

УДК:513.594.9; 537.874.7; 551.508.86

СПЕКТРОСКОПИЯ ИМПЕДАНСА В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Уваров В.Н.

*Институт космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного
отделения РАН, с. Паратунка, Камчатский край, uvarovvnng@yandex.ru, uvarovvn@ikir.ru*

Введение

При дистанционных методах исследования, к которым относятся бесконтактные электромагнитные исследования, основной характеристикой объекта, преобразующего тестирующие сигналы T в сигналы отклика R системы, является импеданс $\hat{Z} = R/T$ – формальное решение уравнения, связывающего отклик с тестирующим сигналом: $R = \hat{Z} \cdot T$.

Исследование объектов при таком подходе сводится к построению модели из простейших пассивных компонент, преобразующей тестирующий сигнал в отклик эквивалентно объекту.

Слово "импеданс" происходит от латинского слова «impedio» – «препятствую». Он является передаточной функцией преобразования входного сигнала в выходной.

Вектор электрического импеданса $Z=R+iX$ имеет две составляющие - действительную, характеризующую активное сопротивление (R), обычно слабо зависящую от частоты, и реактивную составляющую X , характеризующуюся частотной зависимостью.

Передаточная функция характеризует свойства объекта и определяется как свойствами его элементов, так и структурой их взаимосвязи. Она эффективно используется для изучения объектов в акустике, технике, биофизике (биологические ткани *in vivo*, *in vitro*), физической химии (спектроскопия импеданса для анализа транспортных процессов в кристаллах и электрохимии твердых электролитов). Можно упомянуть методы геофизической разведки и изучения структуры земной коры, использующие сверх низкочастотный диапазон.

Основные свойства спектроскопии импеданса

В настоящей работе рассматриваются особенности применения спектроскопии импеданса с использованием в качестве тестирующего сигнала естественного электромагнитного поля Земли КНЧ-ОНЧ диапазона. Спектроскопия импеданса, являющаяся методом исследования физических свойств объекта по его частотным характеристикам, и сводится к восстановлению эквивалентной схемы объекта по спектральной зависимости этих характеристик и обладает следующими свойствами.

- Линейность.: выходной сигнал является линейной функцией входного сигнала: U (выход) = I (вход) Z . Следствием линейности является принцип суперпозиции.

- Устойчивостью: после возмущения система должна вернуться в первоначальное состояние; при любом ограниченном сигнале выходной сигнал также ограничен.

- Причинностью: отклик наступает после возмущения, система не может реагировать на будущие сигналы.

- Физической реализуемостью: физические системы не могут содержать особенности в развитии их свойств.

- Полнотой измерений: спектральные данные содержат всю информацию, необходимую для восстановления эквивалентной схемы из линейных активных и реактивных элементов.

- Аналитичностью аппроксимирующих функций: описание физических свойств объекта может быть выполнено с использованием комплексных аналитических функций. В этом случае данные могут быть верифицированы с использованием соотношения Крамерса-Кронинга (интегральной связи между действительной и мнимой частями любой комплексной функции, аналитичной в верхней полуплоскости).

Спектроскопия импеданса решает задачу восстановления параметров модели по полученным данным и потому относится к классу некорректно поставленных задач, в которых обычно нарушается условие устойчивости. Примеры обратных задач можно найти в геофизике, астрономии медицинской визуализации, компьютерной томографии, дистанционном зондировании, спектральном анализе, теории рассеяния и задачах по неразрушающему контролю.

Спектроскопия импеданса в геофизике

В геофизических исследованиях источниками тестовых сигналов являются как технические (наземные или спутниковые радиостанции), так и естественные источники: молниевые разряды, возмущения магнитосферно-литосферного или космического происхождения. Наиболее известное геофизическое использование спектроскопии импеданса связано с магнито-теллурическим [4] и магнито-вариационным зондированием [1, 5] или магнито-вариационным профилированием [6], направленным на восстановление структуры и свойств земной коры и использующим для этого используется диапазон частот от $10^{-2} \div 100$ Гц.

