

Ситуационно-логический алгоритм работы измерителя толщины пресноводного льда с непрерывным частотно-модулированным сигналом

Б. А. АТАЯНЦ, И. В. БАРАНОВ, В. А. БОЛОНИН, В. М. ДАВЫДОЧКИН,
В. В. ЕЗЕРСКИЙ

ООО «КОНТАКТ-1», Рязань, Россия, e-mail: market@kontakt-1.ru

Рассмотрено повышение точности измерений толщины пресноводного льда. Проведён анализ отражённых сигналов в различных опасных ситуациях. Предложен алгоритм идентификации возможных вариантов опасной ситуации. Показаны ограничения на использование этого алгоритма.

Ключевые слова: пресноводный лёд, измерение толщины, идентификация опасной ситуации.

Increase of reliability of measurement of a thickness of freshwater ice. The analysis of the reflected signals arising in various possible dangerous situations is carried out. The algorithm revealing out the possible spectrum of a dangerous situation is offered. Restrictions on use of this algorithm are considered and the simplified algorithm is proposed.

Key word: freshwater ice, measurement thickness, dangerous situation identification.

Оперативное бесконтактное измерение толщины льда представляет интерес в различных областях деятельности, таких как прокладка и эксплуатация зимних автомобильных трасс и переправ, организация ледовых аэродромов, контроль толщины льда вблизи плотин, гидростанций или мостов, в системах намораживания и других ледовых сооружениях, а также при контроле ледяных заторов и зажоров, составлении ледомерных профилей при гидрологических работах, проведении спасательных работ на льду, в рыболовстве с поверхности льда, при проведении различных естественнонаучных исследований.

Исследования возможности измерений толщины льда бесконтактным способом и разработка соответствующих приборов для аэроледомерных съёмок проводятся давно [1, 2]. В основе работы таких приборов лежит радиолокационный принцип определения расстояний. Указанные измерения можно проводить импульсным методом или с помощью непрерывного частотно-модулированного сигнала. Теоретически, оба метода обеспечивают одинаковую точность измерений при равной полосе частот используемых сигналов.

В последние годы наблюдается практический интерес к измерениям толщины льда приборами, расположенными непосредственно вблизи ледовой поверхности — находящимися в руках человека или же закреплёнными на транспортном средстве либо гидрологическом сооружении. В настоящее время известны устройства, использующие как импульсный сигнал, так и частотно-модулированный сигнал [3, 4]. В данной работе рассмотрены приборы для измерений толщины пресноводного льда с частотно-модулированным сигналом.

Частотно-модулированный измеритель толщины льда (далее — частотно-модулированный ледомер) по принципу работы является частотно-модулированным дальномером ближнего действия. Принцип его работы рассмотрен в [5].

Теоретические исследования основных вопросов, возникающих при определении толщины льда, проведены в [4, 6, 7]. Предложенные технические решения отражены в [8].

В зимние периоды 2014—2015 гг. и 2015—2016 гг. в средней полосе России был исследован макет частотно-модулированного ледомера. Испытания показали, что свойства реальных сигналов такого измерителя гораздо разнообразнее, чем предполагалось в [4, 6—9]. Эти отличия особенно важны при автоматическом принятии решения о степени опасности складывающейся ситуации. Поэтому целью данной работы является анализ свойств частотно-модулированных сигналов с учётом экспериментальных результатов и разработка ситуационно-логического алгоритма. С помощью такого алгоритма можно будет измерять толщину льда и определять степень опасности для человека, зависящую от состояния верхней поверхности льда, степени его однородности и типа подстилающей поверхности под слоем льда.

Анализ возможных ситуаций. Для измерений толщины льда и распознавания опасных ситуаций необходимо проанализировать спектр сигнала разностной частоты (СРЧ) на выходе смесителя частотно-модулированного ледомера, вычисляемый цифровым способом [4, 6, 7]. Упрощённая модель спектра СРЧ для одной из типичных ситуаций представлена на рис. 1. Здесь $f_{\text{нач}}$, $f_{\text{кон}}$ — соответственно начальное и конечное значения диапазона частот для поиска максимумов спектра. Частота $f_{\text{нач}}$ ограничивает снизу высоту подвеса антенны частотно-модулированного ледомера. Частота $f_{\text{кон}}$ соответствует максимальной толщине льда, которая и представляет практический интерес. Координаты (f_i, A_i) обозначают соответственно частоту и амплитуду i -го максимума спектра: (f_0, A_0) — «нулевое» отражение от антенны, вызванное неидеальностью согласования антенно-волнового тракта ледомера в широкой полосе используемых частот; (f_r, A_r) — «главный» максимум спектра, порождённый в данном случае отражением от нижней поверхности льда,

