

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

ЧЛЕН ПРЕЗИДИУМА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

Николай Павлович Лавёров



ДИРЕКТОР ФГБУН
«ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ
ГЕОСФЕР РАН»

Юлий Израилович Зецер



Современный этап развития общества характеризуется возрастающей ролью информационной сферы, которая является неотъемлемой частью экономической, оборонной и других составляющих безопасности Российской Федерации. Поэтому приоритетной задачей национальной безопасности России является обеспечение возможности надежного и бесперебойного обмена информацией между техническими системами гражданского и военного назначения. Современные и перспективные системы связи, управления и навигации почти исключительно используют беспроводную связь, то есть носителями информации в них выступают физические волны различной природы. Существенной особенностью этих систем является то, что технические средства генерации

и приема информационных сигналов работают в различных геофизических средах, таких как твердая Земля вместе с океанами и морями, атмосфера, ионосфера и магнитосфера. Характеристики этих геофизических сред могут существенно повлиять на распространение информационных сигналов, в особенности при возмущении этих сред природными или техногенными воздействиями.

На рисунке 1 показана схема информационных взаимодействий технических объектов, расположенных в разных геофизических средах. Как видно, кроме связей на одном информационном уровне, осуществляется и «перекрестная» передача сообщений, когда сигнал от передатчика до приемника проходит несколько сред (например, ионосфера – атмосфера – морская вода или твердая Земля). Кроме того, существенной является проблема изменчивости геофизических сред, каждая из которых имеет свой временной и пространственный масштаб изменения, который, в свою очередь, зависит от природного или техногенного воздействия на среду. Более того, эти изменения очень часто носят случайный характер. Указанные обстоятельства усложняют процесс передачи информации и угрожают устойчивому функционированию информационных систем, что в конечном счете определяет обеспечение национальной безопасности.

ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ В АТМОСФЕРЕ, ВКЛЮЧАЯ ИОНОСФЕРУ

Беспроводная передача информации в данных средах осуществляется электромагнитными волнами. Рассмотрим несколько частотных диапазонов, важных для определенных задач передачи информации.

СВЕРХВЫСОКИЕ ЧАСТОТЫ (СВЧ): ~ 1–10 ГГц

На них, например, осуществляется работа навигационных систем. В частности, в настоящее время система GPS использует частоты $L1 = 1575,42$ и $L2 = 1227,60$ МГц.

1

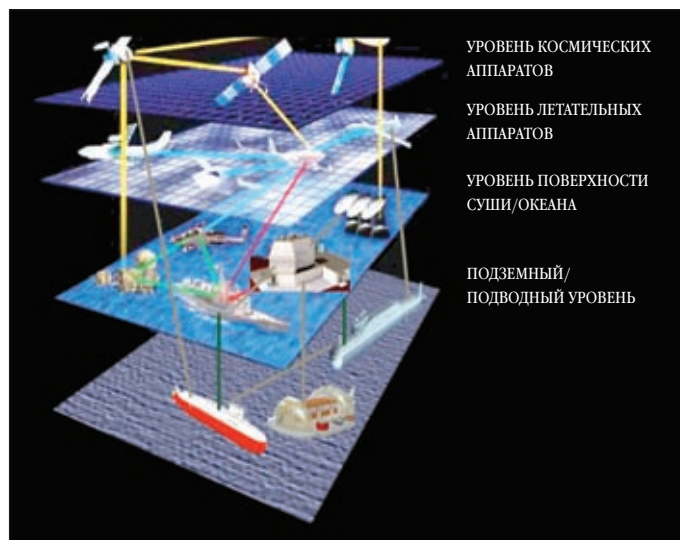


СХЕМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ К ПРИЕМНИКАМ, РАСПОЛОЖЕННЫМ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СРЕДАХ

В системе ГЛОНАСС, в отличие от GPS, где используются одинаковые частоты работы всех спутников, был принят частотный метод разделения сигналов различных спутников, однако все эти частоты принадлежат диапазону СВЧ.

Распространение радиоволн этого диапазона хорошо прогнозируется моделями неоднородной по высоте ионосферы, и поэтому по ее известным параметрам можно прогнозировать характеристики прошедших сигналов.