Однако для анализа КНЧ-ОНЧ излучения этот подход, несмотря на его достаточно глубокую методическую проработку, неприменим потому, что положение о вертикальном падении волны тестирующего поля и вытекающие из него методы обработки неадекватны исследованиям.

Поскольку информацию об объекте получают анализируя тестирующий сигнал и отклик, то понятна связь качества получаемой информации с тестирующим сигналом и его источником. Поэтому для получения качественной информации там, где возможно (электрохимия, биофизика и т.д.) используют контролируемые источники, обеспечивающие высококачественный тестирующий сигнал.

При исследованиях литосферно-ионосферных связей в области частот $3 \div 3 \cdot 10^4$ Гц (КНЧ-ОНЧ диапазон) источники тестирующего сигнала – это молниевые разряды в центрах мировых гроз, тайфунах и обычных и вулканических грозах, ионосферно-магнитосферные, литосферные (землетрясения) и техногенные источники формируют низкокачественный сигнал спорадического импульсного характера. Это обстоятельство предполагает необходимость проведения накопления и усреднения.

По характеру направленности естественное электромагнитное излучение приближенно состоит из субгоризонтального и субвертикального компонент. Субгоризонтальное излучение исходит преимущественно из приэкваториальных областей, называемых центрами мировой грозовой активности – азиатского, африканского и американского. Оно распространяется в плоском волноводе, образованном хорошо проводящими земной поверхностью, ионосферой (слой D, расположенный на высотах 60-90 км над уровнем моря) в расположенной между ними изолирующей атмосфере.

Субвертикальное излучение связано с существованием горизонтального открытого плоского резонатора образованного ионосферой, атмосферой и поверхностью Земли (резонатор Фабри-Перо). Источниками излучения, наполняющего вертикальный резонатор, являются региональные процессы (грозы, землетрясения) и магнитосферные процессы.

Спектральный состав тестирующих сигналов достаточно универсален, поскольку молния – кратковременный разряд и характеризуется чрезвычайно широкополосным излучением. Характер изменения спектра при его распространении в волноводе Земля-ионосфера определяется пройденным расстоянием и электрофизическими свойствами ионосферы и поверхности Земли. По данным регистрации различных компонент поля можно определить направление прихода излучения – азимута локализации источника с помощью однопунктовой пеленгации [2, 3, 7].

Основной вклад в поле волны, достигшей приемника, играет первая зона Френеля – область распространения, в которой разность кратчайшего расстояния между источником и приемником отличается от суммы расстояний от вторичного источника до приемника и источника не более, чем на половину длины волны: $2L - \left(\sqrt{(L - x_i)^2 + y_i^2} + \sqrt{(L + x_i)^2 + y_i^2} \right) < \lambda/2$. Здесь x_i, y_i – координаты точки на границе первой зоны Френеля, $[x = -L, y = 0]$ и $[x = +L, y = 0]$ – положение источника и приемника.

Интенсивность излучения, распространяющегося в плоском волноводе Земля-ионосфера и достигшего приемника в результате переизлучения вторичными источниками, обратно пропорциональна произведению расстояний от вторичного источника до приемника и источника $F = 1/\sqrt{((L - x)^2 + y^2)((L + x)^2 + y^2)}$. Оно достигает максимальных значений в точках расположения источника и приемника $x = \pm L$ и потому среда ближних волновых зон источника и приемника $r \ll \lambda/(2\pi)$ оказывает наибольшее влияние на сигнал, достигший приемника.

Это обстоятельство в совокупности с использованием однопунктовой пассивной локализации открывает принципиальную возможность определять характер среды в окрестностях выделенных направлений и расстояний, открывая новые возможности дистанционного зондирования при исследовании удаленных объектов, таких как очаги гроз, тайфуны, эруптивные шлейфы вулканов и другие явления, сопровождающиеся электромагнитной активностью. Следует отметить, что положение молний крайне изменчиво, поскольку на поверхности Земли обычно существует несколько грозовых очагов, а возникновение молний в одном и том же месте практически не

происходит. Иными словами, тестирующий источник не когерентен.

