

ПРОНИКАЮЩАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ МОРЯ И СУШИ В МЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

П. А. Кондратов, А. Г. Оганесян,
В. Ф. Ткаченко

Национальный университет
«Львовская политехника»
г. Львов, ул. С. Бандери, 12
E-mail: oganes@polynet.lviv.ua

Исследования последних лет показали, что возможно создание радиолокационной станции, предназначенной для решения широкого круга задач: измерение толщины морских и речных льдов, состояния морской поверхности, разведки грунтовых вод и мониторинга окружающей среды. Используется метровый диапазон волн, где часть излученного сигнала проникает под поверхность и отраженный сигнал содержит составляющие от неоднородностей внутри зондируемого покрова. Метод проверен в натурных условиях при полетах в различных районах Арктики. Выполненные исследования позволяют утверждать, что можно создать промышленный вариант геолокатора для размещения его на самолете или орбитальной платформе.

Институты и фирмы многих стран ведут исследования и проектные работы по созданию разнообразных радиолокационных станций проникающего (подповерхностного) зондирования – РЛСПЗ. В большинстве случаев это приборы контактного типа со сверхширокополосным зондирующем сигналом [1,2]. Испытаны и самолётные варианты РЛСПЗ [3,4]. Особый же интерес представляют орбитальные РЛСПЗ, которые ещё предстоит разработать. С их помощью можно было бы, прежде всего, вести постоянное наблюдение за толщиной дрейфующих льдов Арктики и Антарктиды, изменением уровня залегания грунтовых вод в пустынных районах и т. д.

Тем не менее, отдельные фирмы предлагают только контактные РЛСПЗ [5]. Самолётные РЛСПЗ пока не вышли из стадии экспериментальных разработок. Данные же по орбитальным РЛСПЗ просто отсутствуют.

Первый (и последний) промышленный вариант радиолокационного измерителя толщины льдов, идея которого предложена и разработана в Рижском институте инженеров Гражданской авиации [2], получил название “Аквамарин” и использовался для разведки ледовой обстановки Северного Ледовитого океана. Он работал по принципу обычного импульсного радиовысотомера с индикатором типа А. Диапазон измерений толщины льда (без неоднозначности) составлял 0...2 м, а

максимальная высота полёта, позволяющая выполнять измерения (проверенная экспериментально) достигала 500 м. Среднеквадратичная погрешность измерений толщины дрейфующих морских льдов на этой высоте составила примерно 16 %. Эти данные позволяют оценить энергетический потенциал “Аквамарина”.

Воспользуемся уравнением дальности радиолокации в следующей форме

$$N_{\text{пrm}} = N_{\text{пro}} \frac{Gn^2}{4\pi(2H)^2} \quad (1)$$

где $N_{\text{пro}}$ - мощность зондирующего сигнала, $N_{\text{пrm}}$ - чувствительность приёмника, т. е. минимальная мощность отражённого сигнала, обеспечивающая работоспособность РЛСПЗ с заданной точностью; G - коэффициент направленного действия антенны в вертикальном направлении; n - средний коэффициент отражения; H - высота полёта. Выделим из этого уравнения энергетический потенциал:

$$P = \frac{N_{\text{пro}}}{N_{\text{пrm}}} = \frac{16\pi H^2}{Gn^2}, \quad (2)$$

или, в децибелах:

$$P_{\text{dB}} = 10 \lg(16\pi) + 20 \lg(H) - 20 \lg(n) - 10 \lg(G)$$

С достаточной для оценок точностью положим $n=1$ и $G=1$, тогда

$$P_{\text{dB}} = 20 \lg(H) + 17. \quad (3)$$

Для предельной высоты $H=500$ метров, потенциал РЛСПЗ “Аквамарин” составляет примерно 71 дБ. На высоте 10 км, при прочих равных условиях, потребуется - 97 дБ, а орбитальный вариант на высоте 600 км - уже почти 133 дБ. Это много и трудно осуществимо. По-видимому, именно по этой причине фирмы предлагают только контактные РЛСПЗ. Есть, правда, предложение Санкт-Петербургского НИИ Радиоаппаратуры на разработку (НИОКР) авиационного варианта РЛСПЗ, построенного “на принципах построения без несущей частоты” [7]. Таким образом, речь идёт о сверхширокополосном зондирующем сигнале, формируемом, судя по всему, методом ударного возбуждения антенны [6]. В этом случае зондирующий импульсный сигнал хорошо моделируется известным импульсом Максвелла