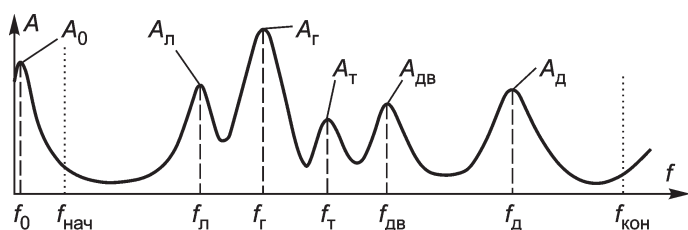


Рис. 1. Упрощённая модель спектра сигнала разностной частоты для частотно-модулированного ледомера

которая граничит с водой; ($f_л$, $A_л$) — «левый» максимум по отношению к «главному», порождённому отражением от верхней поверхности льда; ($f_г$, $A_г$) — максимум, соответствующий «двойному» переотражению в толще льда; ($f_дв$, $A_дв$) — максимум, вызванный «двойным» переотражением от антенны и верхней поверхности льда; ($f_д$, $A_д$) — максимум, соответствующий «двойному» переотражению между антенной и границей лёд—вода. На рис. 1 показаны только основные максимумы спектра СРЧ, возникающие при различных переотражениях сигнала от поверхностей льда и антенны частотно-модулированного ледомера. Причём в числе описанных сигналов есть такие, которые отсутствуют в анализе, проведённом в работах [1, 2]. Они вызваны переотражениями от антенны измерителя и поверхностей льда. Реально существует множество других локальных максимумов, но они слабее влияют на процесс принятия решения о степени опасности.

Для правильной работы частотно-модулированного ледомера и надёжной идентификации опасных ситуаций необходимо проанализировать формы спектров СРЧ и соотношения амплитуд максимумов спектра в ситуациях, представляющих наибольший практический интерес. Рассмотрим несколько таких ситуаций.

Однородный лёд на воде. Это самый простой и благоприятный случай, для которого спектр СРЧ представлен на рис. 1. Интерес представляют два максимума, соответствующие отражению от верхней и нижней поверхностей льда и позволяющие рассчитать толщину льда и расстояние от антенны до его поверхности. В действительности в спектре СРЧ существуют ещё несколько более мелких локальных максимумов, вызванных переотражениями сигнала. При этом информационным параметром, позволяющим трактовать каждый максимум спектра, является соотношение их амплитуд. Рассмотренная ситуация является опасной, когда измеренная толщина льда меньше известных норм для однородного пресного льда [9].

Вода или мокрый снег на поверхности льда. При этом зондирующий сигнал не проникает в толщу льда. В спектре СРЧ имеется главный максимум, соответствующий отражению от воды, и множество более мелких максимумов, порождённых многократными переотражениями сигнала между антенной и поверхностью воды, с частотами, кратными частоте главного максимума, и уменьшающимися амплитудами. Определение толщины льда в подобной ситуации невозможно, и по этой причине она тоже может считаться опасной.

Воздух под поверхностью льда. Это наиболее сложная и опасная ситуация, которая возникает на некоторых участках водоёма в результате зависания льда при снижении уровня воды. Зависший лёд обладает очень малой прочностью и

может легко рухнуть при появлении на нём человека или транспортного средства. В таких ситуациях в спектре СРЧ имеется множество локальных максимумов (до 15 штук) с различными амплитудами и частотами. Данные максимумы вызваны первыми отражениями от соответствующих поверхностей и различными сочетаниями переотражений от антенны и этих поверхностей.

Неоднородный лёд на воде с различными внутренними дефектами, вызывающими отражение сигнала. К такой ситуации можно отнести, например, неоднородность шугового льда на реке или неоднородность, возникающую при замерзании подтаявшего слоя снега на поверхности льда, который образовался после кратковременных оттепелей, а также появление в толще льда линз с воздухом, вмёрзших стволов деревьев, кустов или травы. По форме спектра эти ситуации очень похожи на предыдущую. Они тоже представляют опасность, так как неоднородный лёд имеет меньшую прочность, чем однородный.

