

Эффекты гирации микроволнового излучения в ледяных покровах

Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, А.О. Орлов, С.В. Цыренжапов

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
672000, Чита, ул. Бутина, 26
e-mail: lgc255@mail.ru*

Выполнены эксперименты по измерению эффектов гирации, проходящего через пресный ледяной покров излучения на частотах 13-14 ГГц. Изучены поляризационные диаграммы по измерениям мощности на 12 линейных поляризациях и расстояниях между передатчиком и двумя приемниками 30 и 60 метров. Установлено искажение эллипса поляризации, которое можно объяснить проявлением нелинейности среды из-за ее текучести при температурных механических напряжениях.

Ключевые слова: ледяной покров, микроволновое излучение, поляризационные диаграммы, нелинейные свойства льда.

1. Введение

При распространении в ледяных телах линейно поляризованного излучения наблюдается вращение плоскости поляризации и возникновение эллиптической поляризации. Эти эффекты обычно связывают с возникновением двойного лучепреломления из-за механических напряжений и наличия преимущественной, в некотором направлении, ориентации оптических осей кристаллов льда [1]. Вместе с тем, в недавних работах [2,3] в пресных ледяных покровах были обнаружены добавочные электромагнитные волны, аномалии поляризационного состояния и коэффициентов отражения от границ сред. Добавочные волны могут существенно усложнить картину поляризационного состояния излучения. В настоящей статье приводятся результаты новых экспериментов по изучению причин появления добавочных волн в пресных ледяных покровах и причин искажения поляризационных диаграмм (и эллипса поляризации).

2. Особенности микроволновых свойств ледяных покровов

Микроволновые свойства льда хорошо изучены на лабораторных образцах [4,5]. Вместе с тем, в природных условиях электромагнитные свойства ледяных объектов изучены недостаточно из-за их высокой изменчивости. Наличие солевых и других включений, определенная ориентация кристаллов льда, процессы таяния и перемерзания приводят к трудности восстановления параметров исследуемых объектов. Эти причины, как обычно считается, приводят к ряду трудно объяснимых эффектов при радиозондировании льда [1].

В работах [2,3] был исследован особый эффект – появление добавочных электромагнитных волн, которые имеют ту же поляризацию, что и исходная волна, но несколько отличное значение волнового вектора (по направлению и модулю). Интерференция двух волн приводит к усилению или ослаблению результирующей волны в пространстве. В работе [6] также были обнаружены отклонения расчетных от измеренных фаз коэффициентов отражения волны от границы воздух-лед вблизи температуры таяния льда.

Причины возникновения добавочной волны связываются с существованием пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости, когда компоненты тензора диэлектрической проницаемости зависят от волнового вектора. Примером такой среды является среда с периодическим изменением диэлектрической проницаемости с шагом, близким к длине волны излучения. Однако в ледяном покрове на протяженных участках вряд ли образуется строго периодическая решетка кристаллов или их дефектов. Скорее всего, могут проявиться параметрические эффекты или какие-то особые свойства объекта.

В работе [7] рассмотрен вопрос распространения волн в тонком слое, заключенном между двумя полубесконечными средами. Если излучатель расположен внутри тонкого слоя (рассмотрен слой толщиной больше длины волны излучения), то результирующее поле можно определить на основе геометрического рассмотрения парциальных волн, отраженных от верхней и нижней границ плоских сред. Отраженные волны можно представить, как создаваемые бесконечной решеткой зеркальных источников, с соответствующими фазами, относительно первичного излучателя. Как показано в [7], такие источники создают волны, которые эквивалентны двум волнам, распространяющимся в тонком слое, с различными модулями волновых векторов. Таким образом, наблюдаемые в [2,3] добавочные волны можно было бы объяснить интерференцией волн бесконечного числа мнимых источников, расположенных в плоскости излучателя, перпендикулярной границам сред. При этом появление эллиптической поляризации и вращение эллипса поляризации можно было бы объяснить механическими напряжениями в среде с определенной их ориентацией в объекте.

Однако в [3] были приведены результаты измерений проходящего через ледяной покров излучения на 12 линейных поляризациях, которые показали аномальное искажение поляризационных диаграмм. Искажения возникали лишь в некоторые моменты времени (наблюдения проводились непрерывно, в течение нескольких недель). Примечательно и то, что искажения возникали на определенных частотах в интервале 13-14 ГГц, где проводились измерения, причем даже при сдвиге на 0,1 ГГц, т.е. при изменении частоты менее 1 %.