$$x(t) = \frac{t^2}{\tau^2} e^{-\frac{t^2}{\tau^2}} \cdot \sin(2\pi ft + \phi_0). \quad (4)$$

Понятно, спектр этого импульса сплошной и значимая его часть должна находиться в пределах окна прозрачности дрейфующих морских льдов - 25...200 МГц, что соответствует длительности импульса около 5 нс. Таков примерно и зондирующий сигнал

"Аквамарина". Его энергия "размазана" по всему диапазону прозрачности льда. Спектр отражённого сигнала также сплошной и занимает весь диапазон прозрачности. Получить высокую чувствительность приёмника прямого усиления для широкополосного сигнала – большая проблема. Следовательно, сложно обеспечить и достаточный потенциал для зондирования с больших высот. Выполним ориентировочный расчёт.

Мощность шума на выходе приёмника отражённых сигналов равна [8]:

$$N_0 = QkT_0K_0\Delta F_{\text{прем}}$$

или, в децибелах (по отношению к 1 Вт):

$$N_0[\text{dB}] = 10\lg Q + 10\lg k + 10\lg T_0 + 10\lg K_0 + 10\lg \Delta F_{\text{прем}}$$

где Q – средний коэффициент шума, $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}^\circ\text{К}$ - постоянная Больцмана, $T_0=290^\circ\text{K}$ - номинальная (стандартная) температура, K_0 - эффективный коэффициент усиления приёмника, $\Delta F_{\text{прем}}$ - эффективная полоса приёмника. Допустим, что коэффициент шума приёмника Q равен единице, то есть источником шума величиной kT_0 является только антенна, тогда

$$N_0[\text{dB}] = 10\lg K_0 + 10\lg \Delta F_{\text{прем}} - 204 \quad (5)$$

Для оценки погрешностей радиолокационных станций проникающего зондирования (РЛСПЗ) была разработана цифровая имитационная модель. Она позволила оценить минимальное отношение сигнал/шум $S=21 \text{ dB}$ для импульсной РЛСПЗ, достаточное для измерения толщины дрейфующих морских льдов с погрешностью, не превышающей 15%.

Определим теперь чувствительность приёмника в дБ как

$$10\lg P_{\text{прем}} = 10\lg N_0 + S + V,$$

где $V = 10\lg[(\Delta F_{\text{пред}} + 2F_{\text{допл}})/\Delta F_{\text{прем}}]$ – отношение эффективной ширины спектра зондирующего сигнала с учётом доплеровского сдвига к эффективной полосе приёмника в дБ, и запишем потенциал

$$P_{\text{дБ}} = 10\lg N_{\text{пред}} - 10\lg N_{\text{прем}} = 10\lg N_{\text{пред}} - 10\lg N_0 - S - V.$$

Подставляя сюда (5), получаем

$$\begin{aligned} P_{\text{дБ}} &= 10\lg N_{\text{пред}} - 10\lg N_{\text{прем}} = \\ &= 10\lg N_{\text{пред}} + 10\lg \Delta F_{\text{прем}} - 10\lg K_0 - S - V + 204, \end{aligned}$$

откуда

$$\frac{P_{\text{дБ}} + 10\lg \Delta F_{\text{прем}} + 10\lg K_0 + S + V - 204}{N_{\text{пред}}} = 10 \quad . \quad (6)$$

Оценим теперь необходимую мощность зондирующего сигнала, эффективная ширина спектра которого находится в интервале 25...200 МГц, полоса приёмника - в этом же диапазоне (т. е. $V=0$) с эффективным коэффициентом усиления 30 дБ, допустимое

