119049, Moscow, Russia, e-mail: ftkp@mail.ru.

## REFERENCES

1. Pisetskiy V.B., Vlasov S.V., Zudilin A.E., Samsonov V.I., Shinkaryuk V.A. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2012, no 3, pp. 130–138.
2. Baukov A.Yu. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2005, no 7, pp. 87–92.
3. McCann D.M., Forde M.C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT&E International*. 2001. Vol. 34. pp. 71–84.
4. Voznesenskiy A.I., Nabatov V.V., Simonov N.N., Romashchenko V.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, no 9, pp. 201–207.
5. Shilin A.A., Kirilenko A.M., Znaychenko P.A. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2014, no 5, pp. 12–14.
6. Frolov Yu.S. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2012, no 6, pp. 21–23.
7. Baryshnikov V.D., Khmelinin A.P., Denisova E.V. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014, no 1, pp. 30–38.
8. Nigel J.Cassidy, Rod Eddies, Sam Dods. Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground-penetrating radar and ultrasonic techniques. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 74. 2011, pp. 263–276.
9. Izyumov S.V., Druchinin S.V., Voznesenskiy A.S. *Teoriya i metody georadiolokatsii: Uchebnoe posobie (GPR theory and methods: Educational aid)*, Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2008, 196 p.
10. Semenova A.A., Supilin M.A., Rodionova A.E., Rodionova M.E. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, no 8, pp. 219–223.
11. Mapping Voids, Debonding, Delaminations, Moisture, and Other Defects Behind or Within Tunnel Linings. *TRB's second Strategic Highway Research Program (SHRP 2) Report S2-R06G-RR-1*. 2013, 555 pp. DOI: 10.17226/22609.
12. Nabatov V.V., Gaysin R.M., Voznesenskiy A.S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 9, pp. 157–163.
13. Kopeykin V.V. *Rasprostranenie elektromagnitnykh impul'sov v podzemnoy srede*, available at: <http://www.geo-radar.ru/articles/article5.php> (accessed 15.01.2017).
14. Nabatov V.V., Voznesenskiy A.S. *Gornyy zhurnal*. 2015, no 2, pp. 15–20.
15. Izyumov S.V., Druchinin S.V., Voznesenskiy A.S. *Teoriya i metody georadiolokatsii: uchebnoe posobie (GPR theory and methods: Educational aid)*, Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2008, 196 p.
16. Vladov M.L., Sudakova M.S. *Georadiolokatsiya. Ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravleniy*. Uchebnoe posobie (Ground penetrating radar. From physical bases to future trends. Educational aid), Moscow, Izd-vo «GEOS», 2017, 240 p.
17. Savvin D.V., Fedorova L.L., Omel'yanenko A.V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2012, no 6, pp. 143–147.
18. Semashkin K.V. *Vestnik VolGASU. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2013. vyp. 30 (49), pp. 320–327.

## FIGURES

Fig. 1. Unprocessed radargram obtained on tunnel lining of subway.

Fig. 2. Tracks alignment: aligned track, obtained outside the influence of cavity (a); lined route received over cavity (b); misaligned track, received over cavity (v).

Fig. 3. Results of processing routes: route taken on the cavity (a); the route taken beyond the influence of cavity (b);  $A_{HH}(t)$  – original signal,  $A(t)$  – waveform amplitude after the Hilbert transform,  $|A(t)|$  – module of the signal amplitudes.

Fig. 4. Result of radargram processing.