

Особенности СШП радиолокации объектов, находящихся в толще воды или льда

К.В. Бровков, Г.Л. Черниховская

Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, ГСП 17А

г. Таганрог 28, ул. Энгельса, 1, e-mail glchernih@tgn.sfedu.ru

Рассматривается проблема выбора рабочих частот радаров, предназначенных для измерения с борта летательных аппаратов глубины водоемов, толщины снежного покрова и льда, обнаружения затопленных малоразмерных объектов и оценки их координат.

Selection of radar operating frequency used for measurement of the water basing depth, thicknesses of snow cover or ice, detection of the bottom small-size objects and evaluation of their coordinates from aircraft board is reviewed in the article.

Одной из областей применения СШП сигналов является измерения с борта летательных аппаратов глубины водоемов, толщины снежного покрова и льда, обнаружения в их толще малоразмерных объектов и оценки их координат.

СШП сигналы имеют сочетание спектральных характеристик, которые обеспечивают одновременно достаточную глубину измерения (для увеличения диапазона измерения глубины водоемов и толщины снежного покрова необходимо применять зондирующие сигналы, спектр которых лежит в низкочастотной области) и требуемую разрешающую способность (для получения необходимой точности измерения необходимо, чтобы зондирующие сигналы имели большую ширину спектра).

Целью работы является исследование свойств таких сред, как вода, лед (пресный, морской) и снег и их влияние на форму и спектральные составляющие зондирующего сигнала, что в дальнейшем позволит разработать методы обработки эхо-сигналов с целью получения требуемой информации.

Наибольший интерес представляют электрофизические параметры среды. Один из них - комплексная диэлектрическая проницаемость:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'', \quad (1)$$

где ε^* – комплексная диэлектрическая проницаемость среды,

ε' – действительная составляющая диэлектрической проницаемости среды,

ε'' – мнимая составляющая диэлектрической проницаемости среды.

К электрофизическим параметрам среды так же относятся коэффициент преломления n и показатель поглощения γ и погонное затухания β :

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon' + \varepsilon''}}{2}}, \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{-\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon' + \varepsilon''}}{2}}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2\pi|\gamma|f}{C_0}, \quad (4)$$

Эти формулы справедливы для всех сред комплексной диэлектрической проницаемостью.

Действительная ε' и мнимая ε'' составляющие диэлектрической проницаемости описываются формулами Дебая [1].

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_{\equiv} - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2 \tau_{\theta}^2}, \quad (4)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\omega \tau_{\theta} (\varepsilon_{\equiv} - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2 \tau_{\theta}^2}, \quad (5)$$

где τ_{θ} – время релаксации,

ε_{\equiv} – диэлектрическая проницаемость при $\omega \rightarrow 0$ (статическая проницаемость),

ε_{∞} – диэлектрическая проницаемость при $\omega \rightarrow \infty$ (оптическая проницаемость).

Данные формулы справедливы для пресной воды и пресного льда. Параметры τ_{θ} , ε_{\equiv} , ε_{∞} зависят от температуры и их значения определяются полуэмпирическим путем. Аппроксимирующие выражения для нахождения этих параметров различны для различных сред и представлены в [1].

Для определения диэлектрической проницаемости снега целесообразно использовать формулы для смеси двух компонентов лед и вода [3]. Наиболее подходящими являются формула Лооунга для смеси произвольно сформированных разнородных частиц (6) и формула Polder and van Santen (7).

$$\varepsilon_{\Sigma}^{1/3} = v_1 \varepsilon_1^{1/3} + v_2 \varepsilon_2^{1/3}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_2 \left[1 + \frac{v_1}{3} \left(2 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right) \right], \quad (7)$$

где ε_{Σ} - диэлектрическая проницаемость смеси двух вещей,

ε_1 - диэлектрическая проницаемость 1-го вещества,

v_1 - объемная доля 1-го вещества,

ε_2 - диэлектрическая проницаемость 2-го вещества,

v_2 - объемная доля 2-го вещества.

На рис. 1, 2 и 3 приведены зависимости электрофизических параметров от частоты для различных сред.

