

Применение метода общей средней точки в многоканальной георадиолокации

Романов Дмитрий Борисович

Научно-производственное Объединение «Терразонд»

А.А. Зыков

Институт «Каналсетъпроект»

И.С. Федянин

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Ю.А. Сухобок

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

E-mail: info@terrazond.ru

Информация о толщинах слоев дорожной конструкции крайне важна для изучения состояния эксплуатируемых автомобильных дорог и оценки соответствия строительства новых. До недавнего времени контроль толщины слоев дорожной конструкции мог осуществляться разрушающим методом бурения или в ходе исполнительной геодезической съемки. С июля 2019 года на территории России начал действовать ГОСТ Р 58349-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Методы измерения толщины слоев дорожной одежды» согласно которому была утверждена методика применения георадиолокационного метода в комплексе с априорным бурением для определения толщины слоев дорожной конструкции. Однако для асфальтобетонных слоев свойственны процессы сегрегации, которые приводят к неоднородности их свойств. Очевидно, что усредненные значения диэлектрической проницаемости слоев дорожной конструкции могут приводить к погрешностям в определении толщины слоев, если объем калибровочного бурения будет недостаточным.

Одним из способов решения указанной задачи является применение метода ОСТ с использованием многоканальной аппаратуры для проведения георадиолокационных исследований [1-2].

Все рассуждения по рассматриваемому методу ОСТ будут строиться на лучевом подходе распространения электромагнитных волн. Так как вопрос рассматривается с точки зрения приближения геометрической оптики, соответственно, все ограничения этого подхода будут ложиться и на данную работу.

Рассмотрим однородную среду (рис. 1)

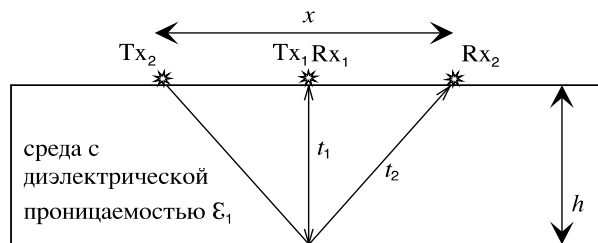


Рис. 1. Конфигурация ОСТ для георадара с моностатической и бистатической антенными системами при сканировании без отрыва от поверхности

Для простой однородной среды получаем аналитическое решение для нахождения толщины слоя и скорости электромагнитной волны в нем.

$$v = \frac{x}{\sqrt{t_2^2 - t_1^2}} \quad (1)$$

$$h = \frac{2xt_1}{\sqrt{t_2^2 - t_1^2}} \quad (2)$$

Скорость электромагнитной волны можно вычислить следующим образом:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_1}} \quad (3)$$

Рассмотрим случай двухслойной среды, первым слоем в которой является воздух. Тем самым смоделируем ситуацию, когда георадар находится на некоторой высоте над поверхностью земли.

На рисунке 2 x_{01}, x_{02} соответствуют расстоянию между двумя парами приемных и излучающих антенн; x_1, x_2 - расстояние между точками входа и выхода соответствующего луча; $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{t1}, \theta_{t2}$ - углы падения и преломления соответствующих лучей.

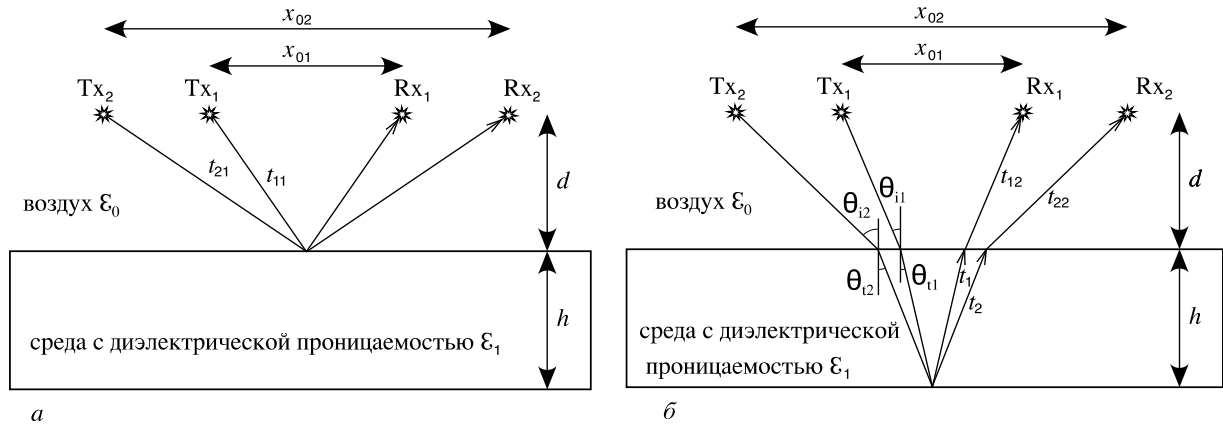


Рис.2 Конфигурация ОСТ для георадара, поднятого над землей: (а) отражение от поверхности земли; (б) отражение от исследуемого слоя.

