

КАЛИБРОВКА РАДИОЛОКАТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ МОРСКИХ ЛЬДОВ

П.А.Кондратов, А.Г.Оганесян,
В.Ф.Ткаченко, И.Б.Чайковский

Национальный университет
“Львовская политехника”
г.Львов, ул. Ст.Бандеры, 12
E-mail: oganes@polynet.lviv.ua

В статье изложены способы автоматической калибровки радиолокатора для измерения толщины морских льдов с борта самолета.

Введение.

В широко используемых радиолокационных станциях (РЛС) сантиметрового диапазона волн отраженный сигнал формируется внешней поверхностью земных покрытий и не содержит информации о их глубинной структуре, что затрудняет интерпретацию полученных радиолокационных панорам. В то же время РЛС проникающего зондирования (РЛСПЗ) используют метровый диапазон, при котором часть зондирующего сигнала (ЗС) проникает под поверхность, в результате чего отраженный сигнал содержит составляющие, вызванные неоднородностями внутри зондируемых покрытий. Это позволяет получить их разрез на глубину, определяемую глубиной проникновения ЗС, что особенно важно при экологическом мониторинге, в частности, при ледовой разведке [1].

Проникающей радиолокацией занимаются достаточно давно, однако многое здесь до сих пор остаётся не ясным, особенно – при зондировании слоистых дисперсных сред, например, дрейфующего морского льда, радиопрозрачного лишь в узком диапазоне радиочастот (25÷200 МГц). Поэтому использование здесь сверхширокополосных ЗС в значительной мере лишено смысла, поскольку ширина их спектра ограничивается окном прозрачности отражающего слоя. И, если допустимо пренебрегать формой и длительностью сверхширокополосного ЗС (обычно они – в пределах допустимой разрешающей способности), то формой ЗС с ограниченным спектром пренебречь нельзя, что и обуславливает актуальность исследований в этом направлении.

Целью настоящей статьи является рассмотрение возможных способов калибровки РЛСПЗ и их влияния на точность производимых измерений.

Импульсная РЛСПЗ типа “Акварин” работала с отраженным сигналом, представлявшим собой сумму семи синусоид [2]:

$$x(t) = \sum_{k=1}^7 A_k \cdot \sin(2\pi f_0 k t + \varphi_k), \quad (1)$$

где A_k , φ_k – соответственно, амплитуда и фаза, значения которых в процессе калибровки устанавливал оператор;

f_0 – нижняя частота в спектре, $f_0 = 25$ МГц.

Во время полёта над спокойной морской поверхностью оператор, вращая ручки регулировки амплитуд и фаз, старался получить импульсный сигнал с максимальной скважностью при периоде повторения $1/f_0$ и наблюдая один полный период отраженного сигнала на экране индикатора. Толщина льда определялась по положению второго максимума (первый находился в начале развёртки). При этом априорно предполагалось, что уровень сигнала, отраженного от верхней поверхности льда, всегда выше сигнала, отраженного от нижней. На малых же толщинах, когда максимумы сигналов от верхней и нижней поверхностей неразличимы, толщина оценивалась по увеличению длительности импульса. Естественно, эта оценка зависела от относительного уровня, на котором измерялась длительность импульса. При этом оператор полностью добиться желаемого не мог, поскольку сигнал содержал более одного максимума (рис.1).

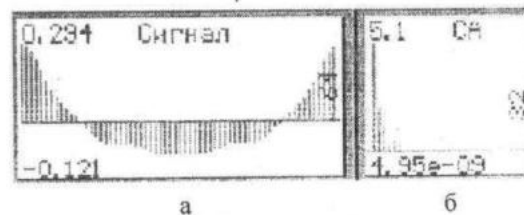


Рис. 1 – Сигнал зондирующего сигнала “Акварина” (а) и среднестатистический спектр амплитуд его отраженных сигналов, полученных при натуральных испытаниях (б)

Наличие же в ЗС дополнительных максимумов вело к неопределённости и, соответственно, к сбоям. Неправдоподобные значения, возникающие в результате