Для первых трёх ситуаций были проведены количественные расчёты амплитуд основных сигналов при различных толщинах льда. Затем вычислен спектр СРЧ. В расчётах учитывали фокусирующее свойство слоя льда и затухание в нём сигнала, а также формулы, приведённые в [1] для коэффициентов отражения и прохождения сигналов через границы раздела сред воздух—лёд и лёд—вода. При этом отражающие поверхности считали идеально гладкими и расположенными строго перпендикулярно относительно направления падения зондирующей электромагнитной волны. При вычислениях учитывали трёхсантиметровый диапазон несущего сигнала, диапазон перестройки частоты $\Delta f = 2,54$ ГГц и электрофизические параметры льда в сантиметровом диапазоне: диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 3,2$; удельное затухание $\Gamma = 1,5 \dots 2$ дБ/м [1, 2]. Толщину льда изменяли в пределах 0,06—3 м, представляющих практический интерес для перемещений по льду человека или транспортного средства.

Для наиболее благоприятной ситуации однородного льда на воде можно выделить две характерные области. Первая соответствует тонкому льду, когда амплитуда отражения от раздела «нижняя поверхность льда—вода» превышает отражение от верхней поверхности. В зависимости от коэффициента затухания верхняя граница этой области находится в пределах 1,5—1,9 м. Главный максимум спектра СРЧ теоретически должен быть расположен правее отражения от верхней поверхности льда.

Вторая область соответствует толстому льду, когда амплитуда отражения от его верхней поверхности становится больше амплитуды отражения от нижней поверхности вследствие затухания сигнала в толще льда. В такой ситуации главный максимум является первым в анализируемой области спектра СРЧ.

В обеих областях амплитуды сигналов, препятствующих правильной идентификации ситуации, не превышают –14 дБ относительно главного максимума, поэтому это значение можно использовать в качестве граничного для нахождения в спектре СРЧ второго полезного максимума.

Для опасной ситуации, когда между слоем льда и поверхностью воды находится воздух, тоже имеются две аналогичные характерные области. Однако граница между ними гораздо меньше предыдущей и составляет примерно 0,7—1,1 м. Отражения, затрудняющие определение толщины льда и идентификацию сложившейся ситуации, не превышают –13 дБ относительно главного максимума.

При разработке алгоритма обработки спектра СРЧ необходимо учитывать не только полученные результаты, но и то, что отражающие поверхности (особенно верхняя) чаще всего не идеальны, т. е. они могут быть не гладкими и не перпендикулярными направлению падения электромагнитной волны, что влияет на соотношение амплитуд отражённых сигналов. Взаимодействие боковых лепестков спектра каждого сигнала и интерференция этих спектров при совпадении времён задержки сказываются на положении и форме максимумов спектра. Совпадение времён задержки наблюдается, например, при толщинах льда L вблизи значений $L_1 = 0,5H/\sqrt{\epsilon}$, где H — высота подвеса ледомера относительно верхней поверхности льда, $L_2 = 2L_1$. При этих значениях переотражения от антенны и верхней поверхности льда совпадают по времени соответственно с переотражением внутри слоя льда и отражением от его нижней поверхности (см. рис. 1). Результирующий максимум спектра, обозначенный как $(f_{\text{дв}}, A_{\text{дв}})$, вблизи этих значений сильно флюктуирует по величине и положению. Причём наиболее существенны изменения амплитуды, приводящие к ошибочным идентификациям ситуации.

Учёт перечисленных факторов и анализ более 2000 практически полученных спектров СРЧ позволил уточнить пороговые уровни локальных максимумов по отношению к уровню главного максимума.

Алгоритм поиска максимумов спектра СРЧ.

Поиск проводят, исходя из необходимости обнаружения одного глобального максимума и 6 локальных, не считая максимума, соответствующего «нулевому» отражению. Такое количество максимумов позволяет охватить все перечисленные ситуации. Разработанный алгоритм состоит из следующих шагов.

1. Поиск максимума спектра СРЧ, соответствующего «нулевому» отражению в диапазоне частот от нуля до заданной нижней границы обработки f_n . Если максимум найден, то частота и амплитуда запоминаются в элементах массива под номером 0 (f_0, A_0). Если «нулевое» отражение не найдено, то считается, что прибор неработоспособен и выдётся сообщение об ошибке.

