

## РАДИОТЕХНИКА, РАДИОЛОКАЦИЯ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 621.396.96

### АНАЛИЗ СПЕКТРА СИГНАЛА РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЯ ТОЛЩИНЫ ПРЕСНОГО ЛЬДА С ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫМ СИГНАЛОМ

**В. В. Езерский**, д.т.н., профессор каф. РУС РГРТУ; ezerski@yandex.ru

**И. В. Баранов**, к.т.н., ведущий инженер ООО предприятие «КОНТАКТ-1»; market@kontakt-1.ru

**В. А. Болонин**, ведущий инженер ООО предприятие «КОНТАКТ-1»; sheppard@list.ru

**В. М. Давыдочкин**, к.т.н., начальник отдела СВЧ ООО предприятие «КОНТАКТ-1»; market@kontakt-1.ru

*Рассматривается задача анализа спектра сигнала разностной частоты измерителя толщины пресного льда с частотно-модулированным сигналом. Целью работы является выяснение особенностей спектра, позволяющих одновременно с измерением толщины льда надёжно определять степень опасности нахождения на льду для человека или транспортного средства при выполнении различных работ. С помощью численного моделирования на основе теоретических формул определяются возможные соотношения амплитуд отдельных составляющих отраженного сигнала в различных типичных ситуациях во всем практически интересном диапазоне толщины льда. Выполняется сравнение с экспериментально полученными спектрами сигнала разностной частоты и формулируются рекомендации по критериям обнаружения опасных ситуаций.*

**Ключевые слова:** измерение толщины пресного льда, частотно модулированный дальномер, опасные ситуации, критерии обнаружения.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2016-58-4-3-9

#### Введение

Возродившийся интерес к развитию северных районов России приводит к необходимости использования современных приборов контроля толщины льда при проведении различных транспортных операций и других работ, связанных с выходом на лёд людей и транспортных средств. Работы, связанные с измерением толщины льда, проводились в нашей стране давно [1, 2]. Однако эти работы в основном проводились с целью измерения толщины морского льда с борта самолёта или вертолёт. Существует огромное число ситуаций, когда необходимо проводить измерение толщины пресного речного или озерного льда непосредственно в конкретной точке, где в данный момент проводятся работы. Причём в таких измерениях необходимо не только измерить толщину льда, но и автоматически оценить степень опасности ситуации. До настоящего времени не существует серийно выпускаемого прибора для измерения толщины пресного льда (далее будем его называть ледомером), позволяющего достаточно надёжно фик-

сировать толщину и определять возможности перемещения по льду людей и техники, хотя работы в этом направлении проводятся [3–7]. Основой для разработки подобных приборов, позволяющих бесконтактным способом измерять толщину льда, являются радиолокационные дальномеры ближнего действия. Возможно использование импульсного дальномера [3] и частотно модулированного (ЧМ) дальномера [4–7]. Идея измерения заключается в определении разницы задержек  $\Delta_t = t_{3\text{нп}} - t_{3\text{вп}}$  сигналов, отражённых от верхней  $u_{\text{вп}}(t, t_{3\text{вп}})$  и нижней  $u_{\text{нп}}(t, t_{3\text{нп}})$  поверхностей льда, и вычислении толщины льда  $L$  с использованием известной скорости распространения радиосигнала  $c_{\text{лед}}$  внутри льда [1, 2]:

$$L = c_{\text{лед}} \Delta_t. \quad (1)$$

Отметим, что ледомер должен проводить измерение толщины льда в диапазоне от 6–7 см до 3 м [8].

Можно предположить, что на основе анализа особенностей отражённых сигналов от поверхностей льда можно составить представление

о характере среды подо льдом, что позволит принять решение о степени опасности [4–6].

Очень подробный анализ процесса образования различных типов льда имеется в [1, 2]. Поэтому, не останавливаясь на причинах возникновения, перечислим опасные ситуации:

- тонкий однородный лёд на поверхности воды, когда его толщина не достигает значений, позволяющих передвигаться по льду человеку или транспортному средству [8];

- зависший слой льда с воздушной прослойкой между льдом и поверхностью воды, когда прочности даже толстого слоя льда недостаточно для сохранения несущей способности;

- неоднородный по структуре слой льда, прочность которого меньше однородного слоя;

- наличие тонкого слоя воды на поверхности льда, вследствие чего измерение его толщины невозможно, так как сигнал полностью отражается от слоя воды с высокой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon_{\text{воды}} = 80$ ) и не проникает в лёд.

