© В.В. Набатов, 2014

УДК 550.8:[624.19:625.42+624.07]

В.В. Набатов

УМЕНЬШЕНИЕ ПОМЕХОВОГО ВЛИЯНИЯ ПРЯМОЙ ВОЛНЫ ПРИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОМ ОБСЛЕДОВАНИИ ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНОВ ЗА СЧЕТ ПОДАВЛЕНИЯ АРТЕФАКТОВ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрено снижение влияния артефактов обработки, возникающих при использовании методики подавления прямой волны, изложенной в первой части. Задача решается в контексте георадиолокационных обследований обделок тоннелей метрополитена.

Ключевые слова: прикладная геофизика, неразрушающий контроль, георадар, георадиолокация, железобетонная обделка, контакт «обделка-грунт», армирование, обработка данных.

В статье [1] была предложена методика подавления прямой волны (ПВ) георадара, которая существенно влияет на результаты обследований строительных конструкций. Основная задача обработки георадиолокационных сигналов ставилась как получение специальной радарограммы, которая содержит в основном помеховую составляющую волнового поля. После этого, из исходной радарограммы вычиталась помеховая, что давало разностную радарограмму в которой ПВ оказывалась подавленной.

Один из способов получения помеховой радарограммы состоял в следующем. Поскольку электрические свойства строительных конструкций слабо меняются вдоль их протяженности, то можно было рассчитывать, что они будут слабо влиять на изменения волновой формы ПВ (известно, что электрические свойства среды, с поверхности которой производится георадарное обследование влияют на форму излучаемого антенной импульса [2, с. 26; 3, с. 19; 4, с. 15–20] и на форму ПВ). Это позволяло взять одну трассу (желательно в точке максимально удаленной от арматурного прута) и, размножив ее, получить помеховую радарограмму. Такую радарограмму можно рассматривать как трехмерную модель ПВ, вычитая которую ПВ можно подавить.

При этом ожидается, что будет подавлена и донная ось синфазности (отражения от границы «грунт-обделка»). Однако этого не происходит в полной мере – слабые вариации электрических свойств конструкции оказывают гораздо большее влияние на проходящий через конструкцию сигнал, чем на процесс формирования ПВ. И поэтому донные отражения на расстоянии нескольких десятков сантиметров уже не совпадают по форме с помеховой моделью, и при вычитании модель их не компенсирует в полной мере. Грунты по своим электрическим свойствам достаточно существенно варьируют вдоль по профилю, и создать эффективную модель ПВ, воспользовавшись одной трассой, вряд ли возможно.

В процессе применения излагаемой методики обнаружился существенный изъян. В случае если форма ПВ все-таки оказывалась не соответствующей модели, то при ее вычита-

нии в результаты вносился артефакт. Так, например если модель содержала положительную протяженную ось синфазности, а исходная радарограмма на этих временах имела амплитуды близкие к нулю, при вычитании в разностной радарограмме образовывалась отрицательная протяженная ось синфазности. При этом приходилось решать – толи интерпретатор видит границу «грунт-обделка», толи паразитный сигнал. Предполагалось визуальное сравнение модельной и вычтенной радарограмм, что является достаточно трудоемким процессом.

Эта статья посвящена методам подавления подобных артефактов. Все данные для статьи получены на георадаре ОКО-2 1200 и 1700 МГц. На всех радарограммах в статье ось времен (в нс) – слева, ось глубин (в м) – справа; горизонтальная ось – расстояние вдоль по профилю. Радарограммы экспортировались в ASCII-код, после чего были импортированы в среду MathCAD. После обработки радарограммы экспортировались обратно в ASCII-код и визуализировались в программе Geoscan32.