2. Поиск глобального максимума в диапазоне частот от f_0 до верхней границы спектра f_k . Если глобальный максимум найден, то его частота и амплитуда запоминаются в элементах массива под номером 4 (f_4, A_4). Если глобальный максимум не найден, или его амплитуда не превышает порогового значения -6 дБ относительно «нулевого» отражения A_0 , то считается, что ситуация неясна (возможно, антенна направлена в небо, или частотно-модулированный ледомер находится на берегу). В этом случае вырабатывается соответствующее сообщение об ошибке.

3. Нахождение двух локальных максимумов, расположенных слева и справа от глобального и превышающих уровень -25 дБ относительно него. Если каждый из локальных максимумов найден, то их частоты и амплитуды сохраняются в элементах массива под номерами 2 (f_2, A_2) и 6 (f_6, A_6),

соответственно. В противном случае в элементы массива за-
носятся нулевые значения.

4. Если левый локальный максимум на частоте f_2 найден, то происходит поиск двух локальных максимумов: слева и справа от него в диапазонах частот от f_n до левого максимума f_2 , а также от левого максимума f_2 до глобального максимума f_4 с амплитудами, превышающими уровень -3 дБ относительно левого локального максимума A_2 . Если эти локальные максимумы найдены, то их частоты и амплитуды сохраняются в элементах массива под номерами 1 (f_1, A_1) и 3 (f_3, A_3), соответственно. Если не найден локальный максимум f_2 или максимумы слева и справа от него, то в соответствующие элементы массива записываются нулевые значения.

5. Если правый локальный максимум f_6 найден, то запускается поиск локальных максимумов слева от него (начиная от глобального f_4 до f_6) и справа от него до самого конца спектра f_k с амплитудами, превышающими уровень -6 дБ относительно правого максимума A_6 . Если эти максимумы найдены, то их частоты и амплитуды сохраняются в элементах массива под номерами 5 (f_5, A_5) и 7 (f_7, A_7), соответственно. Если не найден локальный максимум f_6 или локальные

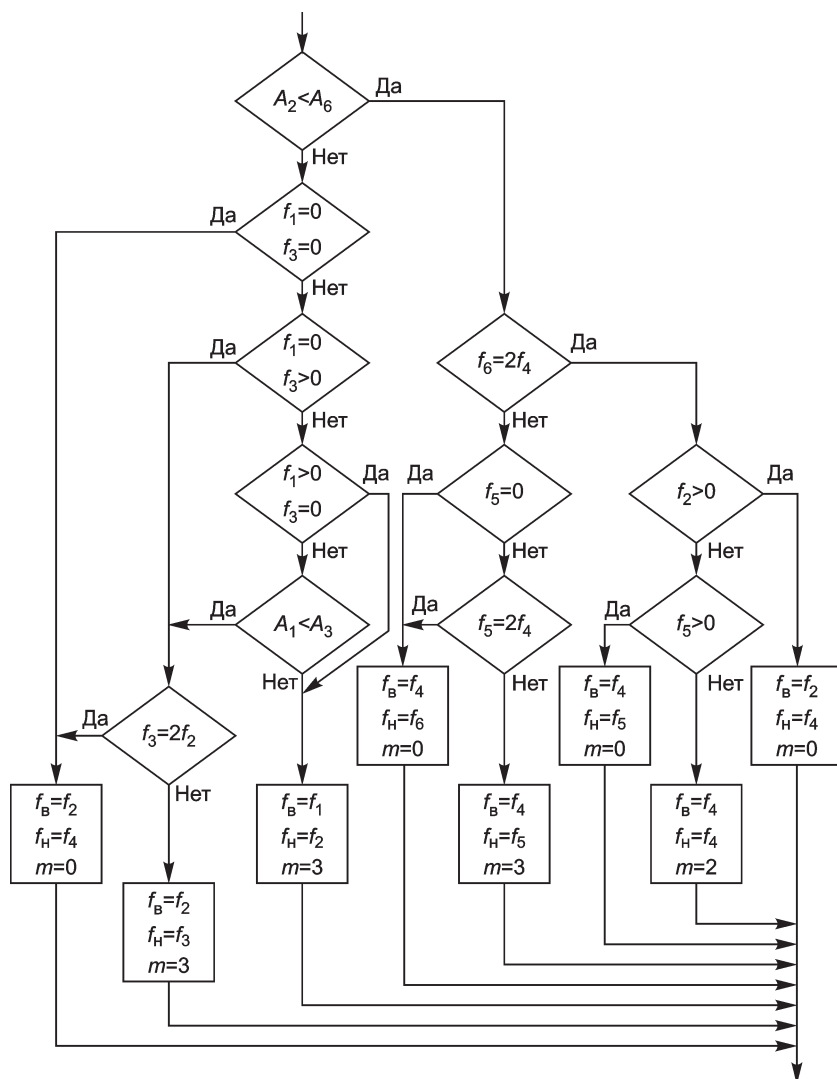


Рис. 2. Структурная схема алгоритма идентификации

максимумы слева и справа от него, то в указанные элементы массива записываются нулевые значения.