Дополнительные трудности возникают, когда во всех перечисленных ситуациях на поверхности льда имеется слой снега с жёстким верхним настом. При этом возникает дополнительный отражённый сигнал, затрудняющий работу ледомера. Однако в данной работе эта ситуация не рассматривается.

**Целью** данной работы является анализ свойств спектра сигнала ЧМ ледомера, полученного с помощью численного моделирования и экспериментальным путём и выявление особенностей, позволяющих определить степень опасности сложившейся ситуации.

### Теоретический анализ спектра сигнала разностной частоты

Известно [9], что в ЧМ дальномере информация о расстоянии содержится в разностной частоте сигнала на выходе смесителя. Этот сигнал называют сигналом разностной частоты (СРЧ). Поэтому для измерения толщины льда и распознавания опасной ситуации необходимо анализировать спектр СРЧ, который рассчитывается цифровым способом на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ) или непрерывно-дискретного преобразования Фурье (НДПФ) [10]. При этом СРЧ обязательно обрабатывается весовой функцией (ФВ). Правильный выбор ВФ должен обеспечить значительное подавление боковых лепестков спектра, но при этом не ухудшить существенно разрешающую способность дальномера, определяющую минимально измеряемую толщину льда. С этой целью на основе адаптируемых весовых функций [9] была синтезирована ВФ, обеспечивающая уровень боковых лепестков

–37 дБ и расширение основного лепестка не более 1,6 раз по сравнению с равномерной ВФ.

Для проведения анализа необходимо оговорить параметры зондирующего сигнала и условия проведения измерений. Примем во внимание, что относительная диэлектрическая проницаемость пресного льда  $\epsilon_{\text{л}}$  практически не зависит от частоты [1, 2] и равна 3,2 и учтём, что для достижения требуемой разрешающей способности по расстоянию (6–7 см), необходимый диапазон перестройки частоты  $\Delta_f$  при ЧМ должен быть не менее 2,5 ГГц. Эти обстоятельства обуславливают выбор минимальной частоты несущего колебания в области 8...10 ГГц. Такой диапазон перестройки частоты в настоящее время практически возможен в указанном диапазоне частот с использованием современных коммерчески доступных микросхем СВЧ генераторов и цифровых синтезаторов частоты. В этом же диапазоне наблюдается минимум затухания электромагнитных волн в пресноводном льду (в диапазоне 6–10 ГГц [1, 2]). Примем частоту несущего колебания  $f_0 = 8,5$  ГГц.

В данной работе при проведении всех численных расчётов и в экспериментальных исследованиях использовался диапазон перестройки частоты при ЧМ  $\Delta_f = 2,54$  ГГц. С учётом указанных выше параметров ВФ это соответствует разрешающей способности ледомера по толщине льда примерно 53 мм.

Для проведения измерений ледомер размещается на некоторой высоте  $H_{\text{возд}}$  над поверхностью льда. Его держит в руках человек или он подвешивается к транспортному средству либо располагается на некоторой дополнительной конструкции с полозьями для скольжения по поверхности льда. Высота подвеса ледомера обычно колеблется в пределах 0,5 м – 1 м. Антенна ледомера (как правило, рупорная, но может быть и планарная) направлена вертикально вниз. Ледомер излучает зондирующий сигнал по направлению к поверхности льда. Проводимость льда, использованная при расчётах, варьировалась в пределах от 1 мксим/м до 4 мксим/м [1, 2].

Необходимо проанализировать формы спектров СРЧ и соотношения амплитуд экстремумов в разных ситуациях, представляющих наибольший практический интерес.

1. Наиболее простой является ситуация расположения однородного слоя пресного льда толщиной  $L$  на воде. В сигнале на выходе смесителя имеются два основных слагаемых, соответствующих отражению от верхней и нижней поверхностей льда, порождающих два максимума в спектре СРЧ.