Однако опыт эксплуатации такого рода систем показал, что в существующих моделях плавно меняющейся структуры ионосферы влияние геофизических факторов было существенно недооценено. Во-первых, в ионосфере регулярно возникают зоны со значительными долготными градиентами электронной концентрации и существование таких зон не описывается моделями коррекции, встроенными в программное обеспечение глобальных спутниковых навигационных систем. Во-вторых, сигналы спутниковых навигационных систем и связных каналов испытывают сцинтилляции амплитуды и фазы (квазислучайное, стохастическое поведение). А это приводит к тому, что, например, во время суббуриковых возмущений для дифференциальных систем навигации при паспортной ошибке в несколько сантиметров ошибки определения координат достигают первых десятков метров, а в одночастотном режиме – до 100 м. На практике это означает, что в высоких широтах, где существование мелкомасштабных неоднородностей во время полярных возмущений имеет эмпирическое объяснение, оказывается возможным работать лишь с половиной из доступных спутников созвездия глобальной навигационной системы. Периоды сцинтилляций в средних широтах могут длиться несколько часов, хотя чаще они продолжаются несколько секунд (до минуты). Эта проблема наиболее остро стоит для объектов, перемещающихся с высокими скоростями и имеющих жестко ограниченное окно времени на принятие решения по оценке координат.

Всё вышесказанное справедливо и для каналов спутниковой связи, физически ничем не отличающихся от навигационных систем. Поскольку значительная часть территории России расположена в высоких геомагнитных широтах с выраженной авроральной и субавроральной активностью, здесь заведомо можно ожидать высокого уровня сцинтилляции сигналов. В средних широтах также наблюдаются амплитудные сцинтилляции, приводящие к невозможности принять сигнал со спутника.

Критическое влияние на работу в СВЧ-диапазоне на трассах Земля – спутник, спутник – спутник и спутник – Земля может оказать также шумовое электромагнитное излучение, генерируемое заряженными частицами высоких энергий. Эти частицы появляются в естественных условиях вследствие солнечной активности, а также могут быть инжектированы в ионосферу Земли при техногенных активных воздействиях как ионизирующей радиацией, так и электромагнитным излучением большой мощности. В критичных технологиях стратегической связи и управления фактор времени оказывается решающим, и такие быстротекущие процессы становятся чрезвычайно опасными.

На сегодняшний день какие-либо устоявшиеся и общепризнанные теории, описывающие динамику возникновения и исчезновения мелкомасштабных неоднородностей в ионосфере Земли, отсутствуют. Между тем существующие и разрабатываемые системы космической связи функционируют в диапазоне частот, максимально подверженном негативному влиянию геофизической обстановки.

ВЫСОКИЕ ЧАСТОТЫ (ВЧ): ~ 1–30 МГц

Это широко используемый радиодиапазон эффективен для передачи информации на большие расстояния. Сформированная передатчиком волна отражается пос-



ледовательно от ионосферы и от Земли и таким «многоскачковым» образом достигает приемника. Электрофизические характеристики Земли считаются постоянными по времени, а по пространству определяются географической картой местности, электропроводность которой не зависит от времени. Электрофизические характеристики ионосферы изменяются по времени и пространству в зависимости от природных и техногенных воздействий. Изменчивость этих характеристик может приводить к изменению фазы и амплитуды принимаемого сигнала. Величина природного воздействия в основном зависит:

- от изменчивости солнечного излучения, поступающего в верхние слои атмосферы, в первую очередь экстрасульфариолета (~ 150–200 нм);
- воздействия плазмы солнечного ветра на магнитное поле Земли;
- гравитационных атмосферных приливов от Солнца и Луны;
- набухания атмосферы по вертикали за счет дневного нагрева Солнцем.

Изменения состояния ионосферы становятся более интенсивными и опасными во время вспышечной активности Солнца. Внезапные ионосферные возмущения, ионосферные бури, поглощения полярной шапки и др. являются результатами такой активности. В этих условиях частицы высоких энергий и экстрасульфариолет повышенного уровня проникают в ионосферу, увеличивая нейтральную и электронную плотности атмосферы за счет инжекции частиц и фотоионизации. В зависимости от интенсивности этих процессов могут существенно измениться условия распространения радиоволн, следовательно, возможно периодическое или полное затемнение связи, радиолокации и навигации в первую очередь в полярных областях, а также в верхних и средних широтах.