Артефакты предполагается подавлять на основании того предположения, что модельная и вычтенная радарограммы будут хорошо коррелировать в тех местах, где находится не полезный сигнал, а паразитная ось синфазности. Эту особенность иллюстрирует рис. 1. Если ПВ присутствует и в исходных данных и в помеховой модели, то при вычитании ПВ подавится. Корреляция между модельной трассой и результатом вычитания будет приближаться к $R = 0$ (см. рис. 1, *а*). Если же в исходных данных ПВ на определенных временах отсутствует, а в модельной трассе присутствует импульс (либо за счет ПВ, либо за счет других причин), возникнет ситуация с паразитным артефактом (рис. 1, *б*). При этом корреляция

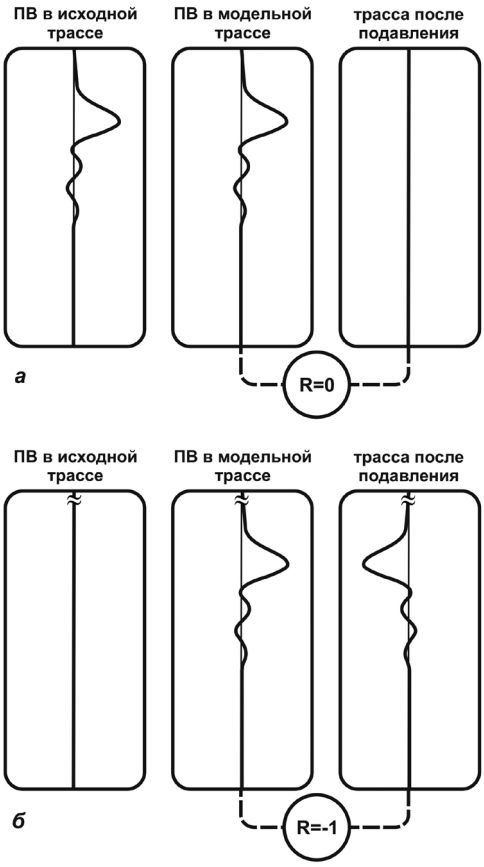

Рис. 1. Работа коэффициента корреляции как идентификатора артефакта обработки

между модельной трассой и результатом вычитания будет приближаться к $R = -1$. Учитывая, что модель помехи создается из одной размноженной трассы, импульс на которой превращается в протяженную не изменяющуюся горизонтальную ось синфазности (см. рис. 2, *б*), при вычитании подобная ось синфазности станет похожей на ряд донных отражений. Однако, она должна хорошо индицироваться $R \approx -1$.

Описываемый коэффициент корреляции R должен рассчитываться между двумя скользящими временными окнами (одно в конкретной трас-

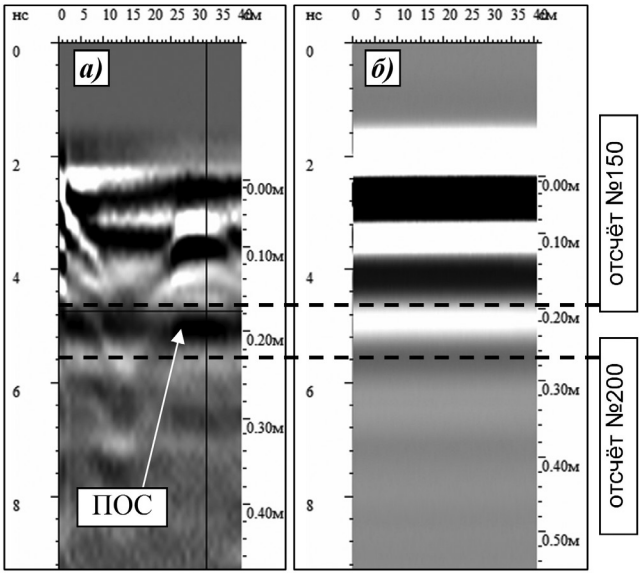

Рис. 2. Возникновение паразитной оси синфазности (ПОС): а – разностная радарограмма; б – помеховая модель; пунктирными линиями дан диапазон отсчетов трасс, в пределах которых паразитный сигнал оказывает наибольшее влияние на результаты. Георадар ОКО-2, 1700 МГц

ны скользящего окна. По-отсчетное смещение окна позволит получить ряд значений коэффициента корреляции для каждой трассы, представляющий собой функцию $R(t)$. Далее эта функция будет обозначаться как $R_N(n)$, где N – номер трассы, n – номер отсчета на трассе.

Волновое поле состоит не только из помеховых составляющих ПВ, поэтому функция $R_N(n)$ не будет иметь строгих значений $R_N(n) = 0$, $R_N(n) = -1$, однако явное приближение к $R_N(n) = -1$ будет указывать на то, что на трассе наблюдается артефакт обработки.

