

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **038601**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.09.21

(51) Int. Cl. **G01N 29/04** (2006.01)

(21) Номер заявки
201900356

(22) Дата подачи заявки
2019.05.21

(54) ГЕОРАДАРНОАКУСТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СЛОЕВ ПОКРЫТИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

(43) 2020.11.30

(96) 2019/ЕА/0049 (ВУ) 2019.05.21

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ "ИНСТИТУТ
ПРИКЛАДНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ
ПРОБЛЕМ ИМЕНИ А.Н.
СЕВЧЕНКО" БЕЛОРУССКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА; РОМАНОВ
АНАТОЛИЙ ФИЛИППОВИЧ;
ХОДАСЕВИЧ АЛЕКСАНДР
ИВАНОВИЧ; ЧЕРНОБАЙ ИВАН
АЛЕКСАНДРОВИЧ (ВУ)**

(72) Изобретатель:

**Романов Анатолий Филиппович,
Ходасевич Александр Иванович,
Чернобай Иван Александрович (ВУ)**

(74) Представитель:

Федорук Е.Ю. (ВУ)

(56) Zhongyu Li et al. Georadar vibration-acoustic technology for express-control of road pavement strength and result of its application. Journal of Measurement in Engineering. March 2019, Volume 7, Issue 1, с. 20-23

ВУ-С1-19008

JPH-05180812

JPH-A-03180757

SU-A1-1281882

RU-C1-2577624

(57) Изобретение относится к области измерительной техники, связанной с неразрушающим контролем физических характеристик материалов, в частности измерением прочности покрытий автомобильных дорог. Способ основан на комбинированном применении георадарного и акустического способов определения прочности слоев покрытий автомобильной дороги. Одновременно в слои излучают акустические импульсы и короткие зондирующие радиоимпульсные сигналы с последующим приемом и детектированием откликов, отраженных внутренними границами слоев. В соответствии с измеренными или табличными величинами диэлектрической проницаемости ξ_n для каждого слоя уточняется величина толщины. По уточненным величинам толщины слоев l_n вычисляются точные значения скоростей v_n распространения акустических волн. По ним находят точные значения модулей упругости E_n , связанных с прочностью материалов слоев дорожных одежд. Предложено устройство для реализации алгоритма действий. Оно содержит, в частности, рупорные излучающие антенны, блок управления и обработки сигналов, блок формирования временной диаграммы сигналов, блок синхронизации, приемные рупорные антенны, аналого-цифровой преобразователь, другие элементы. Результаты анализа показывают, что способ, устройство, алгоритмы проведения измерений можно реализовать на территории республики и получить удовлетворяющие результаты.

B1**038601****038601****B1**

Изобретение относится к области измерительной техники, представляющей собой неразрушающий контроль физических характеристик материалов, в частности измерения прочности покрытий автомобильных дорог.

Известно большое количество акустических, в том числе ультразвуковых способов измерения прочности материалов [1].

Близкой по технической сущности к устройству, реализующему известный способ измерений, является радарная система, просвечивающая дорожное покрытие, содержащая рупорную излучающую антенну, выходом связанную с покрытием автомобильной дороги, а входом - с выходом блока управления и обработки сигналов через последовательно включенные блок формирования временной диаграммы сигналов, вторым выходом подсоединенный к входу блока управления и обработки сигналов, блок синхронизации, второй вход которого связан с выходом тактового генератора, и формирователь радиолокационных зондирующих импульсов, причем второй выход тактового генератора связан со вторым входом блока формирования временной диаграммы сигналов через делитель частоты, а третий выход тактового генератора связан с управляемой линией задержки, второй вход которой подключен ко второму выходу блока синхронизации, а также содержащее приемную рупорную антенну, входом связанную с покрытием автомобильной дороги, а выходом - со входом блока управления и обработки через последовательно подключенные маломощный усилитель, устройство выборки-хранения, ко второму входу которого подсоединен выход управляемой линии задержки, аналого-цифровой преобразователь, ко второму входу которого подсоединен третий выход тактового генератора, и блок памяти, второй вход которого подсоединен к третьему выходу блока формирования временной диаграммы сигналов [2].

Недостатком близкой по технической сущности радарной системы измерений является невозможность определения прочности каждого слоя покрытия автомобильной дороги.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому способу является георадарноакустический способ измерения прочности слоев покрытия автомобильной дороги, при котором измеряют скорости распространения акустических колебаний в каждом слое покрытия, для чего зондируют слои покрытий автомобильной дороги импульсными радиолокационными сигналами и измеряют времена T_{p1} , T_{p2} , ..., T_{pn} распространения акустических волн от момента их формирования излучателем до момента фазоамплитудных флуктуации радиолокационных сигналов, отраженных от каждой границы между слоями, вибрирующей в соответствии со сдвигом фаз, вызванным распространением акустических волн от излучателя через слои контролируемого покрытия [3 - прототип способа].

Основным недостатком близкого по технической сущности способа является недостаточно высокая точность измерений как в стационарном режиме измерений, так и в процессе сканирования аппаратным комплексом автомобильной дороги из-за трудно определяемых границ между слоями дорожных одежд по причине близких значений между слоями диэлектрической и магнитной проницаемостей, что не обеспечивает достаточно большого уровня отраженного радиолокационного сигнала. Это вызывает затруднение по определению скорости распространения акустических волн в слоях и, как следствие, недостаточно высокую точность измерения их прочности.

Целью предполагаемого изобретения является увеличение точности измерения прочности покрытий автомобильной дороги.

Указанная цель достигается тем, что в близком по технической сущности решении, основанном на измерении прочности слоев покрытия автомобильной дороги, при котором измеряют скорости распространения акустических колебаний в каждом слое покрытия, для чего зондируют слои покрытий автомобильной дороги импульсными радиолокационными сигналами и измеряют времена T_{p1} , T_{p2} , ..., T_{pn} распространения акустических волн от момента их формирования излучателем до момента фазоамплитудных флуктуации радиолокационных сигналов, отраженных от каждой границы между слоями, вибрирующей в соответствии со сдвигом фаз, вызванным распространением акустических волн от излучателя через слои контролируемого покрытия, для каждой конкретной контролируемой границы между слоями, отражающей радиолокационный сигнал, определяют, регулируют, устанавливают и запоминают направление вектора поляризации зондирующего импульсного радиолокационного сигнала, соответствующее максимальному значению отраженного радиолокационного сигнала от конкретной контролируемой границы между слоями, затем во время распространения акустических колебаний перед достижением акустической волной соответствующей конкретной контролируемой границы между слоями дорожного покрытия воспроизводят и генерируют для этой границы зафиксированное значение вектора поляризации зондирующего радиолокационного сигнала, соответствующего максимальному значению отраженного радиолокационного сигнала от конкретной контролируемой границы и для установленных значений направления вектора поляризации для каждой границы между слоями путем выделения и регистрации амплитудно-фазовых флуктуации радиолокационных сигналов, отраженных от каждой границы между слоями, измеряют точные времена распространения акустических волн в каждом слое дорожного покрытия и на основании полученных результатов для времен распространения акустических волн определяют скорости распространения акустических волн в первом, втором, третьем, ... и n -ом слоях покрытия:

$$v_1 = \frac{l_1}{T_{P1}}; v_2 = \frac{l_2}{T_{P2} - T_{P1}}; \dots; v_n = \frac{l_n}{T_{Pn} - T_{Pn-1}}$$

где

$l_1, l_2, \dots, l_n$ - толщины каждого конкретного слоя, вычисленные по следующим формулам:

$$l_1 = \frac{c_0 t_1}{2\sqrt{\xi_1}}; l_2 = \frac{c_0(t_2 - t_1)}{2\sqrt{\xi_2}}; \dots; l_n = \frac{c_0(t_n - t_{n-1})}{2\sqrt{\xi_n}}$$