К сожалению, возможности обеспечить наблюдение ионосферы и точно прогнозировать ее изменение в настоящее время ограничены, в основном по причине:

- недостаточности средств космического и наземного зондирования;
- низкой пространственной плотности и частоты получения данных от средств глобальных ионосферных наблюдений;
- недостаточной наполненности и точности ионосферных моделей;
- неполного научного понимания физических механизмов связей в системе «атмосфера – ионосфера – магнитосфера».

ОЧЕНЬ НИЗКИЕ (ОНЧ) И НИЗКИЕ (НЧ) ЧАСТОТЫ:
~ 3–300 кГц

Это радиодиапазон, в котором работают некоторые прикладные системы связи и навигационные системы СДВ-диапазона: «Лоран» (LORAN), «Альфа» (РСДН-20), «Омега» (Omega), а также системы передачи точного времени.

Многолетняя эксплуатация указанных систем показала их достаточную надежность. Как правило, информация в этих системах передавалась через моду-

ляцию фазы электромагнитного сигнала, флуктуации которой в естественных условиях были детально описаны. В пределах указанных пониманий созданы помехоустойчивые системы кодирования информации. Амплитудным флуктуациям и вообще значению амплитуды придавалось небольшое значение и только в части обеспечения требуемого отношения сигнал/шум в присутствии природной помехи, генерируемой глобальной грозовой активностью. Любые возможные проблемы при этом компенсировались заведомо избыточной мощностью радиопередающих центров.

Однако тенденцией новых и перспективных связанных систем, осуществляющих передачу информации на глобальные расстояния, является обработка достаточно слабого приемного сигнала с использованием новых математических методов, позволяющих получать полезный сигнал из-под шума. Это связано в том числе и с тем, что энергетический потенциал радиопередающих пунктов находится на пределе возможного, а его увеличение требует существенных затрат. Поэтому отношение сигнал/шум становится критичным при доведении информационных сигналов до конечного потребителя и амплитудные флуктуации ОНЧ-/НЧ-сигналов, вызванные геофизическими причинами, начинают играть существенную роль.

Экспериментальный материал по регистрации амплитудных флуктуаций в ОНЧ-/НЧ-диапазоне позволил сделать следующие выводы о роли геофизических эффектов:

- В ОНЧ-/НЧ-каналах связи присутствуют короткие, исключительно интенсивные флуктуации амплитуды даже в условиях абсолютного инструментального минимума солнечной и геомагнитной активности.
- Наблюдаются периоды, продолжительностью до двух недель, в течение которых нормальный суточный ход амплитуды ОНЧ-/НЧ-сигналов полностью разрушается.
- В ОНЧ-/НЧ-диапазоне регулярно наблюдаются интенсивные помехи сложного спектра, не связанные с грозовой активностью и полностью подавляющие полезный сигнал радиостанций, физический механизм этих явлений до конца не ясен.

КРАЙНЕ НИЗКИЕ ЧАСТОТЫ (КНЧ): ~ 1–100 Гц

Радиоволны данного диапазона обладают чрезвычайно малым затуханием при распространении в волноводе Земля – ионосфера. Заинтересованность в этом канале определяется необходимостью связи с объектами, расположенными в проводящих средах: под поверхностью Земли и на глубинах в морской воде. Именно этот частотный диапазон имеет в указанных средах величину скин-слоя, достаточную для передачи сообщений на заданные глубины.

Однако осуществление передачи информации в указанном частотном диапазоне связано с существенными сложностями:

- необходимостью сооружения излучающих антенн большой длины;



- необходимостью выбора места расположения антенны с малым значением электропроводности;
- невозможностью быстрой передачи сообщений ввиду необходимости использования крайне низких частот модуляции.

Например, передающая антенна с излучаемой частотой 76 Гц, расположенная около оз. Клэм-Лейк в США, использует три проводных линии: две около 26 км и одна примерно 50 км. Антенны размещены на непроводящих породах, имеющих наиболее низкую электропроводность $\sim 10^{-4}$ См/м.