В результате выполнения шагов алгоритма, перечисленных выше, в массивах частот и амплитуд, содержащих по восемь элементов, оказываются сохранёнными параметры найденных максимумов спектра СРЧ. Эти массивы являются основой для анализа ситуации, определения толщины льда, расстояния от антенны до льда и идентификации степени опасности.

Алгоритм идентификации ситуации. Цель работы этого алгоритма — идентификация опасной ситуации и определение частот, соответствующих верхней и нижней поверхностям льда, т. е. f_b , f_n . Для сигнализации о степени опасности ситуации вводится признак опасности m , который может принимать следующие значения: $m = 0$ — лёд на воде; $m = 1$ — толщина льда меньше заранее заданной предельно допустимой величины; $m = 2$ — вода на поверхности льда; $m = 3$ — неоднородный лёд или воздух подо льдом; $m = 4$ — неопределённая ситуация, которая выявляется на втором этапе описанного выше алгоритма поиска максимумов спектра СРЧ.

Структурная схема разработанного алгоритма приведена на рис. 2. Его работа начинается с проверки локальных максимумов с номерами 2, 6 соответственно слева и справа от глобального и сравнения их величин. По соотношению этих максимумов происходит разветвление алгоритма на две линии, условно соответствующие тонкому льду, если $A_2 \geq A_6$ и толстому — при $A_2 < A_6$. Для тонкого льда проверяются максимумы с номерами 1, 3 слева и справа от локального максимума с номером 2. Отсутствие этих максимумов соот-

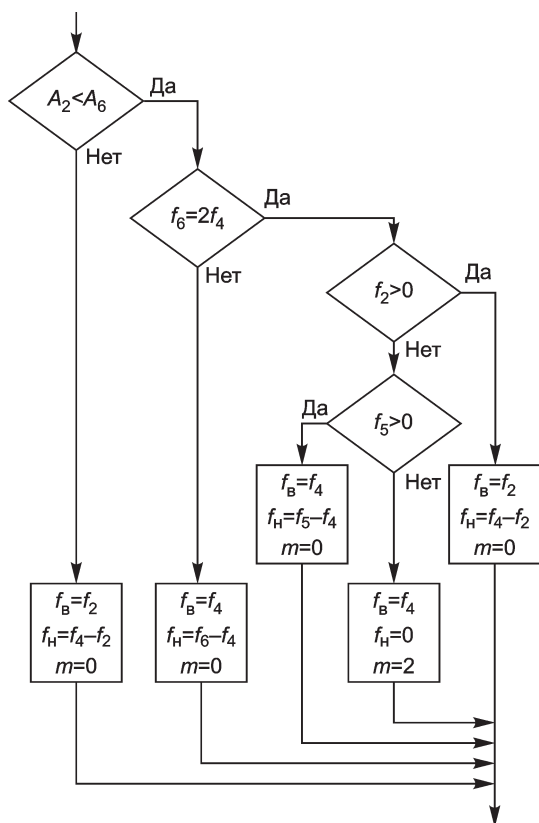


Рис. 3. Структурная схема упрощённого алгоритма идентификации

ветствует благоприятной ситуации «лёд на воде». Соответственно, $f_B = f_2$, $f_U = f_A$ и $m = 0$.

Если максимум с номером 1 отсутствует и существует максимум с номером 3, который превышает второй, то проверяется, не является ли он результатом переотражения между антенной и верхней поверхностью льда. Если это справедливо, то принимается предыдущее решение. В противном случае считается, что лёд неоднородный или под ним имеется воздух. Тогда $f_B = f_3$, $f_H = f_2$, признак опасности $m = 3$. При отсутствии максимума 3 или превышении первым максимумом третьего также принимается решение о неоднородной толще льда или наличии воздуха под ним и $f_B = f_1$, $f_H = f_2$, $m = 3$.