Как известно, число молний ежесекундно происходящих на земном шаре, по разным оценкам колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен. Характерный размер области молниевой активности оценивается в тысячи километров. Поэтому при усреднении по интервалу времени, достаточно большому по сравнению с характерным временем протекания отдельного активного процесса (источника излучения, молнии), и, следовательно, по большому числу различных источников и большим площадям локализации молний, индивидуальное влияние отдельных источников нивелируется. В этом случае определяющее влияние на спектр импеданса будет оказывать область системы литосфера-атмосфера-ионосфера, находящаяся ближней волновой зоне регистратора. Поэтому при усреднении по интервалу времени, достаточно большому по сравнению с характерным временем протекания отдельного активного процесса (источника излучения, молнии), индивидуальное влияние отдельных источников нивелируется. Основное влияние на полученное среднее значение импеданса окажет ближняя волновая зона приемника. В этом случае вариации усредненного импеданса определяются вариациями региональных электрофизических свойств. Такие исследования могут быть полезны, например, при для оценки электромагнитных проявлений сейсмической активности.

Информативность

При определении среднего количества информации в одном сигнале (информативности), которое содержится в сообщениях от источников самой разной природы, наиболее широкое распространение получил подход, согласно которому удельная информативность источника (среднее количество информации приходящееся на один сигнал), определяется по Шеннону:

$$I = -1/N \cdot \sum_{i=1}^N p_i \log_2(p_i).$$

Здесь p_i – вероятность появления сигнала i -го вида,

N количество сигналов.

Для сигналов одного вида $p_i = p$ и выражение для информативности принимает вид

$$I = -p \log_2 p.$$

В качестве ступени градации целесообразно выбрать уровень шума. Тогда уровень сигнала будет определяться числом уровней шума. При равномерном распределении вероятность появления сигнала равна обратной размерности пространства сигнала $p = 1/V$, где $V = 2^{s/n}$ - число возможных значений различных сигналов.

Здесь $n(f) = \sqrt{M([\tilde{F}(Z)]^2) - [M(|\tilde{F}(Z)|)]^2}$ – спектр дисперсии сигнала, $s(f) = M(|\tilde{F}(Z)|)$ – спектр среднеквадратичного значения сигнала, M – операция усреднения, $\tilde{F}$ – операция оконного преобразования Фурье. Если ввести обозначение $x = n/s$, то для сильных сигналов ($x < 1$) выражение для информативности можно записать в виде $I = 1/(x 2^{\frac{1}{x}})$. Ограничиваясь наибольшим членом этого разложения в ряд Тейлора можно записать $I \approx 1/x = s/n$. Иными словами, информативность сильных сигналов приближенно определяется отношением сигнал-шум. Таким образом спектр информативности достаточно близок к спектру отношения сигнал/шум. Это обстоятельство позволяет исследователю выделить более информативные участки спектра.

На рисунке 1 в качестве иллюстрации приведены спектры модулей импеданса естественного электромагнитного поля усредненные за 15 минут. Данные были получены на станции геофизических наблюдений п. Карымшина.

Зоны спектра

Спектр можно грубо разбить на две части, границей которых служит критическая частота атмосферно-ионосферного волновода.

- Низкочастотная часть спектра, в основном сформирована излучением местных источников и излучением, пришедшим с субвертикальных направлений, в основном магнитосферного происхождения.

- В высокочастотной области излучения преимущественно проявляются удаленные источники.

Граница между низкочастотной и высокочастотной областью непостоянна и определяется критической частотой нижнего слоя ионосферы. Она проявляется на графике полосой повышенного значения импеданса в диапазоне 1.7÷2 кГц.