где

c_0 - скорость распространения в вакууме электромагнитной волны;

$t_1, t_2, \dots, t_n$ - отметки времени, затраченного радиолокационным сигналом на его пути от момента времени излучения радиолокационного импульса до момента приема его отражения от каждой границы между слоями дорожного покрытия при установлении индивидуального для этой конкретной границы вектора поляризации, соответствующего максимальному значению отраженного радиолокационного сигнала от этой же контролируемой границы между слоями;

$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ - величины диэлектрической проницаемости слоев;

причем по скоростям $v_1, v_2, \dots, v_n$ устанавливают слои по их типам, по которым корректируют величины их диэлектрических проницаемостей, и определяют для слоев индивидуальные величины плотности $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$, затем по полученным значениям плотности и уточненным значениям скоростей распространения акустических волн, скорректированных по диэлектрической проницаемости каждого слоя, оценивают значения модулей $E_1, E_2, \dots, E_n$ упругости, по которым определяют прочность каждого конкретного слоя дорожного покрытия. Конкретная физическая связь модулей упругости E_n со скоростями v_n распространения акустических волн и плотностями ρ_n контролируемых покрытий автомобильной дороги выражается известной формулой [3]

$$E = \rho \cdot v^2. \quad (1)$$

Наиболее близким техническим решением, реализующим близкий по технической сущности способ измерений, является устройство для осуществления способа, содержащее рупорную излучающую антенну, выходом связанную с покрытием автомобильной дороги, а входом - с выходом блока управления и обработки сигналов через последовательно включенные блок формирования временной диаграммы сигналов, вторым выходом подсоединенный к входу блока управления и обработки сигналов, блок синхронизации, второй вход которого связан с выходом тактового генератора, и формирователь радиолокационных зондирующих импульсов, причем второй выход тактового генератора связан со вторым входом блока формирования временной диаграммы сигналов через делитель частоты, а третий выход тактового генератора связан с управляемой линией задержки, второй вход которой подключен ко второму выходу блока синхронизации, а также содержащее приемную рупорную антенну, входом связанную с покрытием автомобильной дороги, а выходом - со входом блока управления и обработки через последовательно подключенные малошумящий усилитель, блок выборки-хранения, ко второму входу которого подсоединен выход управляемой линии задержки, амплитудно-цифровой преобразователь, ко второму входу которого подсоединен третий выход тактового генератора, и блок памяти, второй вход которого подсоединен к третьему выходу блока формирования временной диаграммы сигналов [4 - прототип устройства].

Недостатком наиболее близкого известного устройства, реализующего близкий известный способ измерения, является недостаточно высокая точность измерений по причине малой различимости для радиолокационных сигналов границ слоев одежд дорожных покрытий, что не позволяет получить достаточно точное определение прочности слоев дорожных покрытий.

Основной задачей и целью, на решение которой направлено заявляемое техническое решение, является увеличение точности по определению прочности каждого слоя многослойного покрытия автомобильной дороги.

Для осуществления способа измерения в наиболее близком известном устройстве для осуществления способа, содержащем рупорную излучающую антенну, выходом связанную с покрытием автомобильной дороги, и содержащем блок управления и обработки сигналов, выходом подключенный через последовательно связанные блок формирования временной диаграммы сигналов, вторым выходом подсоединенный к входу блока управления и обработки сигналов, блок синхронизации, второй вход которого связан с выходом тактового генератора, к формирователю радиолокационных зондирующих импульсов, причем второй выход тактового генератора связан со вторым входом блока формирования временной диаграммы сигналов через делитель частоты, а третий выход тактового генератора связан с управляемой линией задержки, второй вход которой подключен ко второму выходу блока синхронизации, а также содержащее приемную рупорную антенну, входом связанную с покрытием автомобильной дороги, а выходом - с входом блока управления и обработки через последовательно включенные малошумящий усилитель, устройство выборки-хранения, ко второму входу которого подсоединен выход управляемой линии задержки, аналого-цифровой преобразователь, ко второму входу которого подсоединен третий выход тактового генератора, и блок памяти, второй вход которого подсоединен к третьему выходу блока

формирования временной диаграммы сигналов, причем устройство содержит возбудитель акустических колебаний, вход которого связан с третьим выходом блока синхронизации через формирователь акустических сигналов возбуждения, а выход - с покрытием автомобильной дороги, и вторую рупорную приемную антенну, вход которой связан с покрытием автомобильной дороги, а выход - с третьим входом устройства выборки-хранения через второй малощумящий усилитель, в качестве рупорной излучающей антенны применена рупорная излучающая антенна с перестраиваемой поляризацией зондирующего радиолокационного сигнала, в качестве формирователя радиолокационных зондирующих импульсов применен формирователь радиолокационных зондирующих импульсов с регулируемой амплитудой, а также применены последовательно включенные кодовый формирователь максимума амплитуды сигнала заданной полярности, входом подсоединенной ко второму выходу аналого-цифрового преобразователя, схема сравнения кодов, вторым и третьим входом подключенная ко второму выходу блока памяти и к четвертому выходу блока формирования временной диаграммы сигналов, блок оптимизации максимального сигнала, формирователь сигналов управления и формирователь вектора поляризации, выходами связанный с входами рупорной излучающей антенны с управляемой поляризацией, причем второй вход формирователя вектора поляризации подсоединен ко второму выходу формирователя сигнала управления через коммутатор, вторым и третьим входами соответственно подключенный через повторитель и инвертор к выходам формирователя радиолокационных зондирующих импульсов с регулируемой амплитудой, вход управления которого связан с третьим выходом формирователя сигнала управления.

Решение поставленной задачи требует повышения разрешающей способности измерений по толщине слоев не хуже заданной величины h . Для этого ширина полосы частот излучаемой и приемной рупорных антенн устройства конструктивно выполнены равными:

$$\Delta f \approx \frac{c}{2h\sqrt{\xi_{\min}}}$$

где

c - скорость распространения электромагнитных волн в воздухе ($c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с);

$\xi_{\min}$ - диэлектрическая проницаемость слоя с минимальным ее значением из слоев, составляющих покрытие автомобильной дороги.

Кроме того, повышение точности измерений, функционирование блока управления и обработки сигналов по функции измерения толщины h слоев реализуется по алгоритму:

$$h = \sqrt{\frac{b^2(t'_n)^2 - a^2(t''_n)^2}{4[(t''_n)^2 - (t'_n)^2]}}$$

где

a и b - базовые расстояния между центром излучающей антенны и центрами приемных антенн;

t'_n и t''_n - измеренные времена распространения электромагнитных волн в соответствующих слоях.

Физическая сущность предлагаемого способа базируется на следующем.

Реализация способа основывается на комбинированном применении георадарного и акустического методов измерений, причем применяемая комбинация сочетает в себе положительные достоинства георадарного и акустического способов, что позволяет получить новый качественный результат по определению прочности покрытий автомобильной дороги. Функционирование предлагаемого георадарноакустического способа заключается в одновременном излучении в слои дорожных покрытий акустических импульсов и излучении коротких зондирующих радиоимпульсных сигналов с последующим приемом и детектированием сигналов, отраженных внутренними границами слоев дорожных покрытий. Способ позволяет измерять толщину каждого слоя покрытия и времена распространения акустических импульсов в каждом слое дорожных покрытий. На основании измерений вычисляют скорость распространения акустической волны в каждом слое покрытия. По результатам полученных вычислений определяют модуль упругости каждого слоя покрытия и оценивают его прочность.