На рис. 2 представлен случай образования артефакта обработки, полученного в результате того, что ошибочно помеховая модель, созданная по результатам обследования одной балки, была распространена на все остальные помеховой модели, второе в соответствующей ей трассе разностной радарограммы). Значение R привязывается к временной точке середи-

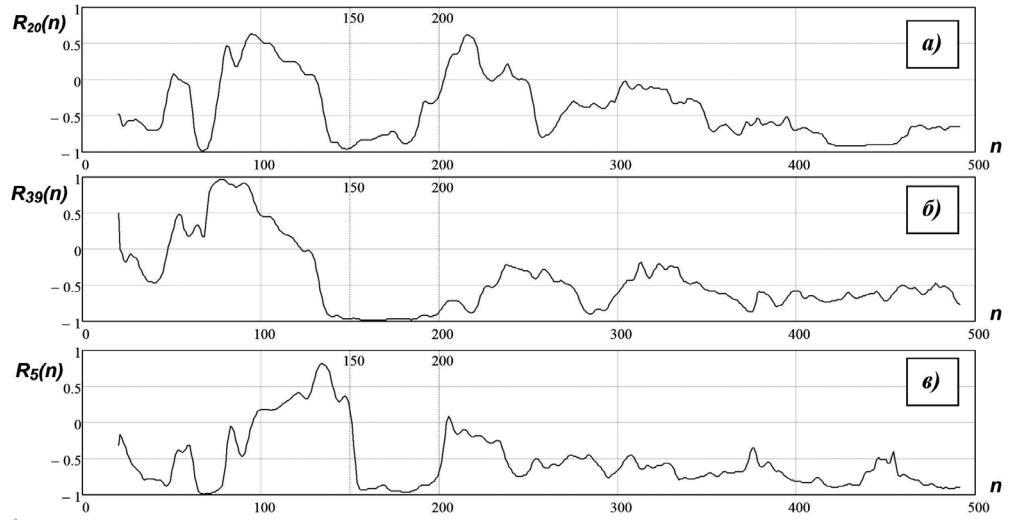

Рис. 3. Функции $R_N(n)$, вычисленные в скользящем окне для трасс № 20 (а), 39 (б), 5 (в). Пунктирными линиями указан диапазон отсчетов, на которых находится выявляемый артефакт обработки

ные балки помещения эксплуатируемого сооружения метрополитена. В одной балке ПВ компенсировалась, во всех других вычитание помеховой модели создало артефакт (на рис. 2, *а* приведен как раз этот пример). Наиболее выраженные амплитудные значения артефакта находятся между 150-м и 200-м отсчетами трасс радарограммы (указаны пунктирами).

На рис. 3, *а* дан пример вычисленной функции $R_N(n)$ для 20-х трасс радарограмм рис. 2, *а* и *б* (т.е. N = 20). Ширина скользящего окна – 40 отсчетов (при значениях меньше 30 график $R_N(n)$ ведет себя слишком хаотично). Можно заметить, что в области $150 < n < 200$ $R(n)$ приближается к 1. Другими словами $R_N(n)$ индицирует артефакт на трассе. Начало падения $R_N(n)$ раньше $n = 150$ можно объяснить шириной окна, а подъем раньше $n = 200$ можно связать с малостью амплитудных значений во втором полупериоде артефакта. Столь большого падения значений $R_N(n)$ достигает либо на локальных участках (район $n = 70$ для рис. 3, *а* и *в*; возможно там так же присутствует артефакт), либо в области шумов ($n > 400$), где исследование трасс не имеет практической значимости. На рис. 3, б и в так же дана еще пара функций $R_N(n)$, для других трасс (39-й и 5-й), чтобы показать стабильность результата. Попытки работать с коррелированием случайных величин в двумерных скользящих окнах привели к ухудшений идентифицирования артефактов.