отношение сигнал/шум - 21 дБ, потенциал – 71 дБ. Вот результаты:

Ширина спектра зондирующего сигнала	175 МГц
Полоса пропускания приёмника	175 МГц
Отношение полос Прд/Прм	0 дБ
Мощность передатчика на высоте 500 м:	0,43 дБ 1,105 Вт
10000 м:	26,43 дБ 440 Вт
600000 м:	62,01 дБ 1,6 МВт

Теперь совершенно очевидна причина, почему все предлагаемые фирмами РЛСПЗ – контактного типа: не хватает мощности передатчика. И хотя большинство РЛСПЗ импульсного типа, однако, скважность импульсов очень мала, всего 5...7, поэтому речь идёт не об импульсной, а о средней мощности. Одно дело – всего 1 Вт на высоте 500 м, и совсем иное дело 1600000 Вт фактически непрерывного излучения на орбите.

Индикаторами первых импульсных РЛСПЗ служили стробоскопические осциллографы, позволяющие сжимать спектр периодических сигналов. Недостатки их хорошо известны. Это, прежде всего, большой уровень вносимых шумов, особенно при флюктуирующих сигналах. Разработчики РЛСПЗ "Аквамарин" нашли способ избавиться от стробоскопического приёма. Зондирующий сигнал формировался ударным возбуждением широкополосной антенны – диполя. Приём отражённого сигнала выполнялся путём синхронного детектирования и представлял собой сумму семи синусоид

$$x(t) = \sum_{k=1}^7 A_k \cdot \sin\left(2\pi \frac{f_0 k}{m} t + \phi_k\right), \quad (7)$$

амплитуды A_k и фазы ϕ_k , которых устанавливали оператор. Нижняя частота в спектре $f_0 = 25 \text{ МГц}$. Здесь $m \approx 15 \cdot 10^5$ – коэффициент сжатия спектра отражённого сигнала. Полоса пропускания каждого из семи синхронных детекторов $\Delta F_{\text{од}} \approx 100 \text{ Гц}$, поэтому общая полоса принятого сигнала $\Delta F_{\text{прем}} \approx 700 \text{ Гц}$. Таким образом, из всего спектра отражённого сигнала шириной 175 Мгц с помощью гребенчатого фильтра вырезалось всего 700 Гц. Поскольку уменьшение мощности отражённого сигнала, очевидно, сопровождается таким же снижением и шума (напомним, что коэффициент шума принят равным единице), то это не приводит к изменению мощностей зондирующих сигналов:

<i>Ширина спектра зондирующего сигнала</i>	<i>175 МГц</i>
<i>Полоса пропускания приёмника</i>	<i>700 Гц</i>
<i>Отношение полос</i>	<i>54 дБ</i>
<i>ПрД/ПРМ</i>	
<i>Мощность передатчика на высоте 500 м:</i>	<i>0,43 дБ 1,105 Вт</i>
<i>10000 м:</i>	<i>26,43 дБ 440 Вт</i>
<i>600000 м:</i>	<i>62,01 дБ 1,6 МВт</i>

Не стоило бы приводить эти расчёты, которые способен выполнить студент, прослушавший курс основ радиолокации, если бы не одно обстоятельство. Дело в том, что даже умудрённые опытом разработчики "Аквамарина", завороженные, по-видимому, терминами "видеоимпульсное зондирование", "сверхширокополосный сигнал", не заметили, что, стараясь получить на экране изображение сверхширокополосных отражённых сигналов, потеряли по пути всю их "сверхширокополосность"! Но они были пионерами исследований РЛСПЗ. И это было четверть века назад. Но и сегодня не замечают того, что, излучая и принимая сверхширокополосные сигналы, реально используют лишь незначительную часть их спектров. Вот поэтому нет ни авиационных, ни орбитальных РЛСПЗ – практически только контактные.