Используя закон Снеллиуса, учитывая действительную часть комплексной диэлектрической проницаемости, а также комбинируя решения для геометрических построений из рисунка 2 получим уравнения для двух вариантов разноса:

$$\left(\frac{x_{01}-x_1}{2d}\right)^2 + 1 = \frac{t_1^2(x_2^2-x_1^2)^2}{t_1^2(x_2^2-x_1^2)^2 - x_1^2 c^2 (t_2^2 - t_1^2)^2} \quad (4)$$

$$\left(\frac{x_{02}-x_2}{2d}\right)^2 + 1 = \frac{t_2^2(x_2^2-x_1^2)^2}{t_2^2(x_2^2-x_1^2)^2 - x_2^2 c^2 (t_2^2 - t_1^2)^2} \quad (5)$$

Для решения уравнений 4 и 5 необходимо знать времена пробега лучей, которые можно получить используя георадиолокационные данные. Таким образом уравнения для временных задержек Δt_1 и Δt_2 получат вид:

$$\Delta t_1 = t_1 + \frac{2\sqrt{d^2 + (x_{01}-x_1)^2/4}}{c} - \frac{2\sqrt{d^2 + x_{01}^2/4}}{c} \quad (6)$$

$$\Delta t_2 = t_2 + \frac{2\sqrt{d^2 + (x_{02}-x_2)^2/4}}{c} - \frac{2\sqrt{d^2 + x_{02}^2/4}}{c} \quad (7)$$

Подставляя уравнения 6 и 7 в уравнения 4, 5, получим два уравнения с двумя неизвестными, которые решаются численными методами.

После вычисления значения x_1 и x_2 , а также t_1 и t_2 имеется возможность рассчитать диэлектрическую проницаемость исследуемого слоя ϵ_1 и толщину исследуемого слоя h :

$$\epsilon_1 = \frac{c^2 (t_2^2 - t_1^2)}{x_2^2 - x_1^2} \quad (8)$$

$$h = \sqrt{\frac{c^2}{\epsilon_1} t_1^2 - \frac{x_1^2}{4}} \quad \text{или} \quad h = \sqrt{\frac{c^2}{\epsilon_1} t_2^2 - \frac{x_2^2}{4}} \quad (9)$$

Проверка алгоритма проводилась на основе данных собранных аппаратурой георадиотомографии ГРТ-2Х. Георадиотомограф ГРТ-22 (рис.3), реализует метод многокурсного георадиолокационного зондирования, обеспечивает техническую возможность реализации алгоритма радиоволнового томосинтеза [3-6].



Рис.3 Аппаратура ГРТ-22

Аппаратура работает в частотном диапазоне от 500 МГц до 2000 МГц имеет каскадно расширяемую антенную решетку из 4-х модулей. Каждый антенный модуль имеет по 4-е антенных элемента для приемного и излучающего тракта, обеспечивающие 7-15-23-31 каналов измерения в тактированном (стандартном) режиме при подключении 1-2-3-4 антенных модулей к георадиотомографу.

Программируемая коммутация позволяет кроме стандартного режима - проводить измерения в режиме общей средней точки (ОСТ) для возможности расчета скорости прохождения сигнала в слое, при этом используются два варианта коммутации, осуществляющих зондирование общей точки разными по удаленности парами приемной и передающих антенных элементов. При активации режима ОСТ включаются дополнительно 3-и канала измерения для каждого антенного модуля.