Полученный результат позволяет интерпретатору принять решение, видит ли он донную ось синфазности, или артефакт обработки. Однако полученную функцию $R_N(n)$ можно использовать и для подавления артефакта, преобразовав ее в весовую функцию. Было рассмотрено два варианта подобных преобразований – линейный и нелинейный. Линейное преобразование будет иметь следующий вид:

$$W_{Л,N}(n) = k \cdot \frac{R_N(n) + s}{2},$$

где $W_{Л,N}(n)$ – весовая функция с линейным преобразованием, N – номер трассы, n – номер отсчета на трассе, $R_N(n)$ – функция коэффициента корреляции, s – коэффициент смещения, k – коэффициент масштабирования.

При $s = 1$ все значения $R_N(n)$ преобразовываются так, что измененное значение корреляции $R'_N(n)$ оказывается в диапазоне $0 < R'_N(n) < 2$. Для того, что бы сжать диапазон до $0 < R'_N(n) < 1$, значения разделены на 2. Коэффициент k нужен для того, чтобы дополнительно сжать или расширить диапазон чисел, в которых существует $W_{Л,N}(n)$. Учитывая, что конкретная точка $W_{Л,N}(n)$ соответствует конкретной точке n трассы N их умножение приведет к тому, что $R_N(n) = -1$

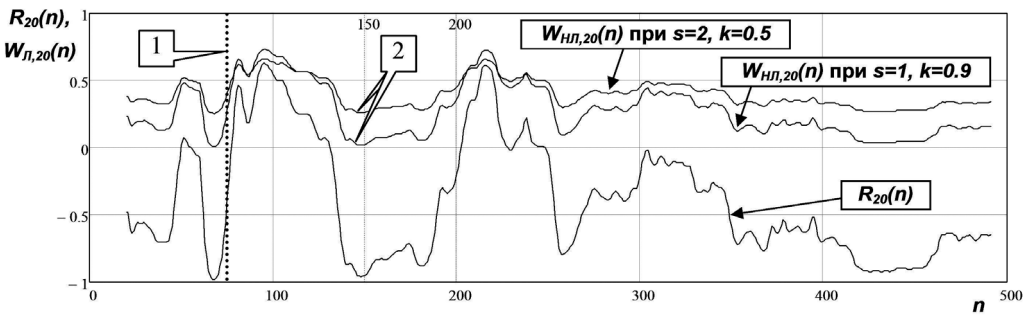

Рис. 4. Пример линейного преобразования функции $R_N(n)$

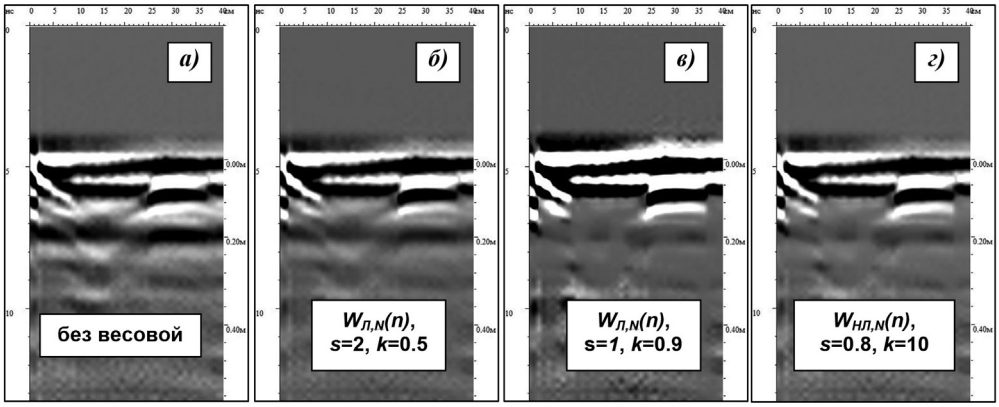

Рис. 5. Результаты подавления артефактов обработки

преобразуется в $W_{Л,N}(n) = 0$, а значения далекие от $R_N(n) = -1$ будут приближаться к $W_{Л,N}(n) = 1$. Паразитная ось синфазности будет подавлена.

На рис. 4 представлены графики $R_N(n)$ и $W_{Л,N}(n)$ для разных значений коэффициентов s и k при $N = 20$. Результат применения весовой функции с линейным преобразованием для различных коэффициентов представлен на рис. 5, *б, в*. Удалось подавить артефакт обработки и не затронуть остальные данные.