Альтернативным методом передачи электромагнитных сигналов КНЧ-диапазона могут явиться нагревные стенды, использующие энергию мощного ВЧ-излучения, модулированного КНЧ, для создания эффективной «беспроводной» антенны в ионосфере, излучающей в модулирующем КНЧ-диапазоне. Физические механизмы такого детектирования ионосферой модулированного сигнала до конца не выяснены, однако наиболее используемая модель предполагает модуляцию природных токов, протекающих в ионосфере, при воздействии на них мощной модулированной волной передатчика. Площадь антенного поля наиболее мощного нагревного стенда NAARP, расположенного на Аляске, $\sim 3,5$ тыс. кв. м (сторона квадрата ~ 60 м). Эффективная излучаемая мощность указанного стенда в ВЧ-диапазоне зависит от конкретной частоты воздействия и в максимуме достигает $\sim 3,6$ ГВт.

Опыт исследований и эксплуатации стенда выявил на сегодняшний день некоторые серьезные недостатки, присущие генерации излучения КНЧ-диапазона:

- эффективность преобразования энергии ВЧ-излучения в энергию КНЧ-излучения составляет для синусоидальной амплитудной модуляции $\sim 0,0004\text{--}0,0032\%$;
- генерация КНЧ-излучения в большой степени зависит от состояния ионосферы, которое в настоящее время слабо прогнозируемо.

Однако с учетом того что процесс воздействия мощного ВЧ-излучения на ионосферу сопровождается большим количеством геофизических эффектов (рис. 2), которые могут быть использованы в приложениях, но в настоящий момент еще недостаточно изучены, указанные исследования должны быть продолжены.

ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ В МОРСКОЙ ВОДЕ

В качестве носителей информации для подводной беспроводной связи следующего поколения рассматриваются акустические и электромагнитные волны оптического и радиодиапазона. Потребность в подводной связи существует, в частности, в таких областях, как опрос сети датчиков мониторинга подводной обстановки, разведки природных подводных ресурсов, прогнозирования волновых приливов, и в ряде специальных проблем. Осуществление подводной связи с распределенными подводными сенсорными сетями в режиме реального времени наблюдений является серьезной проблемой.

СВЯЗЬ НА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Среди указанных трех типов волн акустические волны используются в качестве основного носителя благодаря их относительно низкому поглощению в подводных условиях. Отметим ряд важных свойств и проблем акустического канала.

Скорость звука в воде зависит от ее температуры, солености и давления (что непосредственно связано с глубиной). Типичная скорость звука в воде вблизи поверхности океана составляет около 1520 м/с и увеличивается с повышением температуры воды, уровня соли и увеличением глубины.

Потери при распространении волны в основном зависят от поглощения и рассеяния.

Потери на поглощение зависят от частоты акустической волны, химического состава морской воды (в основном от уровня борной кислоты и сульфата магния), а также от давления в области распространения. Для пресной воды при частоте 0,1 кГц потери будут составлять $\sim 10^{-5}$ дБ/км, а при 1 МГц $\sim 10^2$ дБ/км. Общие потери с учетом потерь в указанных химических соединениях составляют: при частоте 0,1 кГц $\sim 10^{-4}$ дБ/км, а при 1 МГц $\sim 4 \times 10^2$ дБ/км. Потери на поглощение для разных океанов, имеющих разный состав воды, отличаются, но не очень значительно.

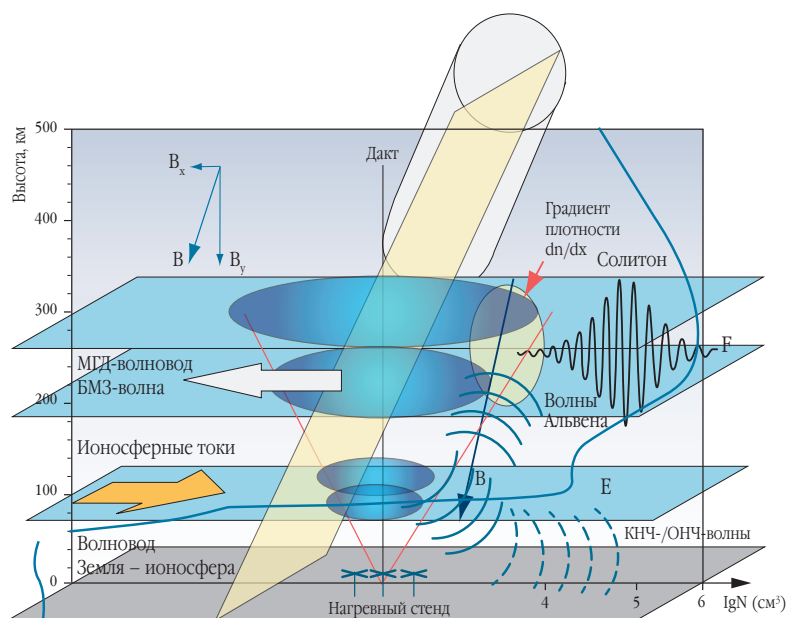
Потери на рассеяние в глубине связаны с тем, что локализованные в среде неоднородности, размеры которых соизмеримы с длиной волны, такие как пузыри или другие включения, заставляют волны излучения отклоняться от прямой траектории. Поверхностное рассеяние связано с изменением угла отражения, предсказываемого классическим законом отражения, и приводит к потере мощности, к изменениям фазы волны, что способствует многолучевости распространения. Когда скорость ветра возрастает, шероховатость поверхности увеличивается, следовательно, эффект поверхностного рассеяния тоже увеличивается.