Для увеличения точности сканируют, определяют и устанавливают оптимальный вектор поляризации зондирующего радиолокационного сигнала, при этом дополнительно регулируют уровень излучения электромагнитных импульсов для каждой контролируемой границы между слоями перед достижением этой границы фронтом акустической волны при ее распространении в слоях дорожных покрытий, что основывается на следующем.

Каждый слой покрытий дорожной одежды имеет свою сугубо индивидуальную характеристику физико-химических параметров, в том числе параметров, связанных с диэлектрической проницаемостью ζ и с магнитной проницаемостью μ . Соединение различных слоев дорожной одежды в общий каркас образует на границе слоев как градиент по различающимся физико-механическим параметрам, так и соответствующий им градиент по диэлектрической и магнитной проницаемостям. При этом, как правило, градиент диэлектрической проницаемости ζ является более выраженным. В целом эти градиенты или скачки проницаемостей хорошо обнаруживаются распространяющейся электромагнитной волной при условии,

что диэлектрическая и магнитная проницаемости при переходе электромагнитной волной границы слоев меняют свой знак, тогда электромагнитная волна хорошо отражается и граница слоев хорошо фиксируется. Но может быть такая ситуация и это наиболее распространенная реальность, что при переходе, например, от более верхнего слоя к более нижнему слою диэлектрическая проницаемость не уменьшается, а увеличивается. В этом случае полярность фазы отраженного сигнала не меняется, а происходит только некоторое частичное отражение сигнала от границы слоев с небольшим отраженным значением амплитуды. В этом случае распознавание отраженного сигнала становится затруднительным. Для увеличения степени отражения электромагнитного сигнала от подобных границ слоев, адекватных упомянутой границе слоев, то есть для устранения недостатка прототипа и направлено предлагаемое техническое решение.

В плане изложения физической сущности предложенного способа следует выделить исходные положения, базирующиеся на том, что градиенты как магнитной, так и диэлектрической проницаемостей имеют пространственную ориентацию. Это вызвано физической ориентацией диполей материала дорожных покрытий во внешних электрическом и магнитном полях во время строительства и сооружения покрытий, в том числе физической ориентацией диполей под воздействием как магнитного поля Земли, так и случайными воздействиями внешних электрических полей. Кроме того, имеет место влияние изменения структуры материала покрытия и связь ориентации диполей этой структуры с направлением и способом укладки во время производства работ. С позиций теоретического обоснования импеданс того или другого слоя для электромагнитной волны разной поляризации является разным, что обусловлено пространственной анизотропией материала слоя, описываемого тензором диэлектрической (магнитной) проницаемости [5].

Следует также отметить возникновение на границах слоев контактной разности потенциалов и возникновение взаимной магнитной ориентации между слоями, что также имеет векторную направленность и влияет на степень отражения электромагнитной волны. Поэтому в зависимости от пространственной ориентации магнитной и диэлектрической проницаемостей диполей материалов покрытий к направлению поляризации внешней электромагнитной волны имеет место разная степень отражения последней. Для получения положительного свойства функционирования измерений в плане обеспечения хорошей отражательной способности границ между слоями в предлагаемом способе устанавливают направление поляризации излучаемой электромагнитной волны по отношению к каждой границе между слоями дорожных одежд. Указанное изменение направления поляризации осуществляют мгновенно перед прохождением этой границы акустической волной, причем для каждой границы между слоями устанавливают свой индивидуальный вектор поляризации. Для качественного выделения скачка диэлектрической проницаемости в процессе измерений предварительно осуществляют точный подбор направления вектора поляризации по установлению максимального уровня отражения радиолокационного сигнала от контролируемой границы между слоями.

Таким образом, при реализации способа направление вектора поляризации для обнаруживаемой и контролируемой границы между слоями дорожных одежд является всегда оптимальным.

Это достигается тем, что в момент образования отраженной волны от контролируемой границы слоев все предыдущие верхние границы слоев дорожных одежд по углу поляризации являются неоптимальными. Благодаря этому электромагнитная волна хорошо проходит верхние слои дорожных покрытий, а для каждой контролируемой границы слоев к моменту прохождения акустической волны обеспечивается оптимальное функционирование по максимуму отражения радиолокационной волны. Дополнительное выравнивание амплитуд отраженных от границ различных слоев радиолокационных сигналов достигают быстродействующей установкой уровня излучения электромагнитных импульсов индивидуально для каждой контролируемой границы между слоями дорожных одежд. Эти отличительные признаки обеспечивают существенный положительный эффект, заключающийся в повышении точности измерений по сравнению с прототипом.

Следовательно, в динамическом режиме во время распространения акустической волны достигается и обеспечивается хороший уровень отраженных от границ слоев радиолокационных сигналов, что позволяет проводить четкое детектирование и точное выделение фазоамплитудных флуктуации отраженных от каждой границы слоя радиолокационных сигналов. Благодаря этому обеспечивается получение точных результатов по измерению скорости распространения акустических волн в слоях дорожных одежд, что обеспечивает, в свою очередь, получение высокой точности по определению прочности покрытий автомобильной дороги. В этом и заключается существенное преимущество предложенного способа измерений перед прототипом.

Проведенные экспериментальные исследования и полученные результаты в процессе реализации способа показали, что методика строительства дорог, в том числе укладка слоев дорожных покрытий, всегда имеет свои индивидуальные особенности, которые зависят от физико-химического состава укладываемых покрытий, от атмосферных условий, напряженности и направления внешних магнитных и электрических полей, сопутствующей вибрации и т.п. Указанные особенности фиксируются и фактически запоминаются через пространственную ориентацию диполей материалов покрытий. Выделение этих особенностей путем повышения различимости границ между слоями дорожных одежд достигается как

быстродействующей адресной установкой вектора поляризации для каждой границы слоев, так и быстродействующей установкой уровня излучения электромагнитных импульсов в динамическом процессе распространения акустических волн и служит реализации предложенного способа измерений.

На фиг. 1 приведена блок-схема устройства, реализующего предложенный способ измерений. На фиг. 2 приведен вид радарограммы. Фиг. 3 показывает выделенный участок автомобильной дороги с шестью слоями дорожных одежд. Функциональная схема георадарного измерителя применительно к определению толщины двух верхних слоев приведена на фиг. 4. Временная диаграмма распространения радиосигналов в многослойной среде дорожного покрытия представлена на фиг. 5.