Естественное электрическое поле в диапазоне КНЧ-СНЧ является случайной функцией

времени. Доминирующими источниками являются разряды приэкваториальных молний, длительность импульсов от которых (атмосфериков) составляет несколько ($5 \div 30$) миллисекунд. Компоненты поля от них в каждом отдельном импульсе достаточно хорошо скорректированы и их отношение определяется условиями распространения. Поэтому усредненное по интервалу времени, превосходящему характерное время жизни источника, значение импеданса $Z = (E_z/H_{x,y})$ является медленной ограниченной функцией времени.

Пример анализа данных наблюдений и рекомендации

При анализе Рис. 1 прослеживаются следующие особенности, которые приводят к достаточно общим выводами и следующим из них рекомендациям.

1. Хорошая корреляция спектров модуля импеданса и его отношения сигнал/шум. Иными словами, области повышенного значения импеданса эти полосы обладают повышенной информативностью по сравнению с соседними областями. Это обстоятельство позволяет сосредоточить поиска агентов влияния различных процессов именно на диапазонах частот, обладающих повышенной информативностью.

2. Периодичность расположения максимумов свидетельствует о том, что эти периодические структуры связаны и являются частью единой системы, обладающей набором гармоник.

3. Ширина полос этой структуры свидетельствует о сравнительно низкой добротности ($3 \leq Q \leq 5$) этих естественных резонансных структур.

4. Полоса частот $1.8 \div 2$ кГц совпадает с критической частотой волновода ионосфера-Земля и может служить областью пограничных частот региональных и глобальных источников. Ниже этой частоты следует ожидать влияния местных источников, например, связанных с сейсмической активностью.