Морской лед является сложным диэлектриком, состоящим из трех компонентов: кристаллов пресного льда, рассола и воды. В [2] получены эмпирические формулы для расчета вещественной и мнимой составляющих комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon' = 0.53\nu + 3.17, \quad (8)$$

$$\varepsilon'' = \sqrt{\frac{100}{f}} (0.27\nu + 0.17 \sqrt{\frac{100}{f}}), \quad (9)$$

где ν - объем рассола во льду, определяемый по формуле Франкенштейна-Гарнера [2]:

$$\nu = \frac{S}{1000} \left(\frac{-49.185}{T} + 0.53 \right), \quad (10)$$

Данные формулы справедливы для диапазона частот 10-400 МГц. На частотах выше 400 МГц исследования морского льда не проводились.

Подставив (9), (10) в (2), (3) и (4) получим выражения для расчета электрофизических параметров для морского льда.

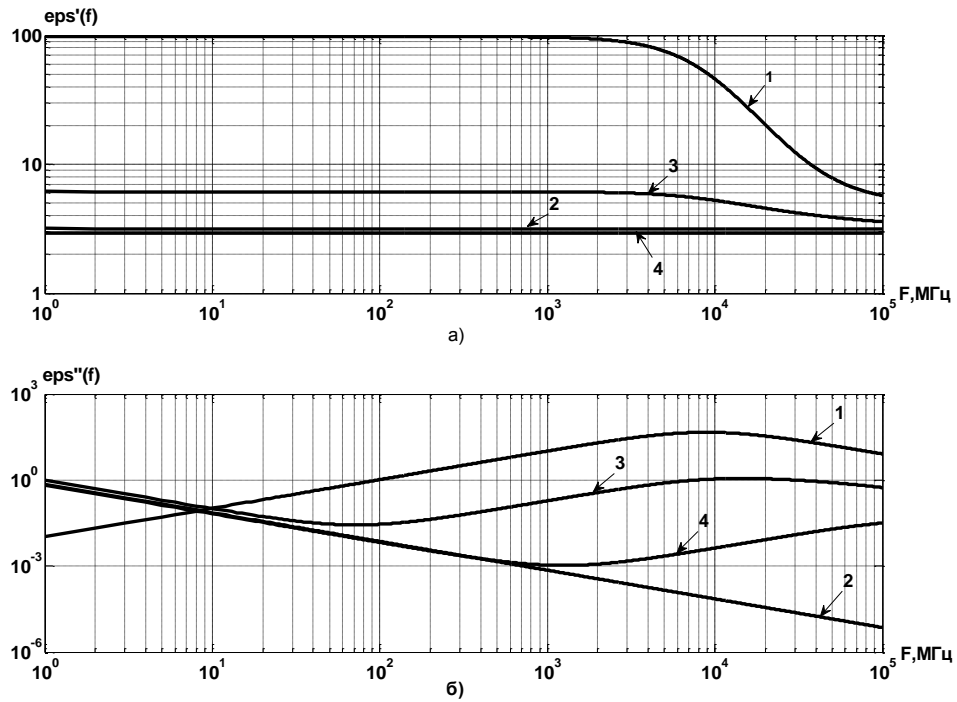


Рис. 1. Зависимость вещественной (а) и мнимой (б) составляющих диэлектрической проницаемости от частоты для пресной воды (1), пресного льда (2), снега по формуле Луюенга (3) и снега по формуле Polder and van Santen (4)