В [1, 2] имеются формулы для коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных волн на плоской границе раздела двух сред, коэффициента затухания волны в толще льда и коэффициента фокусирования электромагнитной волны при прохождении через слой льда. Используя их, можно рассчитать амплитуды различных отражённых сигналов во всём практически интересном диапазоне изменения толщины льда. Аналогично можно рассчитать время задержки каждого из этих сигналов. Экспериментальные измерения и теоретические рассуждения показывают, что даже в такой простой ситуации сигнал имеет более сложный состав, затрудняющий проведение измерений и анализ ситуации. На самом деле в СРЧ кроме слагаемых, соответствующих отражению от верхней и нижней поверхностей льда, существуют другие сигналы, порождающие локальные максимумы в спектре. Наиболее существенными из них являются:

– отражения сигнала в антенно-волноводном тракте, вызванные сложностью согласования в широкой полосе частот и называемые «нулевыми» отражениями  $u_{\text{нул}}(t, t_{\text{з нул}})$ ;

– многократные переотражения сигнала между антенной ледомера и поверхностями льда, из которых наибольшее значение имеют двойные отражения соответственно от верхней  $u_{\text{дв вп}}(t, t_{\text{з дв вп}})$  и нижней  $u_{\text{дв нп}}(t, t_{\text{з дв нп}})$  поверхностей льда;

– переотражения внутри слоя льда, наибольшим из которых является второе переотражение  $u_{\text{дв лед}}(t, t_{\text{з дв лед}})$ ;

– двойное отражение от верхней поверхности льда, антенны и нижней поверхности льда  $u_{\text{дв нп вп}}(t, t_{\text{з дв нп вп}})$ .

Их амплитуды и задержки также можно рассчитать указанным способом. Причём последнее отражение совпадает по всем параметрам с двойным отражением от нижней поверхности льда, антенны и верхней поверхности. По этой причине в расчётах оно должно иметь двойную амплитуду. В итоге сигнал на выходе смесителя с учётом наиболее существенных отражений можно в рассматриваемой ситуации записать следующим образом:

$$u_{\text{СРЧ}}(t) = u_{\text{нул}}(t, t_{\text{з нул}}) + u_{\text{нп}}(t, t_{\text{з нп}}) + u_{\text{вп}}(t, t_{\text{з вп}}) + u_{\text{дв вп}}(t, t_{\text{з дв вп}}) + u_{\text{дв нп}}(t, t_{\text{з дв нп}}) + u_{\text{дв лед}}(t, t_{\text{з дв лед}}) + 2u_{\text{дв нп вп}}(t, t_{\text{з дв нп вп}}), \quad (2)$$

где  $u_i(t, t_{\text{з } i}) = A_i \cos[\varphi(t, t_{\text{з } i})]$ ;  $(3)$

$A_i$  и  $\varphi_i(t, t_{\text{з } i}) = 2\pi(f_0 + \Delta_F t/T)t_{\text{з } i} + \varphi_{\text{ко } i}$  – соответственно амплитуда и фаза  $i$ -го слагаемого

СРЧ;  $t_{\text{з } i}$  – время задержки этого слагаемого;  $f_0$  – начальная частота ЧМ несущего колебания;  $t$  – текущее время;  $T$  – интервал линейного нарастания частоты при ЧМ;  $\varphi_{\text{ко } i}$  – начальная фаза соответствующего слагаемого, складывающаяся из фаз соответствующих комплексных коэффициентов отражения и прохождения.

Эта формула позволяет вычислять СРЧ при различных значениях толщины льда. На рисунке 1 приведён нормированный к максимальному значению амплитудный спектр СРЧ, вычисленный с помощью БПФ на основе выражения (2) при толщине льда 300 мм.