На рис. 1 приведены характерные результаты измерений поляризационных диаграмм на нескольких частотах. Измерения на каждой частоте проводились с интервалом в несколько минут. Приемник и передатчик погружали в ледяной покров в среднюю часть по высоте. Такие искажения нельзя объяснить интерференцией переотраженных волн, т.к. наложение волн с одинаковой частотой дают синусоидальные компоненты по двум ортогональным направлениям. На рис.1 использован естественный базис – по горизонтальной оси откладывали значение мощности на горизонтальной поляризации (для которой вектор электрического поля волн находится в плоскости, параллельной границам раздела сред) и по вертикальной оси – на вертикальной поляризации.

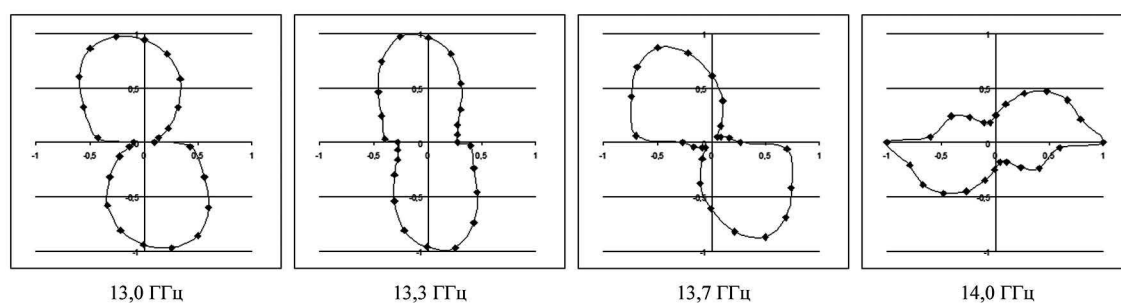


Рис. 1. Поляризационные диаграммы на четырех частотах. Измерения 24 марта 2007. Ледяной покров пресного оз. Арахлей в Забайкальском крае

Следует отметить, что для описания плоской электромагнитной волны достаточно задать два базисных состояния, т.е. две ортогональные поляризации, например, два направления линейной поляризации и определять амплитуду волн и сдвиг фаз между ними. Поэтому использование анализатора в приемнике в виде измерителя на 12-ти линейных поляризациях представляется избыточным. Выполненные нами измерения показывают, что в изучаемом объекте наблюдаются нелинейные преобразования сигнала, в результате, для его описания на выходе слоя, необходимо большее число базисных состояний, чем два.

3. Измерения поляризационного состояния излучения

Для установления причин аномалий поляризационного состояния сигнала в ледяном покрове выполнены эксперименты по измерениям с двумя разнесенными приемниками на частотах 13-14 ГГц. Оба приемника имели анализаторы на входе на 12 линейных поляризациях, переключаемые последовательно. Использовали фарадеевские переключатели поляризации. Схема эксперимента представлена на рис. 2.

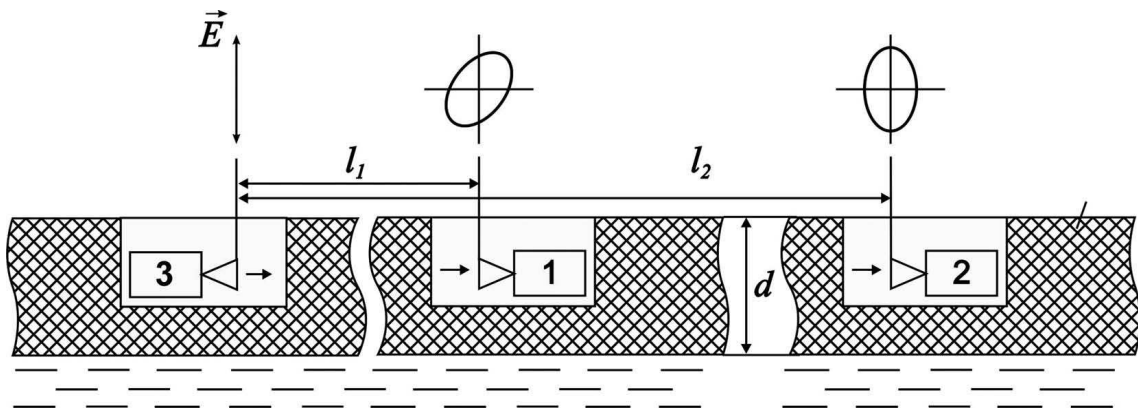


Рис. 2. Схема эксперимента по изучению эффектов гирации с использованием двух приемников излучения – 1, 2. 3 – передатчик, d – толщина льда