Для толстого льда, когда максимум с номером 6 превышает максимум с номером 4 или последний вообще отсутствует, проверяется, не является ли максимум с номером 6 двойным переотражением сигнала между антенной и верхней поверхностью льда. Если это предположение справедливо, то проверяется существование в этом случае максимума с номером 2. При его обнаружении принимается решение о благоприятной ситуации 1 и $f_B = f_2$, $f_H = f_4$, признак опасности $m = 0$. В противном случае проверяется максимум с номером 5. Его отсутствие трактуется как «вода на поверхности льда» и $f_B = f_4$, $f_H = f_4$, признак опасности $m = 2$. Наличие максимума с номером 5 в этом случае трактуется как «благоприятная ситуация толстого льда на воде» и $f_B = f_4$, $f_H = f_5$, $m = 0$.

Если максимум с номером 6 не является двойным переотражением четвёртого максимума, то при отсутствии пятого максимума принимается решение о благоприятной ситуации и $f_b = f_4$, $f_n = f_6$, $m = 0$. Если пятый максимум имеется, то проверяется, не является ли он вторым переотражением четвёртого. Если это так, то принимается предыдущее решение. В противном случае считается, что лёд неоднородный или под ним находится воздух и $f_p = f_4$, $f_u = f_6$, $m = 3$.

После выполнения алгоритма идентификации ситуации частоты f_b, f_n уточняют в соответствии с двухэтапной процедурой оценки частоты максимума спектра путём численного поиска максимума непрерывно-дискретного преобразования Фурье в пределах найденного локального лепестка спектра [5, 6]. Затем по уточнённым значениям частот вычисляют толщину льда

$$L = (f_H - f_B) c / [2\Delta_f \sqrt{\epsilon}], \quad (1)$$

где c — скорость распространения электромагнитной волны в свободном пространстве.

Если полученное значение не превышает заранее заданную безопасную толщину льда, то ситуация считается опасной и принимается $m = 1$.

В формуле (1) по умолчанию используется указанное выше значение диэлектрической проницаемости пресноводного льда, которое в сантиметровом диапазоне волн имеет вариации в пределах 1,5 % [1, 2] в широком диапазоне температур, что приводит к возможной погрешности измерений 0,75 %. Однако на конкретном водоёме и в определённых погодных условиях всегда можно провести калибровку прибора.

По значению $f_{\text{в}}$ можно рассчитать расстояние от частотно-модулированного ледомера до льда: $L = f_{\text{в}} c / (2\Delta f)$.

Для исключения влияния неоднородности льда разработанный алгоритм можно упростить. Структурная схема упрощённого алгоритма идентификации ситуации приведена на рис. 3. Все операции аналогичны предыдущей схеме (см. рис. 2) и не требуют дополнительных пояснений.

На рис. 4 приведены результаты обработки СРЧ, полученные с помощью разработанного алгоритма. Эти сигналы (пунктирная линия — см. рис. 4) были записаны при равномерном передвижении макета частотно-модулированного ледомера, расположенного на высоте 720 мм от поверхности льда. Диапазон перестройки частоты $\Delta f = 2,54$ ГГц. Запись была сделана на льду, имеющем неоднородности, которые возникли вследствие замерзания размокшего при оттепели слоя снега. На графике заметны резкие снижения толщины льда, обусловленные его неоднородностью. При этих «бросках» показаний признак опасности ситуации $m = 3$.

Заметим, что заниженные показания соответствуют измерениям толщины слоя льда от верхней поверхности до границы неоднородности в его толще и не усложняют ситуацию, т. е. не делают её более опасной. Фактически — это ложная тревога, которая заставляет оператора повысить внимание и исследовать лёд в данной точке с помощью бурения лунки или же изменить направление движения для поиска безопасного пути.

Результаты обработки упрощённым алгоритмом тех же записанных СРЧ показаны на рис. 4 сплошной линией. Из рис. 4 следует, что «броски» показаний толщины льда исчезли, при этом в остальных точках графики полностью совпадают. Таким образом, разработанный упрощённый алгоритм идентификации ситуации нечувствителен к неоднородностям толщины льда. При расчётах по формуле (1) не учитывалось изменение диэлектрической проницаемости неоднородного слоя льда. Поэтому рассчитанная толщина льда оказалась заниженной. Это компенсирует снижение прочности этого участка льда, вызванное неоднородностью. Однако такая нечувствительность может привести к повышенной опасности, так как упрощённый алгоритм может пропустить ситуацию, когда под слоем льда находится воздух, и при этом измеренная толщина льда будет завышенной.