Анализируя графики можно заметить, что при $-0,7 < R_N(n) < 0$ весовая функция $W_{Л,N}(n)$ может иметь достаточно малые значения. При $R_N(n) = -0,5$, $s = 1$, $k = 0,9$, $W_{Л,N}(n) = 0,225$ (см. пунктирную линию рис. 4 цифра «1»). При таких $R_N(n)$ присутствие артефакта сомнительно, однако весовая функция будет существенно подавлять амплитуды трасс (22,5% от исходной амплитуды). Вариации коэффициентов s и k проблему не снимают, при низком k снижается влияние близких к -1 значений $R_N(n)$ (см. рис. 4 цифра «2»). Выходом здесь может быть такая нелинейная функция преобразования $R_N(n)$ при которой значения $R_N(n)$ близкие -1 имеют очень малый вес и подавляют артефакт, а начиная с некоторого уровня $R_N(n)$ быстро становятся равны 1 и не влияют на полезные сигналы. Для получения такой весовой функции удобно использовать свойства сигмоида. Весовая функция с нелинейным преобразованием может выглядеть следующим образом:

$$W_{НЛ,N}(n) = 1 - \frac{1}{1 + e^{k\cdot(R_N(n)+s)}},$$

где $W_{НЛ,N}(n)$ – весовая функция с нелинейным преобразованием, остальные обозначения идентичны тем, что расшифровывались для линейной функции. Коэффициент s смещает функцию преобразования вдоль по оси x, коэффициент k делает функцию более пологой или более быстро нарастающей.

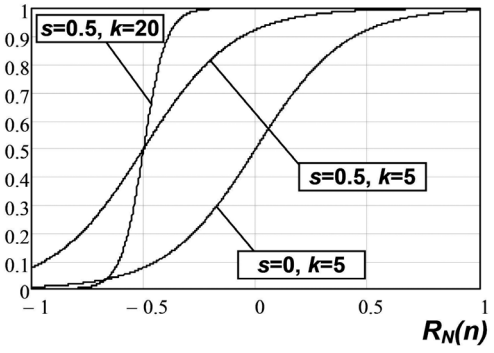

Рис. 6. Нелинейное преобразование $R_N(n)$ в $W_{НЛ,N}(n)$

Преобразование, которое производится над $R_N(n)$ при вычислении этой весовой функции иллюстрирует рис. 5. Так, например при s = 0,5, k = 5 значение $R_N(n)$ = -1 преобразуется в $W_{Н/Л,N}(n)$ = 0,076 (7,6% от исходной амплитуды), значение $R_N(n)$ = -0,5 в $W_{Н/Л,N}(n)$ = 0,5 (50% от исходной амплитуды), а $R_N(n)$ = 0 в $W_{Н/Л,N}(n)$ = 0,92 (92%). Что и требовалось от функции преобразования. Все это позволяет подобрать наиболее оптимальный вариант подавление артефактов. Примеры весовой функции для нескольких из трасс радарограммы рис. 2 представлен на рис. 7. Хорошо заметно, что как только $R_N(n)$ начинает слишком сильно отходить от значения -1 весовая функция $W_{Н/Л,N}(n)$ становится равной 1 и перестает влиять на мгновенные амплитуды георадиолокационных трасс (см. рис. 7 цифра «1»). Коэффициенты s и k позволяют регулировать эту особенность.

Результат применения $W_{Н/Л,N}(n)$ к радарограмме рис. 2 представлен на рис. 5, *г*. По этим результатам трудно сказать, что нелинейный вариант лучше линейного. Однако можно предложить практический пример, где нелинейная весовая функция более аккуратно и избирательно относится к обрабатываемым данным. На рис. 8, *а* представлена исходная радарограмма на которой ПВ подавляет полезные элементы волнового поля. Съемка ведется по боковой поверхности балки. В частности одной из задач является определение ее структуры. Рис. 8, *б* – результат традиционной обработки. Это горизонтальная фильтрация в скользящем окне с вычитанием среднего. Удалось выделить пруты армирования, вместе с тем подавлена донная ось синфазности (названный способ фильтрации направлен на подавление всех горизонтальных осей синфазности – и тех, что образованы ПВ и тех, что образованы полезными сигналами). Донная ось синфазности слабо просматривается и есть сомнения, что она реально присутствует на радарограмме.