На рис. 3 приведены пояснения по измерениям поляризационной диаграммы принимаемого сигнала. Монохроматический сигнал передатчика на линейной поляризации (использовалась вертикальная поляризация) после прохождения ледяного покрова поступал на поляризатор, который последовательно переключали с шагом 15 градусов. Поляризационная диаграмма представляет собой зависимость регистрируемой мощности от угла поляризации в полярных координатах. Для чисто линейной поляризации принимаемого излучения на входе приемника получаем поляризационную диаграмму в виде «восьмерки». Для круговой поляризации диаграмма имеет вид окружности, а для случая эллиптической поляризации диаграмма имеет промежуточный вид между «восьмеркой» и окружностью. В случае вращения эллипса поляризации «восьмерка» также вращается (их главные оси совпадают).

Эксперименты продолжались в течение нескольких недель, когда измерялись параметры излучения на одной частоте $\sim 13,7$ ГГц, в отдельные периоды проводилось частотное сканирование с шагом 0,05 ГГц.

Приемники устанавливались на одной линии с передатчиком на расстояниях 30 м (l_1) и 60 м (l_2). Предполагалось, что сравнение углов поворота осей поляризационных диа-

грамм позволит сделать определенные выводы об особенностях электромагнитных свойств льда. Эксперименты проводились в конце марта 2009 г. на льду оз. Арахлей, расположенного на Яблоновом хребте.

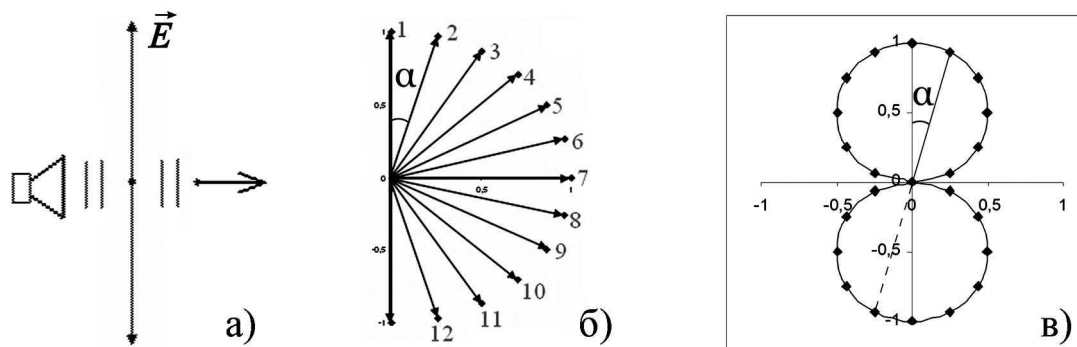


Рис. 3. Измерение поляризационной диаграммы, проходящего через лед излучения:
 а – состояние излучаемого сигнала на вертикальной поляризации,
 б – поляризатор приемника с 12 переключаемыми поляризациями,
 в – поляризационная диаграмма, построенная по измерениям мощности сигнала,
 и нормированная на единицу

Характерной особенностью диаграмм является их достаточно хорошее совпадение с «восьмеркой», что говорит о прохождении сигнала с линейной поляризацией. При этом на некоторых частотах наблюдали вращение плоскости поляризации на различные углы.

В экспериментах 2009 г. также обнаружены искажения диаграмм, особенно в конце зимнего сезона, когда температура льда по всей высоте покрова приближается к 0°C . Однако значительное количество жидких включений во льду еще отсутствовало, о чем говорит прохождение зондирующего излучения без заметного падения средней мощности принимаемого сигнала.

Результаты измерений при перестройке по частоте представлены на рис. 4а,б. На рисунках приведены выборки поляризационных диаграмм для двух приемников с шагом на частоте 0,2 ГГц.