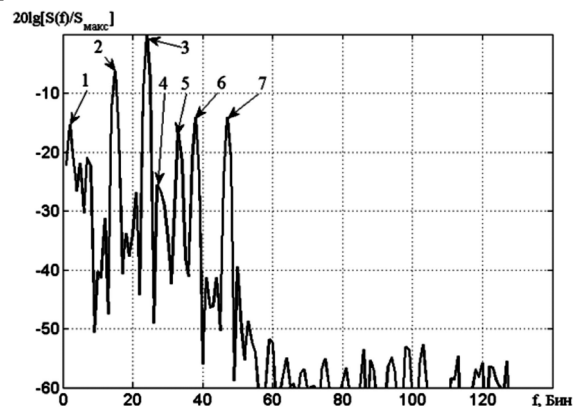


Рисунок 1 – Спектр СРЧ, полученный путём моделирования при толщине льда 300 мм

Цифрами на поле рисунка обозначены максимумы спектра, соответствующие перечисленным слагаемым сигнала: 1 – нулевое отражение, 2 – отражение от верхней поверхности льда, 3 – отражение от нижней поверхности льда, 4 – двойное отражение от верхней поверхности льда, 5 – переотражение внутри слоя льда, 6 – двойное отражение от верхней поверхности льда, антенны и нижней поверхности льда, 7 – двойное переотражение от антенны и нижней поверхности льда (от воды).

Информационным параметром, позволяющим дать трактовку каждому максимуму спектра, является соотношение амплитуд этих максимумов.

Опасной эта ситуация становится в том случае, когда измеренная толщина льда меньше известных норм по нагрузке для однородного пресного льда [8].

2. Вода на поверхности льда. Вследствие высокого значения диэлектрической проницаемости воды и большого затухания зондирующий сигнал не проникает в толщу льда. Поэтому СРЧ представляет из себя сумму основного отражения и многократных переотражений между антенной и водой на верхней поверхности льда. При этом в спектре СРЧ кроме нулевого отражения имеется главный максимум, соответствующий отражению от воды, и множество максимумов

мов меньшей амплитуды с частотами, кратными частоте главного максимума, и уменьшающимися амплитудами. Измерение толщины льда в этих условиях невозможно и по этой причине такая ситуация тоже может считаться опасной.

3. Воздух под поверхностью льда. Это наиболее сложная и опасная ситуация, которая возникает на некоторых участках водоёма в результате зависания льда при снижении уровня воды. Такой 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 максимумов (до 15) с различными амплитудами, соответствующих первым отражениям от соответствующих поверхностей и различным сочетаниям переотражений от антенны и этих поверхностей. Все эти отражённые сигналы также можно записать аналогично (2).

4. Неоднородный лёд на воде с наличием различных внутренних дефектов, вызывающих отражение сигнала. Например, неоднородность шугового льда, возникающего на течении реки или неоднородность, возникающая при замерзании подтаявшего слоя снега на поверхности льда, образовавшегося после кратковременных оттепелей, а также наличие в толще льда линз с воздухом, вмёрзших стволов деревьев, кустов или травы. По форме спектра эта ситуация очень похожа на предыдущую. Она также представляет опасность, так как неоднородный лёд имеет меньшую прочность, чем однородный.

Для указанных ситуаций по формулам, аналогичным (2), были проведены количественные расчёты амплитуд сигналов, отражённых и переотражённых от антенны и поверхностей льда и воды при различных толщинах льда. При этом отражающие поверхности считались идеально гладкими и расположенными строго перпендикулярно относительно падающей плоской зондирующей электромагнитной волны. Расчёты проводились для указанных выше параметров несущего сигнала и электрофизических параметров льда, имеющих в [1, 2] и других литературных источниках. Толщина льда изменялась с шагом 1 мм в пределах от 0,6 м до 3 м, представляющих интерес для движения по льду человека или транспортного средства. Наиболее характерные результаты расчётов в виде зависимости от толщины льда относительных амплитуд отражённых сигналов  $A_1$ , нормированных к амплитуде  $A_{вп}$ , приведены на рисунке 2 и рисунке 3. На рисунке 2 показаны эти зависимости в дБ для наиболее благоприятной ситуации однородного льда на воде. Здесь можно выделить

две характерные области. Первая область соответствует тонкому льду, когда амплитуда отражения от раздела нижняя поверхность льда – вода превышает отражение от верхней поверхности, т.е. график, соответствующий отражению от нижней поверхности, расположен выше линии, соответствующей 0 дБ. В зависимости от коэффициента затухания льда (т.е. от проводимости льда) верхняя граница этой области лежит в пределах 1,5–1,9 м.