На рисунке 4 показаны варианты коммутации для режима ОСТ

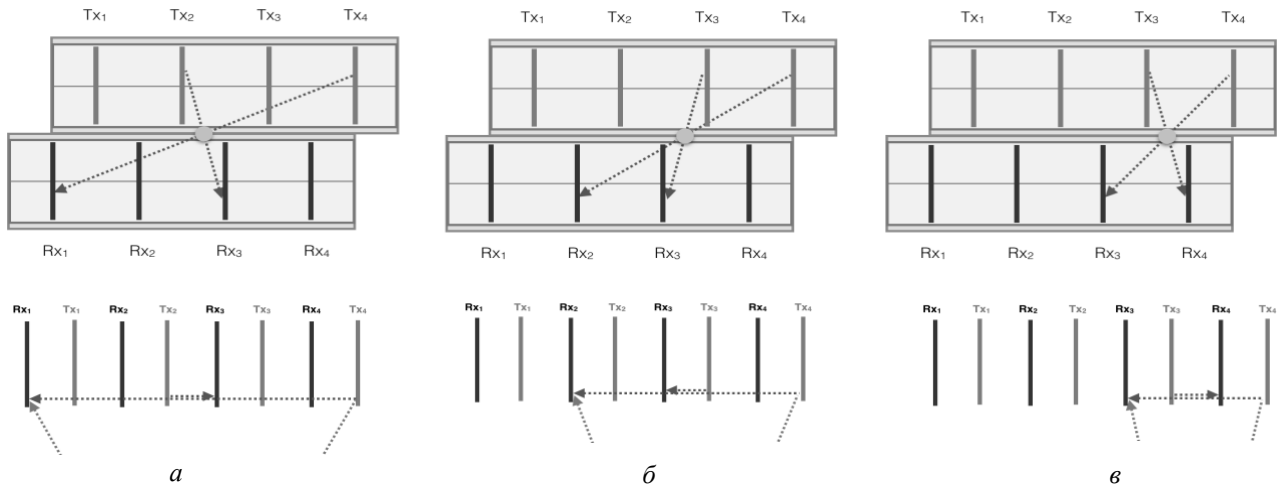


Рис. 4 Варианты коммутаций пар антенн режима ОСТ: а) $Tx_2Rx_3 - Tx_4Rx_1$, б) $Tx_3Rx_3 - Tx_4Rx_2$, в) $Tx_3Rx_4 - Tx_4Rx_3$

Для определения эффективной высоты размещения антенных блоков над сканируемой поверхностью, было проведено физическое моделирование при котором высота менялась с 40см до 0см от поверхности, результаты измерений для трех вариантов коммутации режима ОСТ представлены на рисунке 5.

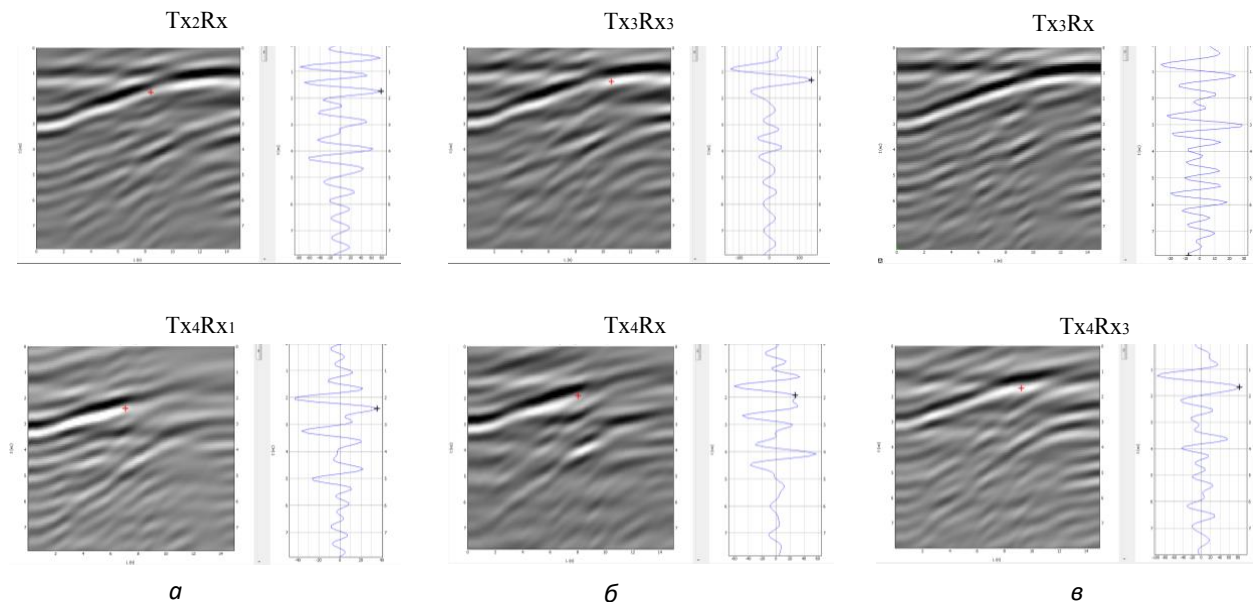


Рис. 5 Радарограммы и трассы на средней точке для вариантов коммутаций режима ОСТ: а) $Tx_2Rx_3 - Tx_4Rx_1$, б) $Tx_3Rx_3 - Tx_4Rx_2$, в) $Tx_3Rx_4 - Tx_4Rx_3$

Анализ данных показал, что для коммутаций стандартного режима работы: Tx_2Rx_3 , Tx_3Rx_3 , Tx_3Rx_4) при размещении антенного блока ниже 20см от земли - сигнал прямого прохождения интерферирует с сигналом отражения от границы поверхности, что может затруднять визуальное определение границы отражения от поверхности по радарограммам. Для варианта коммутации с максимальным разносом Tx_4Rx_1 граница поверхности отчетливо выделяется на высоте размещения антенн не ниже 34см.