В соответствии с предложенным техническим решением устройство, реализующее георадарноакустический способ измерения прочности покрытий автомобильной дороги, содержит (см. фиг. 1) рупорную излучающую антенну 1, выходом связанную с покрытием 2 автомобильной дороги, и содержащее блок 3 управления и обработки сигналов, выходом подключенный через последовательно связанные блок 4 формирования временной диаграммы сигналов, вторым выходом подсоединенный к входу блока 3 управления и обработки сигналов, блок 5 синхронизации, второй вход которого связан с выходом тактового генератора 6, к формирователю 7 радиолокационных зондирующих импульсов, причем второй выход тактового генератора 6 связан со вторым входом блока 4 формирования временной диаграммы сигналов через делитель 8 частоты, а третий выход тактового генератора 6 связан с управляемой линией 9 задержки, второй вход которой подключен ко второму выходу блока 5 синхронизации, а также содержащее приемную рупорную антенну 10, входом связанную с покрытием 2 автомобильной дороги, а выходом - с входом блока 3 управления и обработки через последовательно включенные малошумящий усилитель 11, устройство 12 выборки-хранения, ко второму входу которого подсоединен выход управляемой линии 9 задержки, аналого-цифровой преобразователь 13, ко второму входу которого подсоединен третий выход тактового генератора 6, и блок 14 памяти, второй вход которого подсоединен к третьему выходу блока 4 формирования временной диаграммы сигналов, причем устройство содержит возбуждатель 15 акустических колебаний, вход которого связан с третьим выходом блока 5 синхронизации через формирователь 16 акустических сигналов возбуждения, а выход - с покрытием 2 автомобильной дороги, и вторую рупорную приемную антенну 17, вход которой связан с покрытием 2 автомобильной дороги, а выход - с третьим входом устройства 12 выборки-хранения через второй малошумящий усилитель 18, причем в качестве рупорной излучающей антенны 1 применена рупорная излучающая антенна 1 с перестраиваемой поляризацией зондирующего радиолокационного сигнала, в качестве формирователя 7 радиолокационных зондирующих импульсов применен формирователь 7 радиолокационных зондирующих импульсов с регулируемой амплитудой, а также применены последовательно включенные кодовый формирователь 19 максимума амплитуды сигнала заданной полярности, входом подсоединенной ко второму выходу аналого-цифрового преобразователя 13, схема 20 сравнения кодов, вторым и третьим входом соответственно подключенная ко второму выходу блока 14 памяти и к четвертому выходу блока 4 формирования временной диаграммы сигналов, блок 21 оптимизации максимального сигнала, формирователь 22 сигналов управления и формирователь 23 вектора поляризации, выходами связанный со входами рупорной излучающей антенны 1 с управляемой поляризацией, причем второй вход формирователя 23 вектора поляризации подсоединен ко второму выходу формирователю 22 сигнала управления через коммутатор 24, вторым и третьим входами соответственно подключенный через повторитель 25 и инвертор 26 к выходам формирователя 7 радиолокационных зондирующих импульсов с регулируемой амплитудой, вход управления которого связан с третьим выходом формирователя 22 сигнала управления.

Функционирует устройство следующим образом.

Общее управление осуществляет блок 3 управления и обработки сигналов, посылая команду "Старт" в формирователь 4 временной диаграммы сигналов. Формирователь 4 инициирует каждый цикл измерения, который заключается в излучении зондирующего радиолокационного сигнала $s(t)$ и последующей регистрации в цифровом виде отраженного от слоев дорожных одежд радиолокационного сигнала $v(t)$. Получив команду "Старт", формирователь 4 посредством импульсов делителя 8 частоты формирует синхроимпульс цикла, который поступает на блок 5 синхронизации. Работа блока 5 синхронизирована с сигналом тактового генератора 6, импульсы которого поступают также на тактовый вход аналого-цифрового преобразователя 13 и на второй вход, управляемый линией 9 задержки, определяя этим моменты дискретизации сигнала $v(t)$. Получив сигнал синхроимпульса цикла, блок 5 синхронизации формирует синхроимпульс, который имеет высокую заданную стабильность и привязку к опорным импульсам тактового генератора 6. Синхроимпульс блока 5 возбуждает схему формирователя 7 радиолокационных зондирующих импульсов, выходной сигнал которого усиливается в формирователе 7 и излучается передающей (излучающей) антенной 1 во внутренние слои дорожной конструкции 2.

Отраженный от внутренних слоев покрытия 2 автомобильной дороги, сигнал $v(t)$ воспринимается приемной антенной 10, усиливается малошумящим усилителем 11 и поступает на вход блока 12 выборки-хранения. Блок 12 выборки-хранения запоминает мгновенную величину $v(t)$ по тактовому синхросигналу, поступающему с блока 5 синхронизации через управляемую линию 9 задержки, и преобразователь 13 осуществляет аналого-цифровое преобразование сдвинутой по времени мгновенной величины $v(t)$. Сдвиг по времени $v(t)$ равен времени задержки тактового импульса в управляемой линии 9 задержки.

Полученные цифровые коды с выхода преобразователя 13 вместе с сопровождающим синхроимпульсом подаются в блок 14 памяти. В своем составе блок 14 непосредственно содержит быстродействующие микросхемы памяти.

В блок 14 памяти поступает также импульс с формирователя 4 временной диаграммы сигналов. Этот импульс фактически означает начало цикла и по перепаду этого импульса блок 14 памяти записывает в память N кодовых выборок результатов измерений, поступающих с аналого-цифрового преобразователя 13, и после этого процесс записи прекращается. Для увеличения быстродействия число N загружается в схему управления на предварительном этапе автоматической настройки устройства, что определяет диапазон его измерений. Хранящиеся в блоке 14 памяти результаты измерений считываются и передаются по командному импульсу формирователя 4 временной диаграммы в блок 3 управления и обработки сигналов. На этом цикл измерений и сбора полученных данных измерений завершается.

Особенность устройства, реализующего предложенный способ, состоит в том, что радиолокационный зондирующий сигнал является широкополосным сигналом с относительно малой длительностью и требуется достаточно высокая частота дискретизации. Проблема решается применением стробоскопического метода. Реализуется это с помощью управляемой линии 9 задержки, которая программно по командам блока 5 синхронизации с помощью требуемого выделенного и задержанного импульса тактового генератора 6 формирует и пропускает этот импульс, плавно по программе задерживая его в необходимых пределах в соответствии с повторяющимися циклами измерений. Диапазон перестройки управляемой линии 9 задержки равен периоду тактового сигнала генератора 6, а величина дискретного шага перестройки определяет эффективный период дискретизации сигнала $v(t)$.

В результате получается преобразованный сигнал, который возможно точно сформировать и измерить, а также возможно провести его накопление и статистическую обработку, повысив тем самым точность георадарноакустических исследований. Малая инерционность измерений достигается посредством применения быстродействующего аналого-цифрового преобразователя 13 таким образом, чтобы не влиять на точность регистрации акустических сигналов, достигших при распространении одного или другого слоя дорожной одежды.

Для определения модуля упругости E с использованием устройства, реализующего предложенный способ измерений, в каждом слое дорожной одежды измеряется скорость v распространения акустических волн. Для этого посредством радиолокационного зондирования определяются толщины $l_1, l_2, \dots, l_n$ каждого слоя и измеряются время распространения T_p акустических волн в каждом слое.

Исходя из этого, основная последовательность реализации алгоритма измерений предложенного способа следующая:

а) В реальном масштабе времени последовательно в каждой точке измерений с большой частотой аналого-цифрового преобразования (до 40×10^6 выборок в секунду) регистрируют трассу георадарнолокационного сигнала. Эти трассы накапливают по мгновенным текущим измерениям в памяти блока 14 памяти, а по полным циклам измерений в памяти блока 3 в виде радарограммы, которая представляется в соответствующем окне отображения информации. Вид радарограммы приведен на фиг. 2, где z - горизонтальная координата по поверхности автомобильной дороги; h - координата глубины, определяемая временем t распространения радиолокационного сигнала с поправкой на диэлектрическую проницаемость ξ .

В соответствие с настройкой уровней отраженных от границ слоев дорожных одежд сигналов, на шкале радарограммы блоком 3 управления и обработки сигналов программно формируются отметки времени $t_1, t_2, \dots, t_n$, соответствующие указанным границам слоев дорожных одежд. По полученным отметкам определяются толщины $l_1, l_2, \dots, l_n$ слоев дорожных одежд:

$$l_1 = \frac{c_0 t_1}{2\sqrt{\xi_1}}; l_2 = \frac{c_0(t_2 - t_1)}{2\sqrt{\xi_2}}; \dots; l_n = \frac{c_0(t_n - t_{n-1})}{2\sqrt{\xi_n}}. \quad (2)$$

Переходы светлого поля к темному полю на фиг. 2 соответствуют отражениям радиолокационных сигналов от границ слоев дорожных одежд и по этим границам измеряются и программно формируются отметки времен t_i .