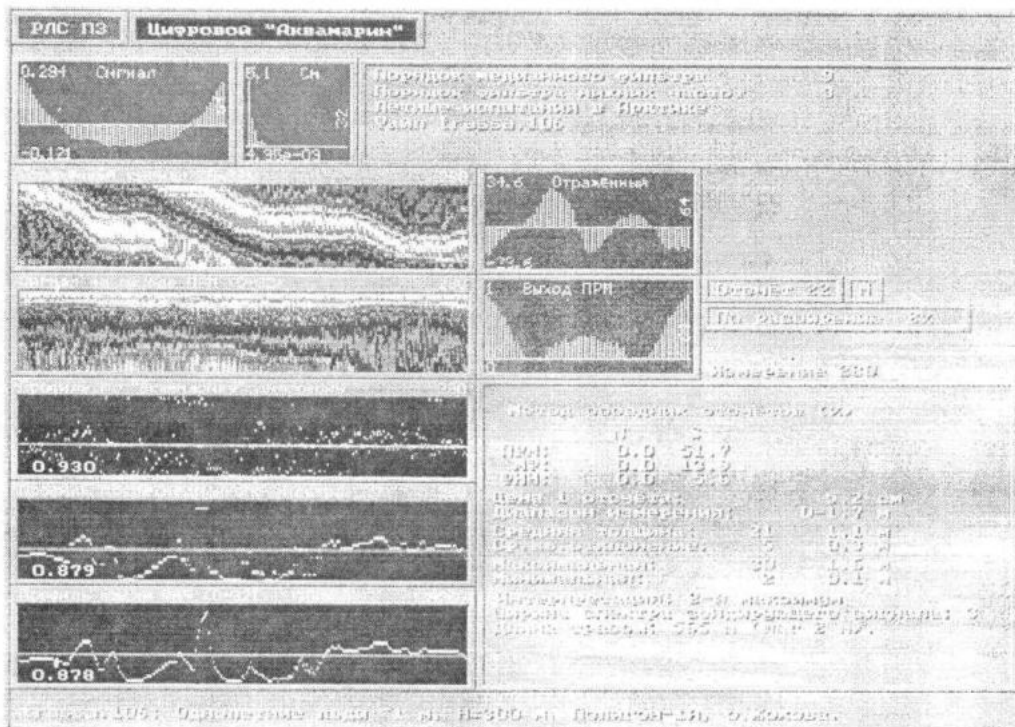


Рис. 2 – Профиль толщин льда в районе о-ва Жохова, полученный на "Аквамарине"

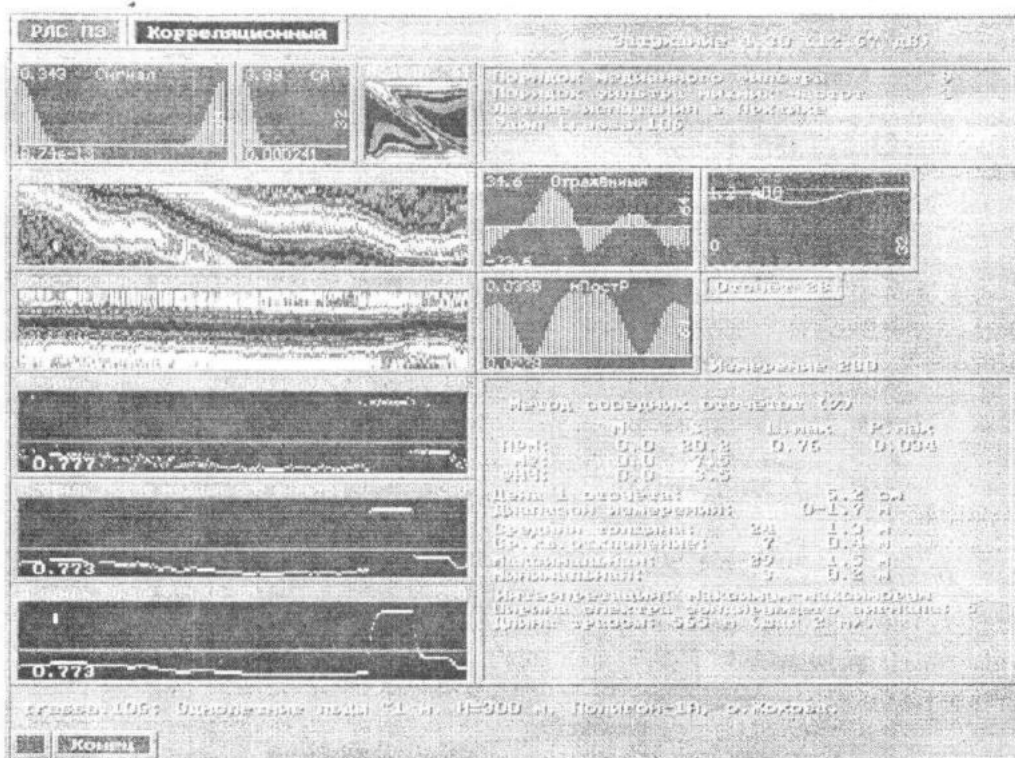


Рис. 3 – Профиль толщин льда, полученный путём корреляционной обработки

Погрешность измерений толщины льда

Тип профиля	Среднеквадратичная погрешность, %	
	"Аквамарин"	Корреляционная
Исходный	51	20
После медианной фильтрации	14	8
После низкочастотной фильтрации	6	4