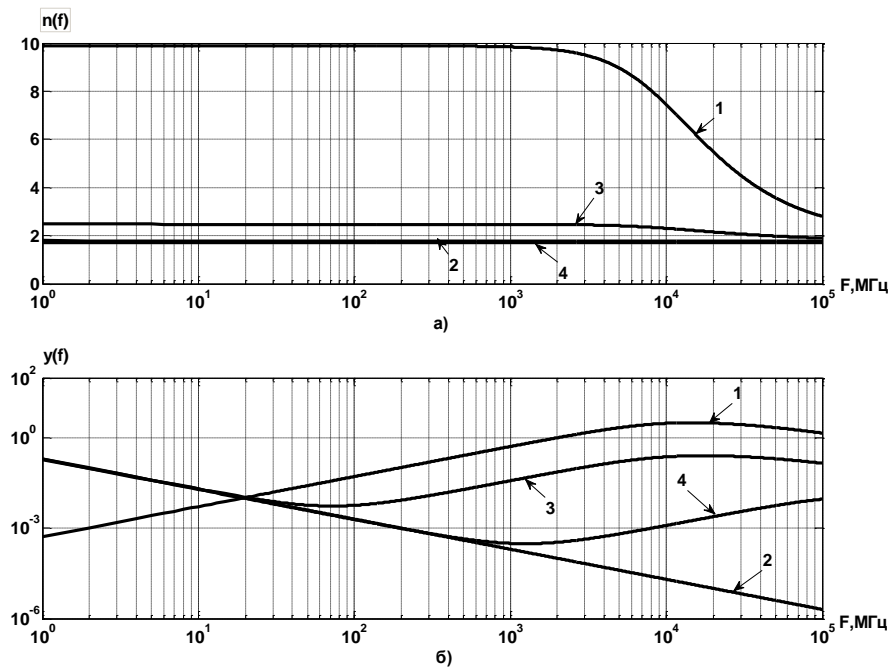


Рис. 2. Зависимость коэффициента преломления (а) и показателя поглощения (б) от частоты для пресной воды (1), пресного льда (2), снега по формуле Леоуенга (3), снега по формуле Polder and van Santen (4)

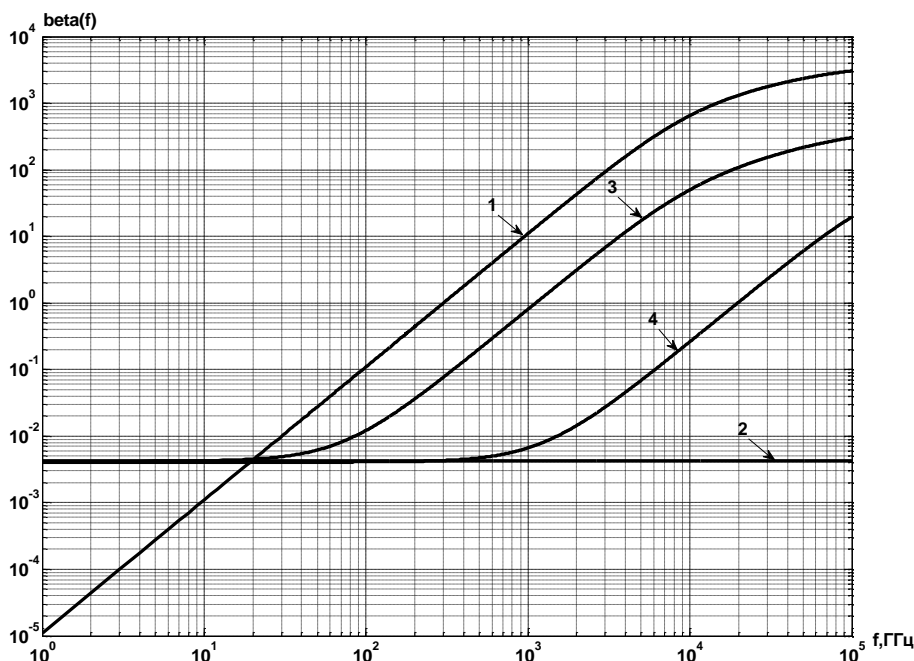


Рис. 3. Зависимость погонного затухания от частоты для пресной воды (1), пресного льда (2), снега по формуле Леоуенга (3), снега по формуле Polder and van Santen (4)

Рассчитанные электрофизические параметры позволяют оценить влияние их на спектры СШП сигналов и провести моделирование распространяющихся в них сигналов.

В качестве моделей СШП излучаемого сигнала выбраны короткие импульсы – один период синусоиды и моноцикл Гаусса, описываемые соответственно выражениями

$$u(t) = U_m \sin \omega_0 t \left[1(t + \frac{T_c}{2}) - 1(t - \frac{T_c}{2}) \right], \quad (11)$$

$$u(t) = \frac{\sqrt{e} U_m t}{t_m} e^{-\frac{t^2}{2t_m^2}}, \quad (12)$$

где $T_c = \frac{1}{f_0}$,

$$t_m = \frac{1}{\omega_0},$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0,$$

f_0 – центральная частота зондирующего сигнала.