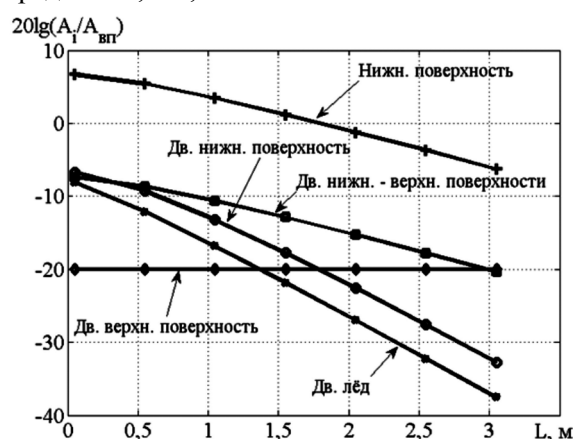


Рисунок 2 – Относительные амплитуды сигналов для ситуации лёд на воде

В этой области толщин льда главный максимум спектра СРЧ должен быть расположен правее отражения от верхней поверхности льда.

Вторая область соответствует толстому льду, когда амплитуда отражения от верхней поверхности льда становится больше амплитуды отражения от нижней поверхности вследствие затухания сигнала в толще льда. Здесь главный максимум должен быть первым в анализируемой области спектра СРЧ.

Во всех случаях амплитуды сигналов, вызванных переотражениями, мешающими правильной идентификации ситуации, не превышают уровня -14 дБ относительно главного максимума. Поэтому это значение можно использовать в качестве граничного для нахождения в спектре СРЧ второго полезного максимума.

На рисунке 3 показаны аналогичные соотношения между основными отражениями для опасной ситуации наличия воздуха между слоем льда и поверхностью воды.

Отметим, что здесь также имеются две характерные области, соответствующие разным соотношениям амплитуд отражения от воды и от верхней поверхности льда с границей между этими областями в пределах 1,7–2,2 м. Мешающие отражения, затрудняющие определение толщины льда и идентификацию сложившейся ситуации, не превышают здесь -13 дБ относительно главного максимума.

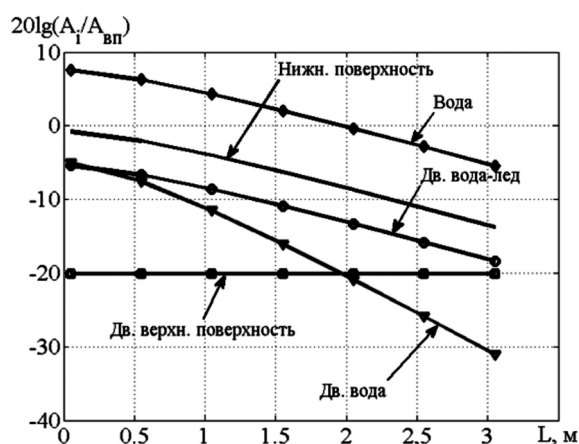


Рисунок 3 – Относительные амплитуды сигналов для ситуации – воздух подо льдом

При разработке алгоритма обработки спектра СРЧ необходимо учитывать не только эти результаты, но и то, что отражающие поверхности (особенно верхняя поверхность льда) 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. На положении и форме максимумов спектра сказываются взаимные влияния боковых лепестков спектра каждого из сигналов и интерференция этих спектров при совпадении их времени задержки. Такое совпадение наблюдается, например, при толщинах льда  $L$  вблизи значений  $L_1 = 0,5H/\sqrt{\epsilon_{\text{льда}}}$ , где  $H$  – высота подвеса ледомера относительно верхней поверхности льда,  $\epsilon_{\text{льда}}$  – диэлектрическая проницаемость льда и  $L_2 = 2L_1$ . При этих значениях толщины льда переотражение от антенны и от верхней поверхности льда совпадает по времени соответственно с переотражением внутри слоя льда и с отражением от нижней поверхности льда (см. рисунок 1). Соответствующий результирующий максимум спектра вблизи этих значений толщины льда сильно флюктуирует по величине и положению. Причём наиболее существенными являются изменения амплитуды, приводящие к ошибочным идентификациям ситуации.