этого, вызывают значительные трудности при последующем анализе. Для их устранения предложено немало алгоритмов автоматического редактирования, но ни один из них не является полностью удовлетворительным.

Минимальную погрешность обеспечивает колокольный ЗС с одним максимумом за период повторения:

$$x_i = \exp(-i^2 \tau^2), \quad (2)$$

где τ – длительность импульса.

Но поскольку реальная антенно-фидерная система значительно искажает ЗС, то необходимо вводить коррекцию амплитуд и фаз. Для этого в “Акварине” использовался сигнал, отраженный спокойной поверхностью моря. Но, имея его, эту операцию можно выполнять автоматически и наилучшим образом: на основе полученных данных нетрудно автоматически синтезировать обратный фильтр, на выходе которого формируется колокольный ЗС [3].

Корреляционная РЛСПЗ, предлагаемая авторами, основана на применении принципа многократной калибровки, который состоит в том, что последовательно вычисляются коэффициенты взаимной корреляции отраженного и образцовых сигналов от льдов различной толщины, т.е. формируется функция правдоподобия. При этом образцовые сигналы моделируются предварительно (на основе имеющейся библиотеки реальных отраженных сигналов и толщин льда) и записываются в память.

Далее вычисляется апостериорное распределение и по положению его максимума-максимума определяется толщина слоя льда.

При имитационном моделировании такой РЛСПЗ ее ЗС синтезировался, аналогично (1), из гармонических составляющих со специально подобранными частотами, амплитудами и фазами [4]:

$$x_i = \sum_{k=1}^m A_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} k \cdot i + \varphi_k\right), \quad (3)$$

где m , N – количество, соответственно, гармоник и отсчетов в сигнале.

Сравнение РЛСПЗ произведено нами на основе записанных отраженных сигналов “Акварина” во время натуральных летних испытаний над дрейфующими льдами Арктики (рис.2) и корреляционной обработ-

ки этих сигналов (рис.3). Здесь хорошо просматривается стык двух ледяных полей в конце трассы и разводе. Для приведенного отрезка трассы длиной около 600 м (280 отсчетов толщины льда с шагом 2 м) погрешность “Акварина” составила около 52%, а погрешность корреляционной РЛСПЗ – 20%. Разница существенная.

Аналогичные результаты были получены и после вторичной обработки профилей путём медианной и низкочастотной фильтрации (см. табл.)

Выводы, сделанные из полученных результатов, состоят в следующем.

– У импульсных РЛСПЗ погрешность измерения толщины слоистых сред сильно зависит от формы зондирующего сигнала.

– Погрешность измерения корреляционной РЛСПЗ существенно ниже, чем у импульсной. При этом она практически не зависит от спектра фаз и формы зондирующего сигнала. Наименьшую погрешность позволяют получить сигналы, синтезированные из синусоид с примерно одинаковыми амплитудами и произвольными, но когерентными начальными фазами.

– Погрешность измерения РЛСПЗ обоих рассмотренных типов уменьшается с увеличением ширины спектра зондирующего сигнала. При зондировании дисперсных сред увеличение ширины спектра сигнала и связанное с этим уменьшение погрешности имеет предел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богородский В.В., Оганесян А.Г. Проникающая радиолокация морских льдов с цифровой обработкой информации. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 342 с.
2. Кондратов П.А., Оганесян А.Г., Ткаченко В.Ф. Проникающая радиолокация моря и суши в метровом диапазоне волн// Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ, 2002. – С.267-271.
3. Добуш Ю.Д., Козевич О.П., Накалов Е.Ф., Оганесян А.Г. Корреляционная цифровая обработка радиолокационных сигналов при измерении толщины морских льдов// Автометрия. – 1989. – №6. – С.40-45.
4. Робинсон Л.А., Уэйр У.Б., Юнг Г.Л. Установление местоположения и распознавание неоднородностей в диэлектрических средах с помощью синтезируемых ВЧ-импульсов// ТИИЭР. – 1974. – №62. – С.42-52.