Для проверки алгоритма использовались данные, полученные во время испытаний, на полигоне ГК «Автодор», организованных ФАУ «Росдорнии» - «Автомобильная дорога А-107 «Московское Малое Кольцо между Киевским и Минским шоссе, рядом с деревней Кобяково и пос. НИИ Радио». Анализировалась корректность работы алгоритма при высоте размещения антенного блока над поверхностью дороги $h=125$ мм. Благодаря наличию априорной информации по структуре дорожной конструкции имелась возможность количественной проверки работы алгоритма в точках отбора керна.

Обработка радарограмм в программном обеспечении GeoReader (ООО «ТИМ») проводилась в два этапа - интерполяция контрольных участков радарограммы и выявление общей средней точки на нижней границе асфальтобетона.

После процедуры интерполяции радарограммы уменьшающей шаг дискретизации по времени до 0.01 нс возможно более точное определение пиков максимума амплитуды сигнала, соответственно более корректное вычисление временных задержек.

Результат работы алгоритма для всех вариантов коммутации по трем скважинам представлен в таблице:

Скважина \ Разнос	ПК 1+28,6				ПК 3+68,4				ПК 5+07,5			
	Δt_1 , нс	Δt_2 , нс	ϵ_{cp}	h , м	Δt_1 , нс	Δt_2 , нс	ϵ_{cp}	h , м	Δt_1 , нс	Δt_2 , нс	ϵ_{cp}	h , м
Tx4Rx1—Tx2Rx3	1,74	1,64	5,94	0,107	1,8	1,67	5,63	0,113	2,08	2,12	5,17	0,138
Tx4Rx2—Tx3Rx3	1,82	1,71	5,73	0,114	1,82	1,71	5,7	0,114	2,07	1,97	5,66	0,131
Tx4Rx3—Tx3Rx4	1,75	1,68	5,63	0,109	1,83	1,75	5,44	0,116	2,23	2,13	5,4	0,141

Для каждой скважины оценены средние значения диэлектрической проницаемости и толщины, а также относительной погрешности определения толщины δh с учетом априорной информации, результаты расчета которой не превышают 5,5%.

По итогу проделанной работы описан алгоритм GPR-ОСТ, позволяющий с достаточной точностью определить толщину и диэлектрическую проницаемость дорожного покрытия. Результаты вычислений показывают высокую корреляцию решений на одной измерительной точке для разных вариантов коммутаций антенных пар режима ОСТ. Одной из важных задач в будущих работах является необходимость выявить принципиальные ограничения на использования алгоритма, в частности - определить минимальную и максимальную толщину слоя, а также высоту размещения антенной линейки над сканируемой поверхностью, при которых можно использовать алгоритм. Дальнейшие исследования направлены на отработку алгоритма при сканировании материалов с разным показателем диэлектрической проницаемости и толщины, а также на разработку методических указаний для применения алгоритма.

Список публикаций:

- [1] Еремин Р.А. О перспективах измерения толщины монолитных слоев дорожной одежды неразрушающим способом / Р.А. Еремин // Дороги и мосты. – 2017. – Вып. 37/1 – С. 95-108.
- [2] Super-Resolution of 3-D GPR Signals to Estimate Thin Asphalt Overlay Thickness Using the XCMP Method / Shan Zhao, Imad L. Al-Qadi / IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, PP(99):1-9, August 2018/.
- [3] Shipilov, S.E., Satarov, R.N., Tseplyaev, I.S., Stepanov, E.O. Using clocked UWB antenna arrays for 3D imaging (2014) CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings, статья № 6959769, pp. 1079-1080.
- [4] Shipilov, S.E., Tseplyaev, I.S., Satarov, R.N., Eremeev, A.I., Yakubov, V.P., Kurkan, I.K. Subsurface Radiolocation Tomography of Cables under Dual-Polarization Probing (2018) Russian Journal of Nondestructive Testing, 54 (6), pp. 443-447.
- [5] Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Сверхширокополосная томография движущихся объектов за диэлектрическими преградами // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 8/2. – С. 87-91.