Кроме указанных физических и геофизических факторов, влияющих на величину полезного сигнала, чрезвычайно важен окружающий шум: именно соотношение сигнал/шум определяет надежность приема информации. В частности, шум морской поверхности включает в себя помехи, создаваемые системой «поверхность – корабль», а также помехи, создаваемые при разрушении волн за счет последующего образования пузырьков. Шумы на глубине могут создаваться морскими животными. Кроме того, надводные корабли, курсирующие по океанским бассейнам, могут создавать общий низкочастотный шумовой фон, который по своим параметрам может отличаться от хорошо измеряемого шума конкретного плывущего корабля.

Разработанные физико-математические модели, в частности модели прогнозирования возможности осуществления подводной связи, хорошо работают для однородной среды, находящейся в стационарном или медленно меняющемся состоянии. Однако подводная среда существенно неоднородна, ее параметры могут достаточно быстро изменяться по пространству и времени, в особенности при возмущении среды природными



2



СХЕМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СОВОКУПНОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ПРОЦЕСС ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОДУЛИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ВЧ-ДИАПАЗОНА С ИОНОСФЕРОЙ

или техногенными воздействиями. Иллюстрацией данного факта могут служить разномасштабные неоднородности океана, такие как вихри и линзы, внутренние волны, различные динамические возмущения и приливо-отливные явления. В океане нередко формируются горизонтальные волноводы с градиентами показателя преломления на три-четыре порядка выше средних значений по акватории. Выявлено влияние особенностей рельефа дна на течение, особенности возникновения геопатогенных зон и т.д. Все эти явления в совокупности влияют на среду распространения информационных сигналов, на помеховую ситуацию, что, в свою очередь, определяет надежность осуществления подводной связи.

С учетом указанных факторов разрабатываемые модели среды распространения информационных сигналов требуют нового методического подхода: это должны быть модели, работающие в реальном масштабе времени, они должны корректировать модельные характеристики среды по гидрофизическим данным измерительных сетей, осуществляющих мониторинг этих характеристик в конкретных подводных регионах.

ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Использование оптических волн для связи, очевидно, имеет значительное преимущество в скорости передачи данных. Тем не менее есть несколько недостатков, присущих оптической связи. Во-первых, оптические сигналы быстро поглощаются и рассеиваются в воде. Во-вторых, высокий уровень окружающего света в верхней части столба воды является шумовым побочным негативным эффектом при использовании оптической связи. Кроме того, мутность воды часто играет важную роль в решении вопроса о том, можно ли ис-

пользовать оптические волны в качестве носителей информации для связи с подводными объектами.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Характерные особенности электромагнитных волн КНЧ-диапазона (а только этот частотный диапазон может быть использован для подводной связи на сотни метров) были обсуждены выше. Основная трудность в использовании – это проблемы генерации и прохождения электромагнитной волны под воду. Для частот КНЧ-диапазона величина потерь сигнала, проходящего на глубину из воздуха даже на частоте 4 Гц, составляет ~ 100 дБ и в основном определяется потерями на отражение от границы раздела (рефракция). С увеличением глубины величина потерь возрастает. Так, например, для частоты сигнала 200 Гц на глубине 200 м величина потерь составляет ~ 200 дБ.