Решение же проблемы до примитивности простое: спектр зондирующего сигнала и частотная характеристика приёмника должны быть согласованы. Классика радиотехники. И если сигнал принимается гребенчатым фильтром, реализованным, например, набором синхронных детекторов, равномерно распределённых по окну радиопрозрачности дрейфующих льдов, то и спектр амплитуд зондирующего сигнала должен быть таким же. Для "Аквамарина" оптимальным будет зондирующий сигнал вида [7] при $m=1$, суммарная ширина спектра которого практически равна нулю¹ и его нетрудно синтезировать из синусоид, что, кстати, и было предложено достаточно давно Л. А. Робинсоном [9]. Однако и Робинсон, почему-то зондирующий сигнал с гребенчатым спектром принимал широкополосным усилителем и проигрывал в энергетике точно так же, как и разработчики "Аквамарина".

Вот результаты согласования спектров при

прочих равных условиях:

<i>Ширина спектра зондирующего сигнала²</i>	<i>700 Гц</i>
<i>Полоса пропускания приёмника</i>	<i>700 Гц</i>
<i>Отношение полос</i>	<i>0 дБ</i>
<i>ПРД/ПРМ</i>	
<i>Мощность передатчика на высоте 500 м:</i>	<i>-53,55 дБ 4,42 мкВт</i>
<i>10000 м:</i>	<i>-27,55 дБ 1,76 мВт</i>
<i>600000 м:</i>	<i>8,03 дБ 6,36 Вт</i>

Вот такой РЛСПЗ можно установить и на спутнике. Однако, приверженцы "сверхширокополосных" методов зондирования могут не согласиться с таким решением проблемы, поскольку, на первый взгляд, сигнал, с шириной спектра всего в 700 Гц, не может быть сверхширокополосным (не раз встречался с таким возражением). Тут уместно напомнить, что сигнал считается узкополосным, если

$$q = \frac{\Delta f}{f_0} = 2 \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} \ll 1, \quad (8)$$

в противном же случае – широкополосным. Предельное значение "сверхширокополосности" наступает при $f_{\min}=0$, когда $q=2$. Если все частоты в (8) поделить на m , то значение q не изменится. Не изменится и форма сигнала. Изменится только в m раз масштаб времени. Но сигнал останется сверхширокополосным.

Существует ещё одна проблема орбитальных РЛСПЗ, которую нельзя оставить без внимания – это влияние ионосферы. Из самых общих соображений можно ожидать, что влияние это будет незначительным. В самом деле, допустим, что РЛСПЗ измеряет толщину льда по времени запаздывания сигнала, отражённого от нижней поверхности льда, относительно сигнала, отражённого верхней поверхностью льда. Если не учитывать дисперсионных свойств, то ионосфера повлияет на оба этих сигнала одинаково и их взаимное положение во времени не изменится.

Оценка влияния ионосферы на точность измерения толщины льдов была выполнена тоже на имитационной модели. Для этого использовались реальные отражённые сигналы, записанные при полётах над дрейфующими льдами Арктики. Эти сигналы "пропускались"

¹ Ширина спектра определяется уровнем собственных шумов передатчика и вызываемых ими флюктуаций частоты.

² Предполагается, что расширение спектра сигнала за счёт эффекта Доплера находится в пределах полосы пропускания приёмника.