б) После определения выделенных точек слоев дорожных одежд, устройство, реализующее предложенный способ измерений, посредством блока 3 управления и обработки сигналов переводится в режим анализа изменений амплитуды сигнала в каждой выделенной точке. Временное детектирование (или выделение во времени изменений сигнала) соответствует временам T_p распространения акустических волн в каждом контролируемом слое. На основании такого детектирования получают численные значения времен распространения акустических волн, которые представляются в виде:

$$T_{p1} = \frac{l_1}{v_1}; T_{p2} = \frac{l_2}{v_2} + T_{p1}; \dots; T_{pn} = \frac{l_n}{v_n} + T_{p(n-1)}. \quad (3)$$

В формулах (3) величины $v_1, v_2, \dots, v_n$ представляют собой скорости распространения акустических волн в первом, втором или n-ом слое дорожной одежды.

с) На основании полученных результатов временных измерений вычисляются скорости распространения акустических волн в первом, втором, третьем и n-ом слоях:

$$v_1 = \frac{l_1}{T_{P1}}; v_2 = \frac{l_2}{T_{P2} - T_{P1}}; \dots; v_n = \frac{l_n}{T_{Pn} - T_{Pn-1}}. \quad (4)$$

д) Временное детектирование или выделение во времени изменений амплитуды сигнала в каждой выделенной точке не может реализовываться быстрее, чем длительность периода каждого зондирующего радиолокационного импульса. При частоте повторений сформированных зондирующих импульсов, равной $F_{\text{зонд}} = 40$ МГц, дискретность $\tau_{\text{изм}}$ равна:

$$\tau_{\text{изм}} = \frac{1}{F_{\text{зонд}}} = \frac{10^{-6}}{40} = 2.5 \cdot 10^{-8} = 25 \text{ (нс)}. \quad (5)$$

На основании (5) погрешность измерений Δ_τ равна:

$$\Delta_\tau = \frac{\tau_{\text{изм}}}{T_p} \cdot 100 \%. \quad (6)$$

Формула (6) определяет погрешность предложенного способа и устройства для его осуществления. Эта погрешность ограничивает, как будет показано ниже, точность вычисления значений времени T_p распространения и скорости v распространения на уровне не более одной десятой процента, что является достаточным для получения высокой точности измерений.

е) После проведения измерений времени T_p распространения акустических волн и вычислений по уравнениям (4) скорости $v_1, v_2, \dots, v_n$ распространения акустических волн определяется вид слоя и, соответственно, в памяти блока 3 управления и обработки сигналов определяется и фиксируется более точная измеренная величина $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n$ для каждого слоя.

Далее циклически реализуется следующий алгоритм (см. выше пункты а, б, и с и формулу (1)):

а) → б) → с) → [формула (1)].

Более подробно реализация этого алгоритма следующая: по формулам (2) в соответствии с измеренными или табличными величинами $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n$ для каждого слоя уточняются величины $l_1, l_2, \dots, l_n$. Затем по уточненным величинам толщины слоев вычисляются по формулам (4) более точные значения скоростей $v_1, v_2, \dots, v_n$ распространения акустических волн.

По этим значениям в соответствии с формулой (1) находятся более точные значения $E_1, E_2, \dots, E_n$ модулей упругости, связанных, в свою очередь, с прочностью материалов слоев дорожных одежд.

На фиг. 3 представлен пример участка автомобильной дороги с шестью слоями дорожных одежд среднего качества, который состоит из слоя 1 плотного асфальтобетона толщиной 5 см, слоя 2 плотного асфальтобетона толщиной 5 см, слоя 3 пористого асфальтобетона толщиной 15 см, слоя 4 щебня толщиной 30 см, слоя 5 песка толщиной 20 см, слоя 6 суглинка толщиной 20 см. Справа вертикальной линией с направлением вниз показаны отметки времени $t_{01}, t_{12}, t_{23}, t_{34}, t_{45}, t_{56}$, соответствующие моментам отражения радиолокационных сигналов от границ слоев.

Геометрические и физические параметры рассматриваемого участка приведены в табл. 1, в которой приведены также величины скорости v распространения акустических волн в каждом измеряемом слое автомобильной дороги.

Таблица 1. Характеристики строительных материалов дорожных одежд

Название слоя	Плотность $P, \text{ кг/м}^3$	Модуль упругости $E, [\text{МПа}]$	Скорость акустической волны $v, [\text{м/с}]$
Плотный асфальтобетон	2400	4500	1369
Пористый асфальтобетон	2300	2800	1103
Щебень фракционированный	1800	350-450	471
Песок средней крупности	1950	120	248
Суглинок тяжелый	2000	50	158

Из табл. 1 можно определить, что отношения скоростей v распространения акустических волн в слоях достаточно в хорошем приближении пропорциональны корню квадратному из отношений модулей упругости слоев. Это говорит о хорошей взаимосвязи скорости v распространения акустических волн с модулем E упругости, который, в свою очередь, связан с прочностью материалов.

Таблица 2. Расчетные соотношения времени T_p распространения акустических волн и времени t распространения электромагнитных волн

Название слоя	Толщина слоя (см)	Время распространения акустической волны T_p , мкс	Время распространения электромагнитной волны t , нс	Погрешность $\Delta\tau$, %
Плотный асфальтобетон	5	36,5	0,75	0,068
Пористый асфальтобетон	15	135,9	2,25	0,02
Щебень фракционированный	30	636,9	4,5	0,004
Песок средней крупности	20	806,4	3,0	0,003
Суглинок тяжелый	15	949,3	2,25	0,0025

В табл. 2 приведены расчетные соотношения времени T_p распространения акустических волн и времени t распространения электромагнитных волн для приведенных слоев дорожных одежд и приведена оценка погрешностей дискретизации измеряемых сигналов в предложенном способе измерений и устройстве для его осуществления. Погрешность измерений составляет величину меньше 0,1 %, что является приемлемым для получения высокой точности измерений.

Для решения задачи повышения разрешающей способности измерений по толщине слоев не хуже заданной величины h , ширина полосы частот Δf излучаемой и приемной рупорных антенн устройства, реализующего предложенный способ измерений, рассчитана в соответствии с необходимостью получения заданного быстродействия устройства для измерения малых толщин. Это требование следует из теории обработки и распознавания радиолокационных сигналов, базирующейся как на прямом и обратном преобразованиях Фурье, так и на получении соответствующего разрешения по дальности объектов, обнаруживаемых радиолокационным зондированием [6]. Из теории следует, что потенциальная разрешающая способность радиолокатора по дальности $\delta D_{\text{ном}}$, что в нашем случае соответствует толщине слоя h , не может быть лучше:

$$\delta D_{\text{ном}} \geq c \cdot \tau_u / 2, \quad (7)$$

где:

c - скорость распространения электромагнитной волны в воздухе. При оптимальной обработке сигналов ширина спектра $\Delta f = 1/\tau_u$, а скорость распространения электромагнитных волн в слоях дорожных одежд равна:

$$c_{\text{сл}} = c / \sqrt{\xi}$$

Следовательно, на основании выражения (7) для наихудшего варианта слоя с минимальной диэлектрической проницаемостью ξ_{min} получаем:

$$\Delta f \geq \frac{c}{2h\sqrt{\xi_{\text{min}}}}. \quad (8)$$

Поэтому ширина полосы частот излучаемой и приемной рупорных антенн конструктивно выполнена в соответствии с уравнением (8).

Важной особенностью устройства, реализующего предложенный способ измерений, является применение двухканальной системы измерений - одна излучающая рупорная антенна 1 и две приемные 10 и 17, разнесенные на разные фиксированные расстояния от излучающей. Это позволяет измерять и вычислять диэлектрическую проницаемость ξ контролируемых слоев и, соответственно, получать повышенную точность измерений. Вычисление диэлектрической проницаемости каждого слоя проводится с помощью блока 3 управления и обработки сигналов в соответствии со схемой распространения радиосигнала в многослойной среде (фиг. 4).