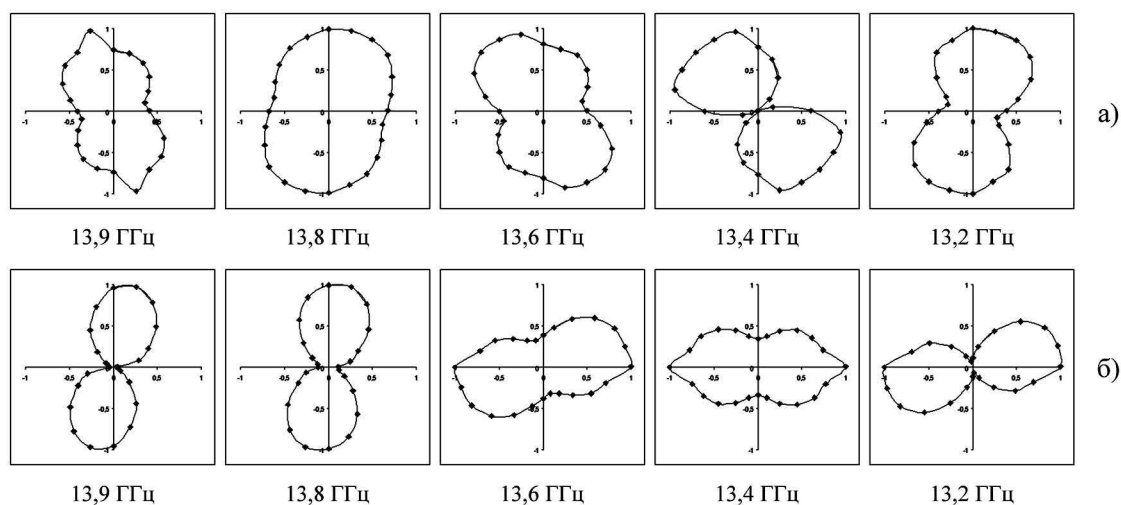


Рис. 4. а) – Поляризационная диаграмма при измерениях на дистанции 30 м, б) – то же для дистанции 60 м

Для первого приемника заметны искажения диаграмм и имеет место вращение главных осей на некоторый угол, причем как против часовой стрелки, так и по часовой стрелке. Для сигналов второго приемника также характерно искажение диаграмм. Их наиболее заметная особенность – деформированные «восьмерки» повернуты на угол 90° и вытянуты в горизонтальной плоскости.

Отметим, что искажения диаграмм возникали в определенные временные интервалы. В зимний период, когда температура верхней границы льда находилась в интервале $-10^\circ\text{C} - -30^\circ\text{C}$ искажения не наблюдали.

Это указывает на особое состояние сигнала на горизонтальной поляризации, при которой излучение на входе приемника не является строго монохроматическим. Учитывая, что приемники излучения функционируют в полосе частот ~ 1 ГГц, т.е. в полосе частот $\sim 10\%$ от центральной, можно предположить появление дополнительных спектральных компонент именно в этой полосе частот.

Каков же физический механизм нелинейности льда вблизи его точки таяния? Вытягивание диаграмм вдоль горизонтальной плоскости наблюдали и при измерениях в том же частотном интервале для той же области ледяного покрова озера в измерениях 2007 г. Полученные результаты позволили высказать предположение об особой роли упорядочения кристаллов в ледяном покрове. При непосредственном отборе кернов льда было установлено преимущественное расположение оптической оси кристаллов перпендикулярно поверхности раздела сред. Это означает, что базисные плоскости кристаллов располагались параллельно поверхностям.

В работе [8] были выполнены измерения распространения излучения через образец льда, полученный замораживанием воды в стальной трубе, на частоте 5,5 ГГц. Идея эксперимента заключалась в изучении затухания излучения при течении льда. Известно, что кристаллы льда способны течь при любых напряжениях и температурах. Если механические напряжения превышают предел текучести, то наблюдается быстрое деформирование образцов и уменьшение внутренних напряжений. Деформация кристаллов наблюдается вдоль их базисных плоскостей, в этих направлениях они ослаблены.

Возникло предположение о возможности некоторого усиления внешнего сигнала при текучести (и разрыве связей) по базисным плоскостям. Поскольку процесс носит дискретный характер, течение чередуется с замерзанием, то энергия, выделяющаяся при замерзании структурированных слоев, может трансформироваться в электромагнитное излучение. Это излучение носит прерывистый характер, т.е. амплитудно модулировано, следовательно, результирующий сигнал может занимать большой частотный интервал.