где f_0 , ω_0 - частота и циклическая частота излучаемого сигнала соответственно.

При распространении СШП сигналов в средах с комплексной диэлектрической проницаемостью вследствие частотно-зависимых коэффициента преломления n (скорости распространения электромагнитных волн) и коэффициента поглощения γ

форма и скорость распространения сигналов оказываются зависимыми от пройденного ими расстояния в воде.

Влияние таких сред на спектры распространяющихся в них сигналов можно оценить с помощью передаточной функции четырехполюсника

$$\hat{E} = \frac{I}{r} e^{-\frac{\gamma(\omega)|\omega|r}{C_0} - j\frac{n\omega \cdot r}{C_0}}, \quad (13)$$

где r – пройденное сигналом расстояние в среде.

На рис. 4 представлены модули нормированных спектров сигналов, рассчитанных при различных значениях расстояния r , пройденного сигналом при распространении в средах – пресная вода, пресный лед, морской лед и снег.

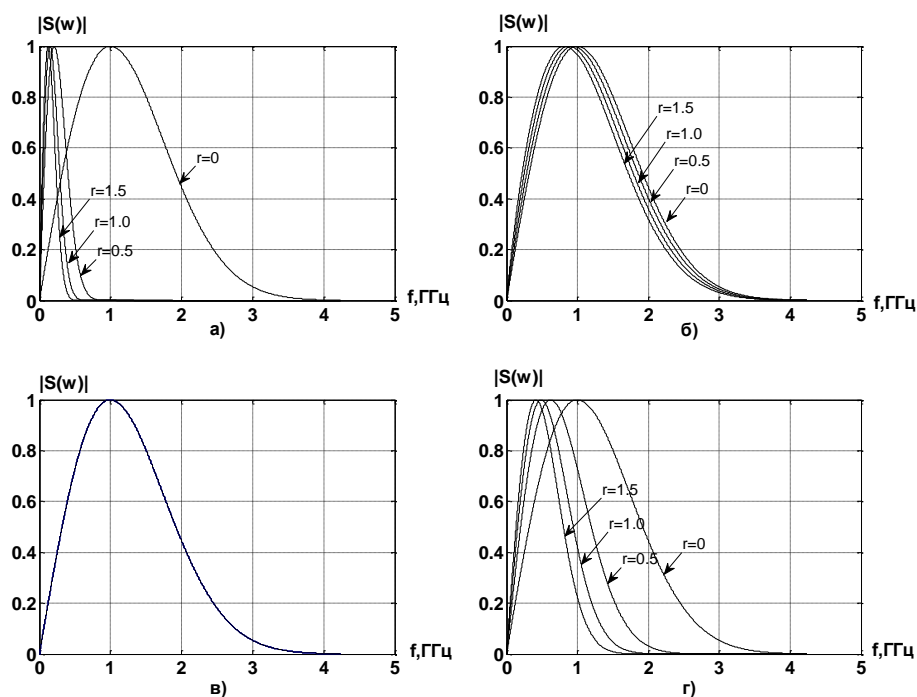


Рис. 4. Модуль спектра эхосигнала при различных значениях r после прохождения через среду пресная вода (а), морской лед (б), пресный лед (в), снег (г)

Как видно из рис. 4, спектр зондирующего сигнала при прохождении диспергирующих сред вода, снег, морской лед смещается в область нижних частот, что делает проблематичным применение согласованной фильтрации для обнаружения объектов, находящихся в этой среде. Такой метод обработки эхосигналов возможен только в случае обнаружения объектов в толще пресного льда.

Полученные результаты позволяют разработать методы обнаружения объектов в толще воды, льда и снега с учетом особенностей распространения зондирующего сигнала в среде и влияния среды на форму и частотные характеристики сигнала.

Литература

1. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн. – М.: ЛЕНАНД, 2009. – 496 с.
2. Лебедев Г.А., Сухоруков К.К. Распространение электромагнитных и акустических волн в морском льду. – СПб.: Гидрометеиздат, 2001. – 82 с.

3. Узлов В.А., Шишков Г.И., Щербаков В.В. Основные физические параметры снежного покрова // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 2014, №1, с. 119-129.