Рис. 8, *в* и *г* получены следующим образом. Выбрана траса в левой части радарограммы, на ее основании создана помеховая модель, из исходной радарограммы вычтена помеховая модель. Рассчитаны функции коэффициента корреляции $R_N(n)$, которые преобразованы в линейную $W_{Л,N}(n)$ и нелинейную $W_{Н/Л,N}(n)$ весовые функции. Рис. 8, *в* – применение $W_{Л,N}(n)$, рис. 8, *г* – применение $W_{Н/Л,N}(n)$. В случае $W_{Н/Л,N}(n)$ (рис. 8, *г*) донная ось синфазности читается явно лучше. Остальная обработка радарограмм рис. 8, *в* и *г* – идентична.

Рис. 8, *д* иллюстрирует причины этого результата. На нем приведены примеры $R_N(n)$ и $W_{Н/Л,N}(n)$ для 25-й трассы. Полезный сигнал занимает первые 180 отсчетов трассы (этот временной уровень выделен пунктирной лини-

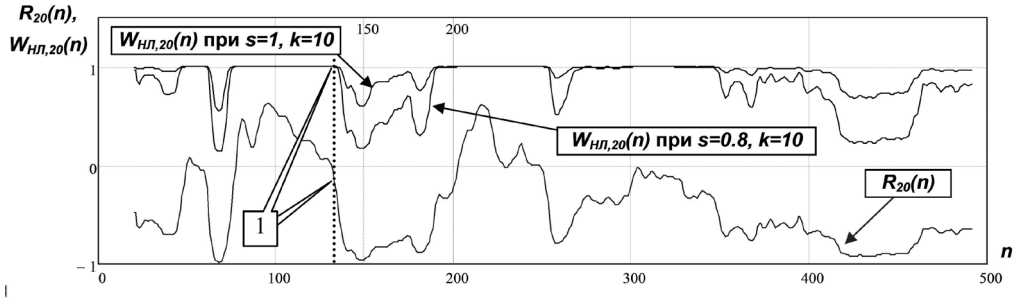

Рис. 7. Пример нелинейного преобразования функции $R_N(n)$

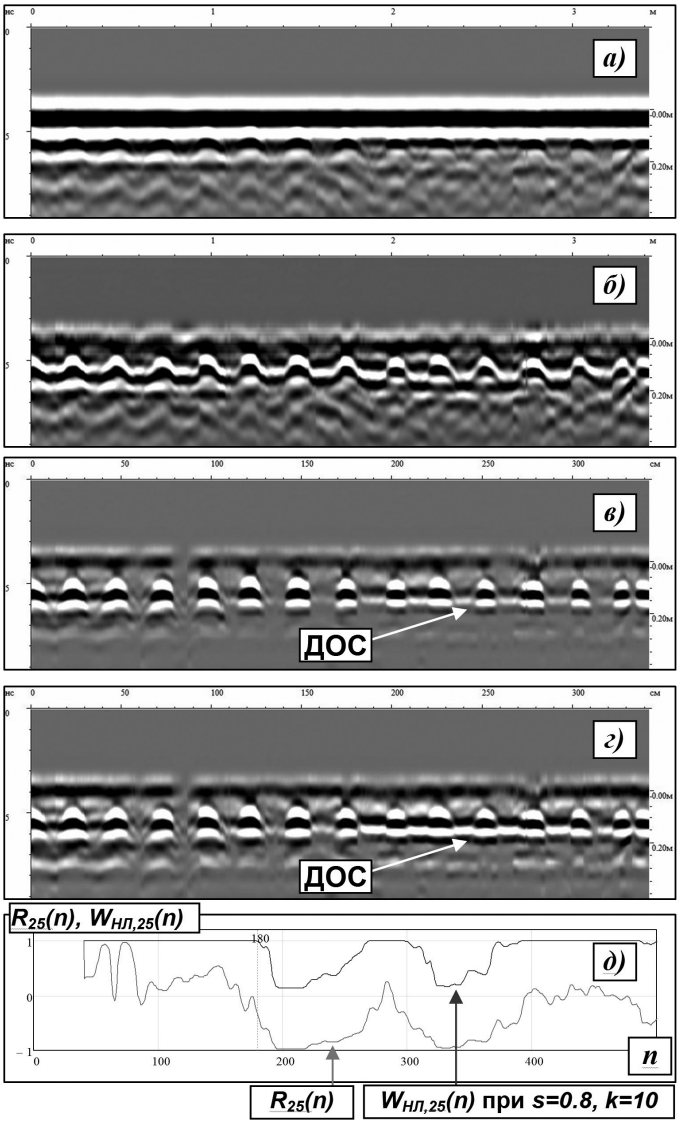

Рис. 8. Сравнение работы весовых функций полученных линейным и нелинейным преобразованием $R_N(n)$. ДОС – донная ось синфазности. Георадар ОКО-2, 1200 МГц

ей на рис. 8, *а*). До n = 180 $W_{НЛ,25}(n)$ почти везде равна 1 и на сигнал не влияет (нет артефактов, нет подавления). Этого нельзя сказать ни о $R_{25}(n)$ ни о линейной весовой функции (на рисунке не представлена). Очевидно, что вариации $R_N(n)$ будут влиять на полезную часть радарограммы. Также, поскольку ось синфазности не исчезла на рис. 8, *г*, можно сказать, что речь идет именно о донном отражении на глубине ~10–13 см, что позволяет предположить полое строение балки. Вычитание среднего достаточно часто вполне справляется с задачей аккуратного подавления ПВ и далеко не всегда донные оси синфазности подавляются этой обработкой.

Но приведенный пример показывает случай, когда предлагаемый подход оказывается эффективным.

Вывод. Предлагаемый метод подавления прямой волны с вычитанием помеховой модели позволяет выделять те полезные сигналы, которые искажаются при применении традиционной обработки (горизонтальная фильтрация в скользящем окне с вычитанием среднего). Артефакты в случае некорректности подобранной помеховой модели можно удалить, опираясь на функции коэффициента корреляции, преобразованные в весовые функции и рассчитанные для каждой из трасс. Получение помеховой модели с помощью характерного участка радарограммы работает только для строительных конструкций, в связи со слабой изменчивостью волновой формы ПВ вдоль по профилю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Набатов В.