Измерительным прибором (ИП), фактически представляющим собой заявляемое устройство в соответствии с фиг. 1, измеряют время распространения радиопульса, равное:

$$T_I = \Delta\tau_{\Sigma} + t_1, \quad (9)$$

где:

$\Delta\tau_{\Sigma}$ - суммарное время задержки сигнала в электронной схеме прибора, соединительных кабелях, приемоизлучающих антеннах; в зазоре между каждой из антенн и покрытием автомобильной дороги;

t_1 - время распространения сигнала в первом асфальтобетонном слое.

Толщину первого слоя h_1 определяют по траектории: антенна 1 - граница слоев - антенна 10.

$$h_1 = \tau_p \cdot c_1$$

При $a=0$ имеем

$$\tau_P = \frac{t_1}{2}$$

При $a = \text{const}$:

$$l = \sqrt{\frac{a^2}{4} + h_1^2}. \quad (10)$$

Полная измерительная база по первому слою равна:

$$l_{1\Sigma} = 2l_1 = 2\sqrt{\frac{a^2}{4} + h_1^2}$$

тогда скорость c_1 электромагнитной волны в первом слое равна:

$$c_1 = \frac{l_{1\Sigma}}{t_1} = \frac{2\sqrt{\frac{a^2}{4} + h_1^2}}{t_1}. \quad (11)$$

В соответствии с предложенным техническим решением к электронной схеме прибора ИП периодически подключается приемник 2 или приемник 3 (см. фиг. 4). Применительно к фиг. 1 блок 12 выборки-хранения периодически подключает к схеме измерения приемник 10 или приемник 17 через малошумящие усилители 11 или 18. В этом случае фактически организуют два канала измерений с базовым расстоянием a и базовым расстоянием b .

Обозначим через t'_1 - время распространения радиолокационного сигнала по базе $l_{1\Sigma}$, а через t''_1 - время распространения по базе $l_{2\Sigma}$, тогда в соответствии с выражениями (10) и (11) относительно скорости распространения электромагнитной волны с учетом компенсации задержки Δt_Σ в соответствии с уравнением (9) можно записать систему двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} c_1^2 &= \frac{a^2 + 4h_1^2}{(t'_1)^2}; \\ c_1^2 &= \frac{b^2 + 4h_1^2}{(t''_1)^2}; \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Систему уравнений (12) возможно однозначно разрешить относительно толщины слоя h_1 :

$$\begin{aligned} \frac{a^2 + 4h_1^2}{(t'_1)^2} &= \frac{b^2 + 4h_1^2}{(t''_1)^2}; \\ (t''_1)^2 (a^2 + 4h_1^2) &= (t'_1)^2 (b^2 + 4h_1^2); \\ a^2 (t''_1)^2 + 4h_1^2 (t''_1)^2 &= b^2 (t'_1)^2 + 4h_1^2 (t'_1)^2; \\ 4h_1^2 [(t''_1)^2 - (t'_1)^2] &= b^2 (t'_1)^2 - a^2 (t''_1)^2; \\ h_1 &= \sqrt{\frac{b^2 (t'_1)^2 - a^2 (t''_1)^2}{4[(t''_1)^2 - (t'_1)^2]}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Уравнение (13) однозначно определяет толщину h_1 слоя и не зависит от скорости c распространения электромагнитной волны, и, следовательно, не зависит ни от диэлектрической проницаемости среды ϵ и ни от тангенса угла диэлектрических потерь, т.е. затухания электромагнитной волны в среде.

Аналогично можно получить систему уравнений для произвольного n -го слоя дорожных покрытий:

$$h_n = \sqrt{\frac{b^2 (t'_n)^2 - a^2 (t''_n)^2}{4[(t''_n)^2 - (t'_n)^2]}}, \quad (14)$$

где

t'_n, t''_n - времена распространения электромагнитных волн в соответствующих слоях.

На фиг. 5а) показано, что принятые отраженные от слоев дорожных одежд электромагнитные сигналы имеют не только различающуюся амплитуду, но и различную начальную фазу, что видно, например, из сравнения начальных фаз для промежутков времени t_{34} и t_{45} . Это обусловлено различными физико-химическими свойствами соседних слоев дорожных одежд, вызывающими различные взаимные ди-

электрические свойства дорожных одежд. Организация функционирования устройства с применением быстродействующей индивидуальной установки вектора поляризации для каждой границы между слоями позволяет выделить отраженные радиолокационные сигналы с достаточно хорошим отношением сигнал/помеха (см. фиг. 5б).

На основании логического сравнения поступающих кодов с формирователя 19 амплитуд и с блока 14 памяти схема 20 сравнения кодов вырабатывает кодовый сигнал рассогласования для каждого текущего значения времени $t_{01}, t_{12}, t_{23}, t_{34}, t_{45}$ распространения электромагнитного сигнала, связанного с каждой отражающей границей между слоями дорожных одежд. Блок 21 оптимизации сигнала игнорирует слабые сигналы, которые не связаны со слоями дорожных одежд (промежуток времени t_{12}) и обеспечивает некоторое плавное усредненное изменение всех кодов от поступления последовательности отраженных импульсов как результата излучения каждого зондирующего радиолокационного импульса. С точки зрения протекающих процессов блок 21 оптимизации также обеспечивает некоторую заданную инерционность регулирования по каждому принятому отраженному сигналу, что необходимо во избежание колебательного процесса по цепи обратной связи. По кодовым сигналам блока 21 оптимизации формирователь 22 вырабатывает аналоговые сигналы для управления формирователя 7 (см. фиг. 5в), формирователя вектора 23 поляризации и импульсы переключения коммутатора 24 (см. фиг. 5г). Реализация последовательности функционирования посредством блока 21 оптимизации, посредством формирователя 22 аналоговых сигналов в связке с формирователем 7, а также формирователя 23 вектора поляризации с работой коммутатора 24 позволяют обеспечить быстродействующую адресную установку индивидуального вектора поляризации. Эта установка осуществляется в моменты времени $t'_{01}, t'_{23}, t'_{34}, t'_{45}$. Указанные моменты времени предшествуют моментам времени $t_{01}, t_{23}, t_{34}, t_{45}$ на время τ , что необходимо для устранения влияния переходных процессов для каждой границы слоев дорожного покрытия. Наряду с быстродействующей установкой вектора поляризации функционирование указанных блоков 21-24 и блока 7 позволяет также обеспечить быстродействующую установку уровня излучения электромагнитных импульсов для каждой границы слоев перед достижением этой границы фронта акустической волны. Это позволяет получить хороший окончательный результат по отраженным радиолокационным сигналам (см. фиг. 5д), что, в свою очередь, способствует получению высокой чувствительности и точности детектирования времен приема акустических волн в соответствии с вышеприведенными уравнениями (3). Итоговый результат функционирования указанных блоков способствует определению скорости распространения акустической волны в каждом слое дорожного покрытия в соответствии с уравнениями (4) и позволяет получить высокую точность измерения прочности каждого слоя дорожного покрытия в соответствии с уравнением (1).

Комбинация применения быстродействующей индивидуальной установки вектора поляризации для каждой границы между слоями с индивидуальной быстродействующей установкой уровня излучения электромагнитных импульсов для каждой границы позволяет получить значительное увеличение точности измерений.