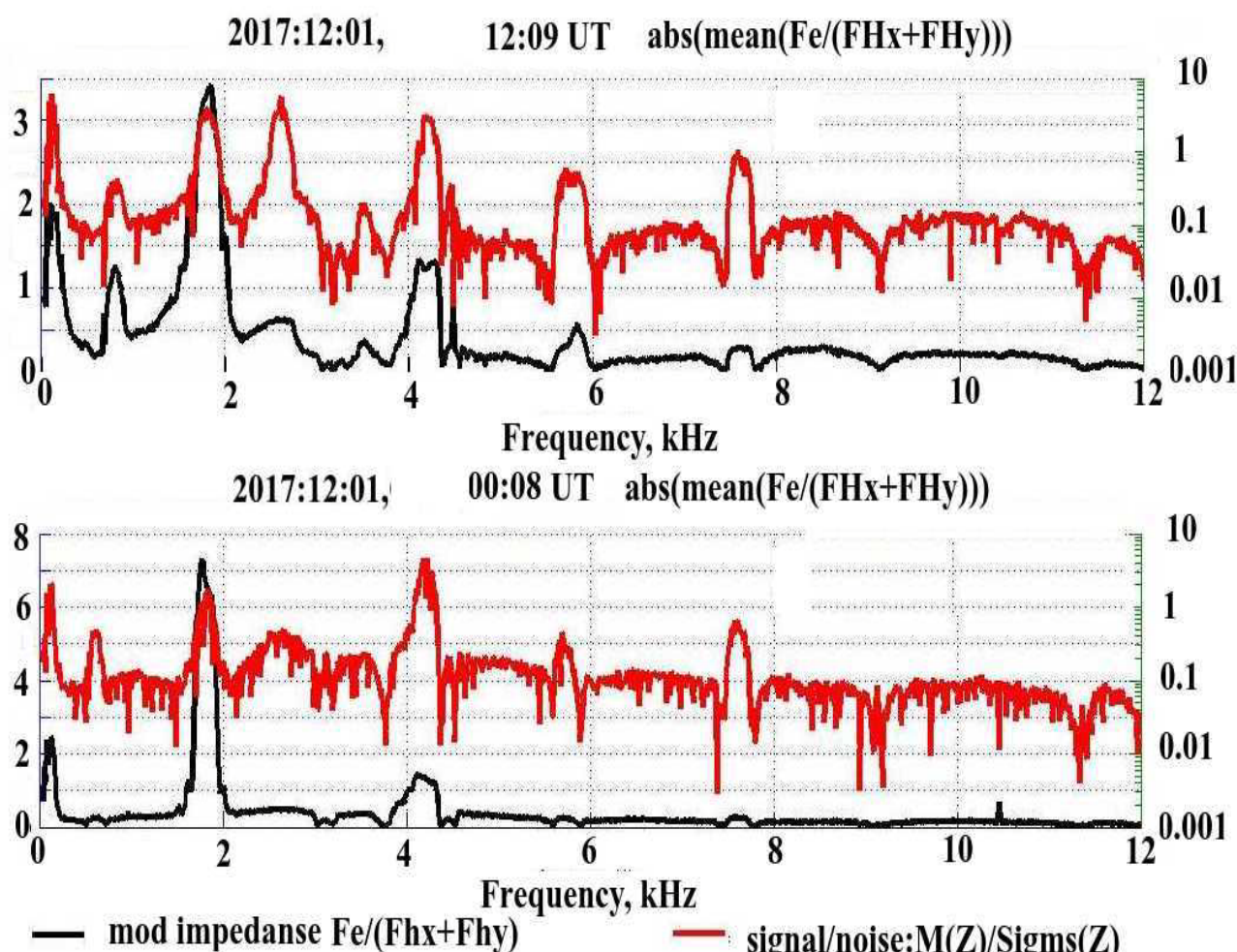


Рис. 1. Пример усредненных по интервалу времени 15 минут спектров импеданса ночных и дневных наблюдений. Верхняя панель - ночные спектры. Нижняя панель - дневные спектры.

Выводы

Эффективное использование метода спектроскопии импеданса в геофизике предполагает ясное понимание его возможностей при использовании неконтролируемых тестирующих источников, характерных для геофизических исследований.

Изучение возможностей использования спектроскопии импеданса при использовании неконтролируемых источников открывает новые возможности дистанционного зондирования различных геофизических процессов и явлений, таких как тайфуны и землетрясения.

Использование естественного электромагнитного поля делает этот метод эффективным и экономичным методом дистанционного зондирования.

Комплексирование этого метода с однопунктовой пеленгацией позволяет осуществлять как региональный, так и удаленный мониторинг геофизических объектов.

Использование спектральных областей повышенной информативности позволяет сосредоточить внимание исследователя на более перспективных областях спектра и повышает эффективность исследований.

Следует продолжить исследование метода спектроскопии импеданса и его расширения, основанного на использовании других инвариантов энергии тестирующих источников.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-00543 «Механизмы грозообразования в условиях активной вулканической деятельности на полуострове Камчатка».

Список литературы

1. Бердичевский М.Н., Кузнецов В.А., Пальшин Н.А. Анализ магнитовариационных функций отклика. // Физика Земли. 2009. № 3. С. 3–23.
2. Дружин Г.И., Козлов В.И., Лантев А.Д., Муллаяров В.А. Измерение углов прихода квазигармонических ОНЧ-сигналов // Геомагнетизм и аэрономия. 1998. Т. 28. № 1. С. 164–168.
3. Муллаяров В.А., Козлов В.И., Дружин Г.И. Пеленгационные наблюдения областей выхода магнитосферных ОНЧ-излучений в средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37. № 4. С. 160–164.
4. Электроразведка. Справочник геофизика. М: Недра, 1979. 518 с.
5. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Голубцова Н.С., Мерицкова Н. А., Пушкарев П.Ю. Магнитовариационное зондирование: новые возможности // Физика Земли. 2003. № 9. С. 3–30.
6. Rokityansky I.I. Geoelectromagnetic Investigation of the Earth's Crust and Mantle. Berlin:Springer-Verlag, 1982. 381 p.
7. Трусковский П. Анализ методов и средств однопозиционной пассивной радиолокации грозовых очагов. // Transport and Telecommunication. 2005. V.6. No 3. P. 431–437. Proceedings of International Conference RelStat'04. Part 3.