В.* Повышение эффективности георадиолокационного обследования кон-струкций тоннелей метрополитенов за счет уменьшения помехового влияния прямой волны // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – Отдельный выпуск № 1. – С. 43–55.

2. *Harry M. Jol.* Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier Science, 2009. – 544 pp.

3. *Владов М.Л., Старовойтов А.В.* Введение в георадиолокацию: Учебное пособие. – М.: Издательство МГГУ, 2004. – 153 с.

4. *Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С.* Теория и методы георадиолока-ции: Учеб.пособие. – М.: Издательство «Горная книга», 2008. – 196 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Набатов Владимир Вячеславович – кандидат технических наук, доцент,
МГИ НИТУ «МИСиС», *e*-mail: ftkp@mail.ru.

UDC 550.8:[624.19:625.42+624.07]

REDUCTION OF INTERFERING INFLUENCE OF THE DIRECT WAVE WHEN GPR SURVEY OF SUBWAY TUNNELS THROUGH SUPPRESSION OF ARTIFACTS PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA

Nabatov V.V., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», *e*-mail: ftkp@mail.ru.

The article is devoted to reduction of data processing artifacts, which are observed during direct signal suppression, described in first part of the article. Problem is solved for GPR subway's tunnels testing.

Key words: applied geophysics, nondestructive testing, NDT, tunnel testing, GPR, ground-penetrating radar, georadar, reinforced concrete lining, reinforcement, contact between the lining and the ground, GPR data processing.

REFERENCES

1. Nabatov V.V. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2014, special issue no 1, pp. 43–55.

2. Harry M. Jol. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier Science, 2009. 544 pp.

3. Vladov M.L., Starovoitov A.V. *Vvedenie v georadiolokatsiyu: Uchebnoe posobie* (Introduction to georadiolocation. Educational aid), Moscow, Izdatel'stvo MGGU, 2004, 153 p.

4. Izyumov S.V., Druchinin S.V., Voznesenskii A.S. *Teoriya i metody georadiolokatsii* (Theory and methods of georadiolocation. Educational aid), Moscow, Izdatel'stvo «Gornaya kniga», 2008, 196 p.