Следовательно, осуществление георадарноакустического способа измерения прочности слоев покрытия автомобильной дороги, при котором измеряют скорости распространения акустических колебаний в каждом слое покрытия, для чего зондируют слои покрытий автомобильной дороги импульсными радиолокационными сигналами и измеряют времена $T_{P1}, T_{P2}, \dots, T_{Pn}$ распространения акустических волн от момента их формирования излучателем до момента фазоамплитудных флуктуации радиолокационных сигналов, отраженных от каждой границы между слоями, вибрирующей в соответствии со сдвигом фаз, вызванным распространением акустических волн от излучателя через слои контролируемого покрытия, затем для каждой конкретной контролируемой границы между слоями, отражающей радиолокационный сигнал, определяют, регулируют, устанавливают и запоминают направление вектора поляризации зондирующего импульсного радиолокационного сигнала, соответствующее максимальному значению отраженного радиолокационного сигнала от конкретной контролируемой границы между слоями, затем во время распространения акустических колебаний перед достижением акустической волной соответствующей конкретной контролируемой границы между слоями дорожного покрытия воспроизводят и генерируют для этой границы зафиксированное значение вектора поляризации зондирующего радиолокационного сигнала, соответствующего максимальному значению отраженного радиолокационного сигнала от конкретной контролируемой границы и для установленных значений направления вектора поляризации для каждой границы между слоями путем выделения и регистрации амплитудно-фазовых флуктуации радиолокационных сигналов, отраженных от каждой границы между слоями, измеряют точные времена распространения акустических волн в каждом слое дорожного покрытия и на основании полученных результатов для времен распространения акустических волн определяют скорости распространения акустических волн в первом, втором, третьем,... и n-ом слоях покрытия:

$$v_1 = \frac{l_1}{T_{P1}}; v_2 = \frac{l_2}{T_{P2} - T_{P1}}; \dots; v_n = \frac{l_n}{T_{Pn} - T_{Pn-1}}$$

где:

$l_1, l_2, \dots, l_n$ - толщины каждого конкретного слоя, вычисленные по следующим формулам:

$$l_1 = \frac{c_0 t_1}{2\sqrt{\xi_1}}; l_2 = \frac{c_0(t_2 - t_1)}{2\sqrt{\xi_2}}; \dots; l_n = \frac{c_0(t_n - t_{n-1})}{2\sqrt{\xi_n}}$$

где

c_0 - скорость распространения в вакууме электромагнитной волны; $t_1, t_2, \dots, t_n$ - отметки времени, затраченного радиолокационным сигналом на его пути от момента времени излучения радиолокационного импульса до момента приема его отражения от каждой границы между слоями дорожного покрытия при установлении индивидуального для этой конкретной границы вектора поляризации, соответствующего максимальному значению отраженного радиолокационного сигнала от этой же контролируемой границы между слоями;

$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ - величины диэлектрической проницаемости слоев; причем по скоростям $v_1, v_2, \dots, v_n$ устанавливают слои по их типам, по которым корректируют величины их диэлектрических проницаемостей, и определяют для слоев индивидуальные величины плотности $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$, затем по полученным значениям скоростей распространения акустических волн, скорректированных по диэлектрической проницаемости каждого слоя, оценивают значения модулей $E_1, E_2, \dots, E_n$ упругости, по которым определяют прочность каждого конкретного слоя дорожного покрытия, осуществление дополнительного способа измерения прочности покрытия автомобильной дороги, заключающегося в том, что дополнительно выравнивают амплитуды радиолокационных сигналов, отраженных от границ слоев, путем быстрогодействия установки уровня излучения электромагнитных импульсов индивидуально для каждой конкретной контролируемой границы между слоями перед достижением этой границы фронта акустической волны, а также осуществление способа в виде конкретного устройства позволило получить положительный результат и подтвердить работоспособность способа и устройства для его осуществления.

Результаты анализа и оценок погрешностей показывают, что предложенный георадарноакустический способ измерений прочности покрытий автомобильных дорог, устройство для его осуществления и алгоритмы измерений, реализующие предложенный способ и устройство, позволяют получить результаты, удовлетворяющие требованиям современного технического решения.

Источники информации

1 Ботаки А.А. и др., Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов / М.: Машиностроение, 1983, 210 с.

2 Патент USA № 5 835 053, МПК: G01S 13/04; G01V 3/12, опубликован 10.11.1998

3 Charnabai, Ivan. Georadar vibration-acoustic technology for express-control of road pavement strength and results of its application /Zhongyu Li, Yury Aliakseyeu, Qing Zhang, Algimantas Bubulis, Vladimir Minchenya, Jicun Shi, Anatoly Romanov, Aliaksandr Khadasevich, Ivan Charnabai // journal of measurements in engineering. - 2019, march. – volume 7, ISSUE 1, p. 20 - 33

4. Чернобай, И.А. Метод и аппаратура компенсации динамических погрешностей георадарноакустических измерений прочности дорожных покрытий / И.А. Чернобай, А.И. Ходасевич, А.Ф. Романов // Неразрушающий контроль и диагностика: научн.-практич. журнал. – Минск, 2017. – № 4. – С.16-33.

5. Никольский, В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / Москва: «Наука». – 1978, – 540 с.

6. Финкельштейн, М.И. Основы радиолокации / Москва: Советское радио. – 1983, – 495 с.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Георадарноакустический способ измерения прочности слоев покрытия автомобильной дороги, при котором измеряют скорости распространения акустических колебаний в каждом слое покрытия, для чего зондируют слои покрытий автомобильной дороги импульсными радиолокационными сигналами и измеряют времена $T_{P1}, T_{P2}, \dots, T_{Pn}$ распространения акустических волн от момента их формирования излучателем до момента фазоамплитудных флуктуаций радиолокационных сигналов, отраженных от каждой

границы между слоями, вибрирующей в соответствии со сдвигом фаз, вызванным распространением акустических волн от излучателя через слои контролируемого покрытия, отличающийся тем, что для каждой конкретной контролируемой границы между слоями, отражающей радиолокационный сигнал, определяют, регулируют, устанавливают и запоминают направление вектора поляризации зондирующего импульсного радиолокационного сигнала, соответствующее максимальному значению отраженного радиолокационного сигнала от конкретной контролируемой границы между слоями, затем во время распространения акустических колебаний перед достижением акустической волной соответствующей конкретной контролируемой границы между слоями дорожного покрытия воспроизводят и генерируют для этой границы зафиксированное значение вектора поляризации зондирующего радиолокационного сигнала, соответствующее максимальному значению отраженного радиолокационного сигнала от конкретной контролируемой границы и для установленных значений направления вектора поляризации для каждой границы между слоями путем выделения и регистрации амплитудно-фазовых флуктуаций радиолокационных сигналов, отраженных от каждой границы между слоями, измеряют точные времена распространения акустических волн в каждом слое дорожного покрытия и на основании полученных результатов для времен распространения акустических волн определяют скорости распространения акустических волн в первом, втором, третьем, ... и n-ом слоях покрытия:

$$v_1 = \frac{l_1}{T_{P1}}; v_2 = \frac{l_2}{T_{P2} - T_{P1}}; \dots; v_n = \frac{l_n}{T_{Pn} - T_{Pn-1}}$$

где

$l_1, l_2, \dots, l_n$ - толщины каждого конкретного слоя, вычисленные по следующим формулам:

$$l_1 = \frac{c_0 t_1}{2\sqrt{\xi_1}}; l_2 = \frac{c_0(t_2 - t_1)}{2\sqrt{\xi_2}}; \dots; l_n = \frac{c_0(t_n - t_{n-1})}{2\sqrt{\xi_n}}$$

где

c_0 - скорость распространения в вакууме электромагнитной волны;