В эксперименте [8] течение образцов достигалось за счет изменения температур при нагревании льда и трубы и разницы их температурных коэффициентов линейного расширения. Было установлено «просветление» льда, т.е. уменьшение электромагнитных потерь образца в моменты его течения.

В натуральных экспериментах на ледяном покрове наблюдали характерные аномалии сигнала для горизонтальной поляризации, для которой электрическое поле волн располагалось в базисных плоскостях кристаллов льда. Накануне таяния лед был подвержен течению в максимальной степени из-за понижения предела текучести. Данная особенность, возможно, приводит к существенным изменениям поляризационного состояния микроволнового излучения и другим аномалиям электромагнитных свойств льда.

Заключение

Выполненные эксперименты по измерениям изменения поляризационных диаграмм с использованием двух многополяризационных приемников выявили нелинейные свойства льда. Нелинейность проявляется в сильном искажении поляризационных диаграмм, и, следовательно, эллипсов поляризации. Эти искажения носили выраженный частотный характер, определяемый свойствами среды. Экспериментальные результаты позволяют предположить, что нелинейность связана с особым состоянием льда, когда он под действием механических напряжений при изменении температуры подвергается течению. В наибольшей степени данный эффект проявляется в ледяных телах с определенной преимущественной ориентацией кристаллографических осей и вблизи температуры фазового перехода, когда происходит понижение предела текучести кристаллов. Искажения проявляются из-за изменения амплитуд волн, у которых плоскость поляризации (плоскость колебания электрического поля) совпадает с базисными плоскостями кристаллов, вдоль которых преимущественно происходит сдвиг слоев льда.

Эффектом течения слоев льда и существенным изменением электромагнитных свойств среды можно объяснить многие аномалии ледяных структур, обнаруженные, например, при радиозондировании ледников [1].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 10-02-00088- а).

Литература

1. Богородский В.В., Бентли Ч., Гудмансен П. Радиогляциология. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 312 с.
2. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Цыбикжапов А.Ц., Цыренжапов С.В. Обнаружение «новых» волн Гинзбурга-Пекара во льду в микроволновом диапазоне // Журнал технической физики. 2006. Т.76. №5. С. 94-97.
3. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Цыренжапов С.В., Орлов А.О. Особенности электромагнитных свойств льда и радиозондирование объектов криосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сб. научных статей. М.: ООО «Азбука-2000». 2008. Вып. 6. Т. 1. С. 322-326.
4. Matzler C. Microwave dielectric properties of ice. Chapter 5. In “Thermal Microwave Radiation: Applications for Remote Sensing”. EDS. C.Matzler, P.W.Rosenkranz, A. Battaglia and J.P.Wigner. IET Electromagnetic Wave Series. V. 52. Inst. of Eng. and Tech., Stevenage, U.K. 2006.
5. Fujita S., Matsuoka T., Ishida T., Matsuoka K., Mae S. A summary of the complex dielectric permittivity of ice in the megahertz range and its applications for radar sounding of polar ice sheets. In “Physics of Ice Cover Core Records”. Eds. T. Hondoh. Hokkaido Univ. Press, Sapporo, Japan. 2000. P. 185 – 212.
6. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д. Причины изменения фазы коэффициента отражения от границы воздух-лед в микроволновом диапазоне // Известия вузов. Радиофизика. – 2009. – Т. LII. – №3. – с. 260 – 266.
7. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во Академии наук СССР. 1957. 502 с.
8. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д. «Просветление» льда в микроволновом диапазоне при текучести // Письма в журнал технической физики. 2009. Т.35. Вып. 22. С. 46-54.

Effects of gyration at microwaves in ice cover

G.S. Bordonskiy, A.A. Gurulev, A.O. Orlov, S.V. Tsyrendzapov

Institute of Natural Resources, Ecology and Criology SB RAS

The measurement of gyration for radiation transfer at 13-14 GHz through fresh-water ice cover were carried out. Polarization diagrams for radiation power at 12 linear polarization were studied for distance 30 and 60 meters between transmitter and two receivers. Distortions of polarization eclipse were founded. It could be explain by appearance of nonlinear electromagnetic properties of the medium under crystals flowing due to temperature mechanical stress.

Keywords: ice cover, microwaves, polarization diagrams, nonlinear ice properties.