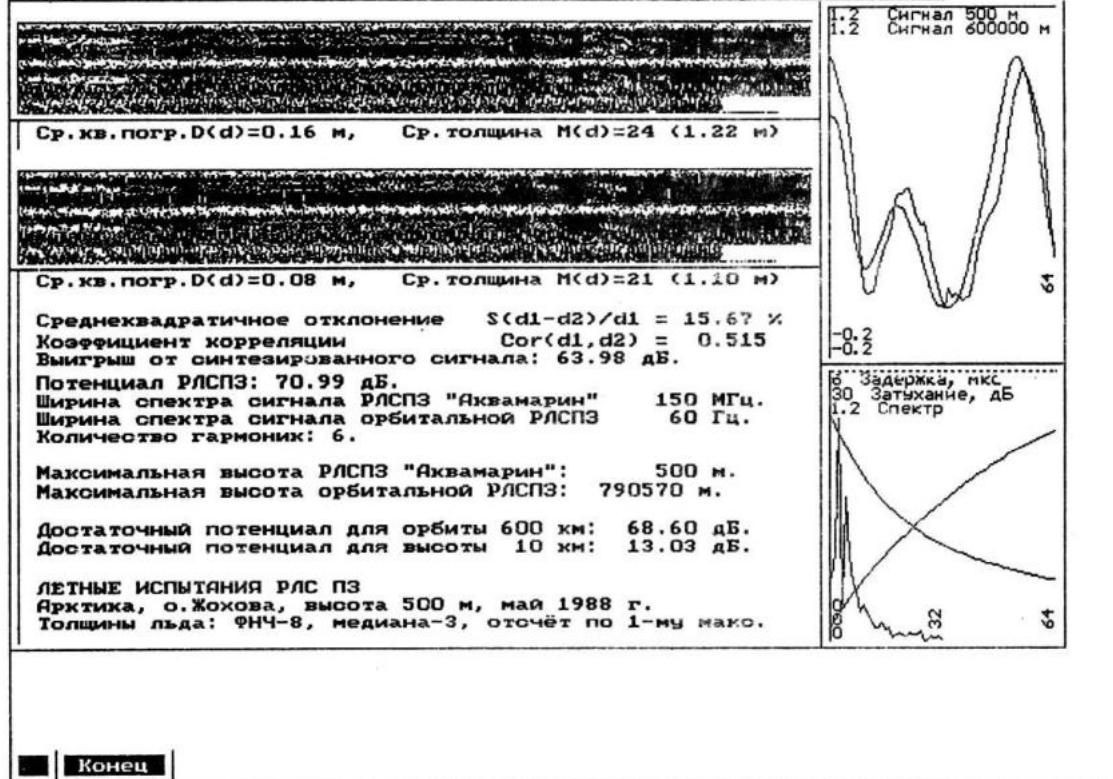


Рис.1. Результаты моделирования влияния ионосферы на точность измерения толщины дрейфующих морских льдов.

через модель, параметры которой взяты из книги [8]. Далее оценивались среднеквадратичная и систематическая погрешности, вносимые ионосферой с высоты орбиты 600 км относительно величин, измеренных при полёте на высоте 500 м. Полученные результаты показаны на рис. 1.

Трудно заметить разницу между волновыми полями сигналов на высотах 500 м и 600000 м. Отличие становится заметным лишь при сравнении самих отраженных сигналов (они показаны в правом верхнем окне рис.1). Принятый орбитальным РЛСПЗ сигнал дважды прошёл через ионосферу. Он отличается от своего аналога с высоты 500 м более пологими очертаниями и несколько сдвинутыми положениями максимумов. Это вызвано тем, что ионосфера обладает дисперсионными свойствами, поэтому при распространении сигналов через ионосферу время запаздывания составляющих спектра оказывается различным, зависящем от ширины спектра, частоты и интегральной плотности электронов вдоль траектории распространения сигнала. Вносимые ионосферой запаздывание и затухание как функции частоты показаны в правом нижнем окне рис.1. Там же показан и спектр амплитуд зондирующего сигнала,

формируемый методом ударного возбуждения антенны.

Искажения сигнала приводят к тому, что отсчёты толщины льда, полученные на высоте 500 м и 600 км, несколько отличаются. Среднее значение толщины льда на расстоянии 269 м вдоль линии полёта с высоты 500 м оказалось равной 1,28 м, а с высоты 600 км – 1,1 м. Среднеквадратичное отклонение между этими рядами измерений составило около 16%. Но вот что интересно: оценка погрешности измерений методом соседних отсчётов [10] на высоте 500 м составляет 14,8 %, а на высоте 600000 м – только 7,3 %! Выходит, ионосфера уменьшает погрешность измерений? Как ни странно, но это, в данном случае, именно так. Дело в том, что ионосфера играет роль сглаживающего фильтра, который, при коррелированных отсчётах толщин льда, естественно улучшает точность измерений. Минимальную величину интервала корреляции можно оценить как размер отражающей сигнал площадки, в пределах которой толщина льда усредняется. Размер этой площадки при зеркальном отражении (для измерения толщины льда используется именно зеркальная компонента отраженного сигнала) равен примерно величине первой зоны Френеля:

$$R = 3\sqrt{\lambda H}, \quad (9)$$

где λ - длина волны. На высоте 500 м $R=116$ м, а на 600 км уже 4025 м. Таким образом, на расстоянии 269 м укладывается всего лишь два интервала корреляции, т. е. отражённые сигналы сильно коррелированы вдоль трассы полёта. Так же коррелированы и полученные на их основе отсчёты толщины льда.

Ширина полосы приёмника, достаточная для приёма отражённого сигнала, определяется доплеровским сдвигом частоты отражённого сигнала. Зная высоту полёта и диаметр отражающей площадки (9), её нетрудно оценить:

$$\Delta F_{ppm} = \frac{4v}{C} f_0 \sum_{i=1}^{I=I} i \cdot \sin \left[\arctg \left(\frac{3}{2} \sqrt{\frac{C}{f_0 i H}} \right) \right],$$

где v – горизонтальная скорость полёта, $C = 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость света, I – количество синусоид в спектре зондирующего сигнала. Используя прежние исходные данные, для скорости полёта 360 км/час на высоте 500 м получаем достаточную полосу приёмника 108 Гц. Для орбитального варианта при скорости 8000 м/с и высоте 600 км – 250 Гц. Кстати, уменьшая полосу приёмника ниже этих границ, можно существенно уменьшить размеры отражающей площадки в направлении полёта, то есть улучшить разрешающую способность. Однако, это уже другая тема.

Полученные результаты позволяют сделать два основных вывода:

- Оптимальный для проникающего зондирования сигнал имеет гребенчатый спектр.
- Возможно создание авиационных и орбитальных радиолокационных станций проникающего зондирования в метровом диапазоне волн.

Литература

1. Е. Покровский, В. Щербак. Сверхширокополосная импульсная электродинамика и возможности её применения. – Санкт-Петербург: “Компания “Аском”, 1997, 37 с.
2. М.И. Финкельштейн, В.И. Карпухин, В.А. Кутев, В.Н. Метёлкин Подповерхностная радиолокация.-М.: Радио и связь, 1994, 216 с.
3. В.В. Богородский, А.Г. Оганесян. Проникающая радиолокация морских льдов с цифровой обработкой информации.-С.Петербург: Гидрометеоиздат, 1987, 342 с.
4. А.И. Калмыков, И.М. Фукс. О контрастах радиолокационных отражений при подповерхностном дистанционном зондировании. Доповіді національної академії наук України, № 2, 1995, с. 65-68.
5. Научно-производственная фирма “Радарные системы”, <http://www.radsys.lv>
6. Cook J. C. Proposed monocycle-pulse VHP radar for airborne ice and snow measurement. – Trans. Amer. IEE, pt. 1. Commun. and Electronic, 1960, vol. 79, p. 588-594.
7. С.-Петербургский НИИ Радиоаппаратуры, <http://www.vimi.ru>
8. Современная радиолокация. Пер. с англ. под ред. Кобзарева Ю. Б. Изд-во “Советское радио”, 1969, 704 с.
9. Робинсон Л. А., Уэйр У. Б., Юнг Г. Л. Установление местоположения и распознавание неоднородностей в диэлектрических средах с помощью синтезируемых ВЧ-импульсов. – Труды института инженеров электротехники и радиоэлектроники, США, 1974, т. 62, с. 42-52.
10. В.В. Богородский, А.Г. Оганесян. О погрешности методики лётных испытаний радиолокационных измерителей толщины льда. – ЖТФ, т. 55, вып. 9, 1985, с. 1159-1162.