#### Экспериментальные исследования спектра СРЧ ледомера

В зимние периоды 2014/2015 г. и 2015/2016 г. в средней полосе России проведены экспериментальные исследования макета ЧМ ледомера, изготовленного на ООО предприятие «КОНТАКТ-1».

При испытаниях производилась запись на внешний носитель спектров СРЧ и образцов СРЧ для дальнейшей обработки, анализа спектров и сигналов, разработки алгоритма работы ледомера

и выбора его конкретных параметров. Записано более 2000 спектров СРЧ и более 200 СРЧ. Анализ полученных результатов показал, что свойства реальных сигналов ЧМ ледомера гораздо разнообразнее, чем предполагалось в работах [4, 5, 7, 9] и следует из рассмотренного выше материала. Эти отличия особенно важны при автоматическом принятии прибором решения о степени опасности складывающейся ситуации.

Образец спектра одного из записанных СРЧ при толщине льда 300 мм и ситуации 1 приведён на рисунке 4. Цифры на поле рисунка соответствуют обозначениям рисунка 1.

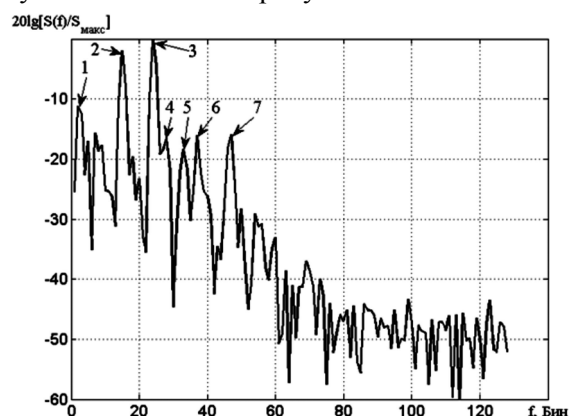


Рисунок 4 – Спектр СРЧ, записанного макетом ледомера при толщине льда 300 мм

Видно, что этот спектр очень хорошо качественно и количественно совпадает со спектром, теоретически рассчитанным на основе модели (2) и показанным на рисунке 1.

Наряду с такими хорошо совпадающими результатами часто возникают искажения спектра, вызванные указанными выше причинами. Наиболее характерны следующие искажения, влияющие на принятие решения о степени опасности ситуации:

- сильное снижение отражения от верхней поверхности льда вплоть до уровня -23 дБ относительно максимального значения, соответствующего отражению от нижней поверхности;
- сильное завышение отражения от верхней поверхности до уровня 3...5 дБ относительно отражения от нижней поверхности (т.е. от воды);
- заниженный уровень отражения от нижней поверхности;
- заниженный общий уровень сигнала до величины, равной и менее чем нулевое отражение;
- раздвоение вершины одного из основных максимумов на два, расстояние между которыми не превышает элемента разрешения, что приводит к ложному обнаружению несуществующего отражения, искажающего существующую ситуацию на льду.

Необходимо учитывать эти искажения при формулировке требований к программе поиска максимумов спектра.

Отметим, что экспериментальные результаты получены только для тонкого льда, так как у авторов не было возможности провести измерения в тех зонах России, где образуется толстый лёд. Поэтому для повышения достоверности выводов целесообразно провести дальнейшие экспериментальные измерения при толщине льда, превышающей 1,5 м.