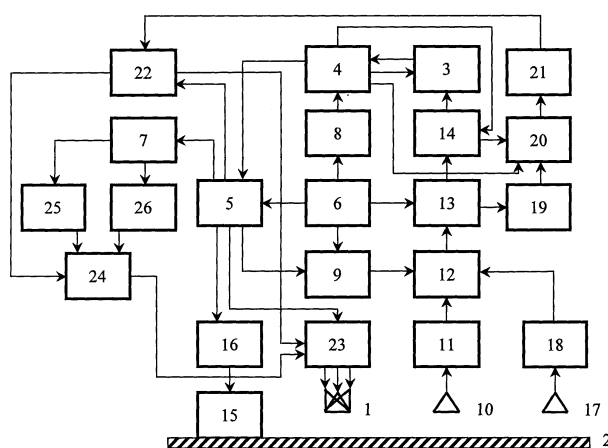
$t_1, t_2, \dots, t_n$ - отметки времени, затраченного радиолокационным сигналом на его пути от момента времени излучения радиолокационного импульса до момента приема его отражения от каждой границы между слоями дорожного покрытия при установлении индивидуального для этой конкретной границы вектора поляризации, соответствующего максимальному значению отраженного радиолокационного сигнала от этой же контролируемой границы между слоями;

$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ - величины диэлектрических проницаемостей; причем по скоростям $v_1, v_2, \dots, v_n$ устанавливают слои по их типам, по которым корректируют величины их диэлектрических проницаемостей, и определяют для слоев индивидуальные величины плотности $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$, затем по полученным значениям плотности и уточненным значениям скоростей распространения акустических волн, скорректированных по диэлектрической проницаемости каждого слоя, оценивают значения модулей $E_1, E_2, \dots, E_n$ упругости, по которым определяют прочность каждого конкретного слоя дорожного покрытия.

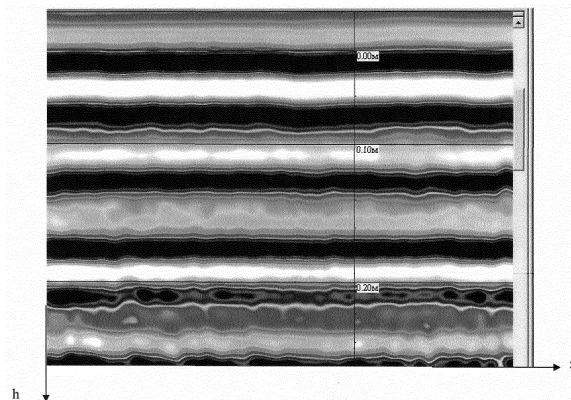
2. Георадарноакустический способ измерения прочности слоев покрытия автомобильной дороги по п.1, отличающийся тем, что дополнительно выравнивают амплитуды радиолокационных сигналов, отраженных от границ слоев, путем быстродействующей установки уровня излучения электромагнитных импульсов индивидуально для каждой конкретной контролируемой границы между слоями перед достижением этой границы фронта акустической волны.

3. Устройство для осуществления способа по п.1, содержащее рупорную излучающую антенну, выходом связанную с покрытием автомобильной дороги, содержащее блок управления и обработки сигналов, выходом подключенный через последовательно связанные блок формирования временной диаграммы сигналов, вторым выходом подсоединенный к входу блока управления и обработки сигналов, блок синхронизации, второй вход которого связан с выходом тактового генератора, к формирователю радиолокационных зондирующих импульсов, причем второй выход тактового генератора связан со вторым входом блока формирования временной диаграммы сигналов через делитель частоты, а третий выход тактового генератора связан с управляемой линией задержки, второй вход которой подключен ко второму выходу блока синхронизации, а также содержащее приемную рупорную антенну, входом связанную с покрытием автомобильной дороги, а выходом - с входом блока управления и обработки через последовательно включенные малошумящий усилитель, устройство выборки-хранения, ко второму входу которого подсоединен выход управляемой линии задержки, аналого-цифровой преобразователь, ко второму входу которого подсоединен третий выход тактового генератора, и блок памяти, второй вход которого подсоединен к третьему выходу блока формирования временной диаграммы сигналов, отличающееся тем, что устройство содержит возбудитель акустических колебаний, вход которого связан с третьим выходом блока синхронизации через формирователь акустических сигналов возбуждения, а выход - с покрытием автомобильной дороги, и вторую рупорную приемную антенну, вход которой связан с покрытием автомобильной дороги, а выход - с третьим входом устройства выборки-хранения через второй малошумящий усилитель, в качестве рупорной излучающей антенны применена рупорная излучающая антенна с

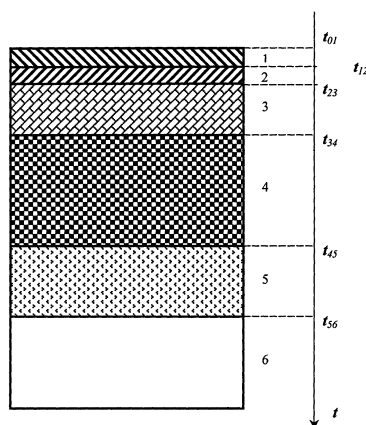
перестраиваемой поляризацией зондирующего радиолокационного сигнала, в качестве формирователя радиолокационных зондирующих импульсов применен формирователь радиолокационных зондирующих импульсов с регулируемой амплитудой, а также применены последовательно включенные кодовый формирователь максимума амплитуды сигнала заданной полярности, входом подсоединенной ко второму выходу аналого-цифрового преобразователя, схема сравнения кодов, вторым и третьим входом, соответственно, подключенная ко второму выходу блока памяти и к четвертому выходу блока формирования временной диаграммы сигналов, блок оптимизации максимального сигнала, формирователь сигналов управления и формирователь вектора поляризации, выходами связанный с входами рупорной излучающей антенны с управляемой поляризацией, причем второй вход формирователя вектора поляризации подсоединен ко второму выходу формирователя сигнала управления через коммутатор, вторым и третьим входами, соответственно, подключенный через повторитель и инвертор к выходам формирователя радиолокационных зондирующих импульсов с регулируемой амплитудой, вход управления которого связан с третьим выходом формирователя сигнала управления.



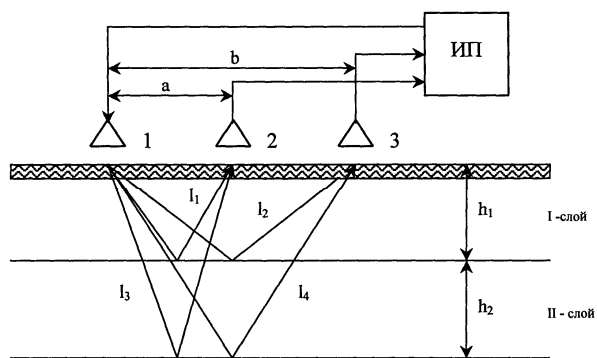
Фиг. 1



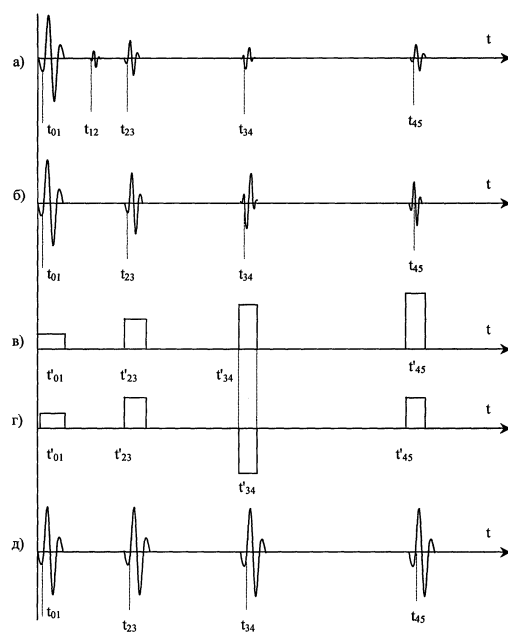
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2