Возможность применения каждого из описанных выше алгоритмов должен определять оператор, исходя из априорной информации о складывающейся метеорологической ситуации, выполняемой задачи контроля и опыта работы на льду.

Заключение. Предложенные алгоритмы обработки спектра СРЧ позволяют надёжно измерять толщину пресноводного однородного льда и с высокой вероятностью выявлять опасные ситуации, соответствующие тонкому льду, наличию воды на поверхности льда или воздуха под слоем льда, а также находить неоднородности слоя льда.

Первый алгоритм идентификации ситуации целесообразно использовать на практике в тех случаях, когда прокладывается новая трасса по ледяной поверхности, и с высокой вероятностью существуют неоднородности льда или воздух под его поверхностью, т. е. при выполнении первичных исследований состояния льда. Второй упрощённый алгоритм уместен, когда производится текущий контроль уже проложенных трасс, имеется твёрдая уверенность в отсутствии неоднородностей льда и необходимо периодически следить за изменениями его толщины. В спорных случаях возможно поочерёдное использование каждого из этих алгоритмов и как крайнее средство — пробное бурение льда для уточнения степени опасности ситуации.

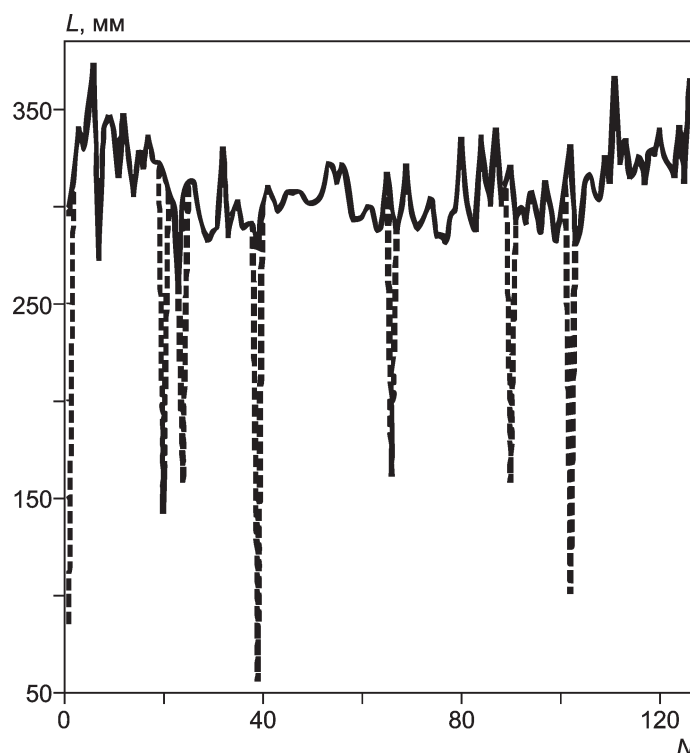


Рис. 4. Результаты измерений толщины льда:

сплошная линия — результаты обработки упрощённым алгоритмом записанных сигналов разностной частоты; пунктирная линия — результаты обработки сигналов разностной частоты, полученные с помощью разработанного алгоритма идентификации

Л и т е р а т у р а

1. Финкельштейн М. И., Лазарев Э. И., Чижев А. Н. Радиолокационные аэроледомерные съёмки рек, озёр, водохранилищ. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984.
2. Финкельштейн М. И., Мендельсон В. Л., Кутев В. А. Радиолокация слоистых земных покровов. М.: Советское Радио, 1977.
3. Симаков В. В., Зеркаль А. Д., Серёгин Г. М. Контрольно-индикационный прибор для определения толщины и структуры льда // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2012. Вып. 1, 2. С. 67—69.
4. Езерский В. В., Баранов И. В., Каминский А. Ю. Измерение толщины льда при помощи частотно-модулированного дальномера // Измерительная техника. 2008. № 7. С. 21—25.
5. Атаянц Б. А., Давыдовкин В. М., Езерский В. В., Паршин В. С., Смольский С. М. Прецизионные системы ближней частотной радиолокации промышленного применения. Монография. М.: Радиотехника, 2012.
6. Баранов И. В., Болонин В. А., Давыдовкин В. М., Езерский В. В. Бесконтактное измерение толщины льда // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 6. С. 91—98.
7. Атаянц Б. А., Баранов И. В., Болонин В. А., Давыдовкин В. М., Езерский В. В. СВЧ ледомер с частотно модулированным сигналом // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014): материалы конф. в 2 т. Севастополь: Вебер. 2014. Т. 2. С. 974—975.