#### **Рекомендации по поиску максимумов спектра СРЧ**

Наличие двух областей по толщине льда (см. рисунок 2 и рисунок 3), отличающихся взаимным расположением глобального максимума и остальных возможных максимумов спектра, приводит к необходимости поиска при обработке СРЧ восьми максимумов его спектра для достоверного обнаружения всех рассмотренных выше опасных ситуаций. При этом реально в спектре существуют не все восемь максимумов. Сопоставление экспериментально полученных спектров с аналогичными спектрами, полученными с помощью численного моделирования, позволяет задать критерии, которые должны использоваться при поиске максимумов спектра в алгоритме обработки СРЧ:

– первым необходимо находить максимум спектра, соответствующий нулевому отражению в диапазоне частот от нуля до частоты, соответствующей половине расстояния от высоты подвеса антенны до верхней поверхности льда (в данном случае это примерно 9 бин), и принимать решение о неисправности ледомера, если этот максимум не найден;

– найденный далее наибольший (глобальный) максимум в оставшейся части спектра должен превышать уровень нулевого отражения как минимум на 6 дБ. В противном случае алгоритм должен принять решение об ошибке и не проводить дальнейшую обработку спектра до тех пор, пока не будет достигнуто указанное соотношение;

– уровень боковых левого и правого максимумов спектра относительно глобального максимума не может быть менее -25 дБ;

– уровень дополнительных левого и правого максимумов вокруг найденного левого бокового максимума не может быть менее -3 дБ относительно уровня левого бокового максимума;

– уровень дополнительных левого и правого максимумов вокруг найденного правого бокового максимума не может быть менее -6 дБ относительно уровня правого бокового максимума;

– при поиске боковых максимумов необходимо их фиксировать только в том случае, если они отстоят от текущего основного максимума не менее, чем на 1,5 элемента разрешения, т.е. более 3 бин.

Положение и величину всех найденных максимумов следует запоминать в промежуточном массиве. Если какой-либо максимум не найден, то в соответствующие элементы массива должны записываться нулевые значения (или заранее оговорённые очень маленькие величины для устранения неопределённости при дальнейшей обработке).

#### **Заключение**

Выявлены особенности теоретических и экспериментально полученных спектров СРЧ, которые проявляются в соотношении амплитуд максимумов, соответствующих основным отражениям от поверхностей льда и большого количества переотражений и их динамике при изменении толщины льда и состояния его поверхностей. Сформулированы критерии, учитываемые при поиске глобального и локальных максимумов спектра, которые являются основой для разработки алгоритма и программы работы ледомера и позволяют повысить достоверность оценки сложившейся на льду ситуации. Целесообразно проверить выводы при большей толщине льда.

#### **Библиографический список**

1. **Финкельштейн М. И., Мендельсон В. Л., Кутев В. А.** Радиолокация слоистых земных покровов: под. Ред. М. И. Финкельштейна. М.: Сов. Радио, 1977, 176 с.
2. **Финкельштейн М. И., Лазарев Э. И., Чижов А. Н.** Радиолокационные аэроледомерные съёмки рек, озёр, водохранилищ. Ленинград: Гидрометеопиздат, 1984. 112 с.
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. Вып 1,2. 2012 г. 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. **Ezerski V. V., Baranov I. V., Kaminskii A. Yu.** Measurement of the thickness of ice by means of a frequency-modulated radiometer // Measurement Techniques, 2008, Vol. 51 №7, p.726-733.
6. **Баранов И. В., Болонин В. А., Давыдочкин В. М., Езерский В. В.** Бесконтактное измерение толщины льда // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 6. С 91-98.
7. Патент РФ № 2550363 G01S 13/95 Б. А. Атаянц, В. М. Давыдочкин, И. В. Баранов, В. А. Болонин, В. В. Езерский Способ измерения толщины льда

определения свойств подстилающей поверхности подо льдом и устройство для его осуществления (варианты). // Заявл. 07.02.2014. Оpubл. 10.05.2015. Бюл. № 13.

8. Правила охраны труда при строительстве, ремонте и содержании автомобильных дорог. – М: НПО «РОСДОРНИИ». 1993. 47 с.

9. Прецизионные системы ближней частотной радиолокации промышленного применения. Монография. / Б. А. Атаянц, В. М. Давыdochкин, В. В. Езерский, В. С. Паршин, С. М. Смольский – М.: Радиотехника, 2012. 512 с.

10. Марпл.-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.