Суммируя вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

- До сегодняшнего дня и в ближайшем будущем акустические волны будут основным носителем беспроводной подводной связи.
- Оптические носители будут использоваться в некоторых специальных случаях и главным препятствием их использования является то, что оптическая связь в воде в значительной степени может ограничиваться включениями окружающей среды.
- Главный недостаток использования электромагнитных радиоволн определяется высоким поглощением волн этого диапазона в воде, особенно в морской. Тем не менее потенциальные достоинства такой передачи информации определяют необходимость дальнейших исследований для



обеспечения технологически доступных методов генерации и доставки электромагнитных волн КНЧ-диапазона к погруженному объекту.

ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ ПОД ЗЕМЛЕЙ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОНЧ- И НЧ-ДИАПАЗОНОВ (10–100 КГц)

Все особенности передачи информации с помощью электромагнитного излучения в подземных условиях аналогичны описанному выше для подводной связи. Разница состоит только в том, что характерные значения электропроводности грунтовых пород колеблются в диапазоне от 10^{-2} См/м для влажосодержащих пород до 10^{-4} См/м для пород типа гранита. Это обуславливает возможность передачи сигнала в указанном выше более высокочастотном диапазоне и, следовательно, обеспечение большей информативности сигнала в единицу времени. Как показывает практика, ОНЧ-/НЧ-диапазон может обеспечить обмен информацией в породах с электропроводностью 10^{-3} – 10^{-4} См/м до или с глубиной в несколько сотен метров.

СВЯЗЬ С ПОМОЩЬЮ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Методы распространения сейсмических волн хорошо изучены теоретически и экспериментально, а сейсмические сигналы широко используются для геологического картирования подземного пространства и определения координат и магнитуды взрывных событий природного и техногенного происхождения. Для использования сейсмической волны как носителя информации важна сейсмическая эффективность передатчика (например, для взрывного источника это отношение энергии сейсмических волн к энергии взрыва). Экспериментами и расчетами было показано, что эта сейсмическая эффективность для заглубленного взрыва составляет: 0,1% в аллювии, 1,2% в туфе, 4,9% в каменной соли и 3,7% в граните. В случае контактных взрывов это отношение находится в диапазоне 0,01–0,10%.

Ввиду существенной неоднородности земной коры для использования сейсмического канала связи на значительные расстояния (порядка тысяч километров) необходима калибровка предполагаемой трассы распространения сигнала. Кроме того, с учетом достаточно большого сейсмического фона (микросейсмы) для обеспечения заметного соотношения сигнал/шум в точке приема необходима большая мощность взрывного источника.

ВЛИЯНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СРЕД

При осуществлении передачи информации между геофизическими средами существенные потери сигнала имеют место на границе раздела сред (см. рис. 1). Это связано с тем, что рассматриваемые среды: ионосфера, атмосфера и вода/земля – отличаются по физическим характеристикам. Основным физическим носителем канала связи между указанными средами является электромагнитная волна радиодиапазона, так как только она может распространяться во всех указанных средах, правда, испытывая соответствующие отражения и поглощения, которые необходимо учитывать при разработке аппаратуры. Например, при прохождении плоской электромагнитной волны частотой 10 Гц, нормально падающей на границу воздух – морская вода, энергия прошедшей волны уменьшается примерно на четыре порядка от падающей энергии.

ВЫВОДЫ

Современные потребности приема и передачи информационных сообщений должны обеспечиваться возможностями быстрой и бесперебойной связи и навигации с техническими средствами, расположенными в разных геофизических средах. Геофизические среды: твердая Земля вместе с океанами и морями, атмосфера, ионосфера и магнитосфера – могут существенно повлиять на распространение сигнала, в особенности при возмущении этих сред природными или техногенными воздействиями. Учет влияния сред на распространяющийся сигнал осуществляется использованием специально разработанных физических и прогностических моделей обработки данных, получаемых приемниками информации. Указанные модели разрабатываются на базе фундаментальных исследований поведения характеристик геофизических сред, влияющих на распространение информационных сигналов.

Выполнение цикла работ по фундаментальным и прикладным исследованиям геофизической среды, разработка физических и прогностических моделей среды и распространения информационных сигналов, а также программных средств обработки большого массива данных в реальном масштабе времени являются необходимым и важным условием обеспечения бесперебойного и корректного функционирования информационных каналов.