8. Пат. 2550363 РФ. Способ измерения толщины льда и определения свойств подстилающей поверхности подо льдом и устройство для его осуществления (варианты) / Б. А. Атаянц, В. М. Давыдочкин, И. В. Баранов, В. А. Болонин, В. В. Езерский // Изобретения. Полезные модели. 2015. № 13.

9. ПОТ РО-00030171—99. Правила по охране труда при выполнении перегрузочных работ в речных портах (утв. Минтранс России 30.12.1999). Приложение 6. Инструкция по обеспечению безопасного движения людей и транспорта по ледовой дороге.

Дата принятия: 27.07.2016.

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

534.6.08:53.088

Измерения акустических параметров с использованием радиоимпульса

К. А. ДРАЧЁВ, В. И. РИМЛЯНД

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия,
e-mail: project1326@mail.ru

Рассмотрены погрешности измерений акустических параметров при ультразвуковом контроле металлических труб с использованием возбуждающего сигнала в виде радиоимпульса.

Ключевые слова: скорость звука, коэффициент затухания, радиоимпульс, одиночный импульс.

Measuring errors of acoustic parameters in metal pipes with the use of the actuating signal as a radio pulse are considered.

Key words: sound speed, attenuation coefficient, radio pulse, single pulse.

В последние годы получили развитие методы и средства ультразвукового контроля длинномерных объектов — стержней, труб, пластин, листов, рельсов и т. п. Основой данных методов является волноводный эффект распространения ультразвука на значительные расстояния. При этом используются различные типы и моды ультразвуковых колебаний в волноводе: продольные и поверхностные (Релея) волны, волны Лэмба [1—3]. Создание подобных ультразвуковых систем требует знания зависимостей скорости звука C и коэффициента затухания α от частоты f для волн различных типов.

Определения зависимостей $C(f)$, $\alpha(f)$ возможны на базе резонансных методов, однако для объектов большой длины, обладающих волноводными свойствами, возникают проблемы, связанные с особенностями распространения ультразвуковых волн: большое число резонансов, одновременное возбуждение волн нескольких типов и др. Цель данной работы — установление возможности измерения дисперсионных зависимостей $C(f)$, $\alpha(f)$ для металлических труб с использованием в качестве зондирующего ультразвукового импульса (УЗИ) амплитудно-модулированного сигнала в виде радиоимпульса (РИ). В экспериментах длительность и амплитуда РИ составляли 50 мкс и 9 В, несущая частота изменялась в диапазоне 30—600 кГц. Для возбуждения РИ применяли пьезопреобразователи (ПП), расположенные

на торце металлической части или на поверхности трубы (рис. 1, ПП1). При возбуждении одиночным импульсом его длительность, амплитуда и крутизна фронта составляли соответственно 0,5 мкс, 9 В и 0,03 В/нс. Для уменьшения уровня фона использовали усреднение по 100 цифровым реализациям ($N = 100$). Более подробно методика эксперимента приведена в [4].

На рис. 2 приведены усреднённые цифровые осциллограммы сигнала для стальной трубы диаметром 114 мм, длиной 2 м и толщиной стенки 4 мм. На рис. 2, а представлены осциллограммы сигналов для ПП, установленных на торцах трубы. Применение РИ позволяет идентифицировать волну как с продольной поляризацией (имеет наибольшую скорость), так и поперечной. На рис. 2, б показаны осциллограммы сигналов для ПП, расположенных на поверхности трубы с углом ввода 50° (см. рис. 1). Возбуждение РИ позволяет создавать и идентифицировать поверхностную волну Рэлея (кривая 7) и волну Лэмба (кривая 6). При использовании одиночного импульса наблюдается только волна Рэлея (кривая 5), волну Лэмба невозможно выделить из шумов ($N \geq 100$). При этом увеличение амплитуды импульса до 50 В фактически не даёт положительного эффекта при любых углах ввода.

По результатам измерений времени прохождения между ПП, излучающим и принимающим РИ с различной частотой