UDC 621.396.96

## THE ANALYSIS OF FREQUENCY DIFFERENCE SIGNAL SPECTRUM OF AN INSTRUMENT MEASURING THICKNESS OF FRESH ICE WITH FREQUENCY-MODULATED SIGNAL

**V. V. Yezerky**, PhD, full professor, department of RCS, RSREU; ezerski@yandex.ru

**I. V. Baranov**, PhD (technical sciences), leading engineer, «KONTAKT-1» enterprise LTD; market@kontakt-1.ru

**V. A. Bolonin**, leading engineer of «KONTAKT-1» LTD enterprise; sheppard@list.ru

**V. M. Davydochkin**, PhD (technical sciences), the chief of department of microwaves, «KONTAKT-1» enterprise LTD; market@kontakt-1.ru

*The problem of the analysis of frequency difference signal spectrum of an instrument measuring thickness of fresh ice with frequency-modulated signal is considered. The aim of the work is to find out the features of spectrum allowing to define reliably the degree of danger being on ice for a person or a vehicle doing some work as well as simultaneously to measure ice thickness. By means of numerical modeling on the basis of theoretical formulas possible parities of amplitudes of separate components of the reflected signal in various typical situations in practically the whole range of ice thickness are defined. The comparison with experimentally received spectra of difference frequency signal is carried out and recommendations about criteria of detection of dangerous situations are formulated.*

**Keywords:** measurement of fresh ice thickness, frequency modulated range finder, dangerous situations, criteria of detection.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2016-58-4-3-9

### References

1. Finkelshtejn M. I., Mendelson V. L., Kutev V. A. Radiolokacija sloistyh zemnyh pokrovov. Pod. Red. M.I. Fineklshtejna. Moscow, Sov. Radio, 1977, 176 p. (in Russian).

2. Finkelshtejn M. I., Lazarev Je. I., Chizhov A. N. Radiolokacionnye ajeroledomernye sjomki rek, ozer, vodohranilishh. St. Peterburg, Gidrometeoizdat, 1984, 112 p. (in Russian).

3. Simakov V. V., Zerkal A. D., Serjogin G. M. Kontrolno-indikacionnyj pribor dlja opredelenija tolsh-hiny i struktury lda. Sistemy i sredstva svjazi, televidenija i radioveshhanija. 2012, issue 1, 2, pp. 67-69. (in Russian).

4. Ezerskij V. V., Baranov I. V., Kaminskij A. Ju. Izmerenie tolshhiny lda pri pomoshhi chastotno-modulirovannogo dalnamera. Izmeritelnaja tehnik, 2008, no. 7, pp. 21-25. (in Russian).

5. Ezerski V. V., Baranov I. V., Kaminskii A. Yu. Measurement of the thickness of ice by means of a frequency-modulated radiometr. Measurement Techniques, 2008, vol. 51, no.7, pp.726-733.

6. Baranov I. V., Bolonin V. A., Davydochkin V. M., Ezerskij V. V. Beskontaktnoe izmerenie tolshhiny lda. Uspehi sovremennoj radiojelektroniki. 2014, no. 6, pp. 91-98. (in Russian).

7. Patent RF № 2550363 G01S 13/95 Atajanc B. A., Davydochkin V. M., Baranov I. V., Bolonin V. A., Ezerskij V. V. Sposob izmerenija tolshhiny lda i opredelenija svojstv podstilajushhej poverhnosti podo ldom i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija (varianti). Zajavl. 07.02.2014. Opubl. 10.05.2015. Bjul. No. 13. (in Russian).

8. Pravila ohrany truda pri stroitelstve, remonte i sodержanii avtomobilnyh dorog. Moscow, NPO «ROSDORNII». 1993. 47 p. (in Russian).

9. Precizionnye sistemy blizhnej chastotnoj radiolokacii promyshlennogo primenenija. Monografija. / Atajanc B. A., Davydochkin V. M., Ezerskij V. V., Pars-hin V. S., Smolskij S. M. Moscow, Radiotehnika, 2012. 512 p. (in Russian).

10. Marpl.-ml. S. L. Cifrovoj spektralnyj analiz i ego prilozhenija. Per. s angl. Moscow, Mir, 1990. 584 p. (in Russian).