

И.И. Кононов, И.Е. Юсупов

КАНОНИЧЕСКИЕ ВОЛНОВЫЕ ФОРМЫ СИЛЬНОТОЧНЫХ КОМПОНЕНТ МОЛНИЕВЫХ ВСПЫШЕК

Физический факультет СПбГУ

В докладе рассматривается методика и некоторые результаты формирования усредненных типовых (канонических) форм импульсов электромагнитного излучения (ЭМИ) сильноточных компонент молниевых вспышек в СДВ-диапазоне. Жесткие ограничения на пространственное положение грозовых очагов при формировании базы данных анализируемых атмосфериков позволяет рассматривать полученные формы соответствующими второй производной эквивалентного дипольного момента и использовать их в этом качестве в различных приложениях, требующих проведения численных расчетов атмосфериков в произвольных условиях распространения.

Импульсные сигналы, соответствующие излучению сильноточных компонент молниевых вспышек, характеризуются чрезвычайно широким частотным спектром (от долей Гц до сотен МГц), большой изменчивостью форм, значительной изрезанностью, наложенной на их регулярную составляющую (см. иллюстрацию, приведенную на рис.1а). Несмотря на многообразие волновых форм атмосфериков, представляется возможным провести их описание в рамках той или иной классификации, первые достаточно обоснованные попытки которой были сделаны еще в работе Тейлора [1]. Однако в этой и ряде последующих работ приводились лишь конкретные образцы осциллограмм типичных сигналов, представляющих отдельные типы (классы) и оценки их некоторых параметров (крутизна переднего фронта, длительность и амплитуда первой полуволны). Статистические характеристики, определяющие изменчивость волновых форм в целом, их взаимная коррелированность в пределах выделенных типов или между ними не были исследованы. До последнего времени не потеряла актуальности и потребность в той или иной форме описания ЭМИ молниевых разрядов, пригодного для практического использования в различных прикладных задачах. В одной из публикаций последних лет [2] предпринята попытка создания такого описания в виде банка канонических форм атмосфериков в интервале расстояний от 250 км до 4000 км (с градациями по дальности 250 км), полученного усреднением всех сигналов, зарегистрированных в течение летнего грозового сезона с помощью американской разностно-дальномерной системой NLDN из выделенных из грозовых очагов, соответствующих указанным выше градациям.

В настоящем сообщении речь идет об альтернативном пути создания подобного рода банков данных, первоначально основанном на формировании усредненных типовых форм на основе экспериментальных данных регистрации атмосфериков в ближней зоне при достаточно жестких ограничениях на пространственное расположение их источников (50...110 км от пункта регистрации) и временной интервал обработки каждого атмосферика (не превышающий 300 мкс от начала сигнала). Это позволяет до минимума уменьшить влияние на его форму индукционного и статического членов (в дипольном представлении электрической компоненты поля), кривизны и конечной проводимости земной поверхности, а также наличие ионосферных отражений. Последующее тиражирование выделенных волновых форм в виде банков данных для любых расстояний и условий распространения возможно путем проведения необходимых численных расчетов.

Набор волновых форм импульсов ЭМИ сильноточных молниевых разрядов, анализируемый в настоящей работе, был сформирован по результатам регистрации ЭМИ молниевых вспышек в грозовой сезон 2001 года в ходе проведения совместных работ с фирмой DIMENSION в южной части Франции. Регистрация электромагнитных составляющих поля сильноточных разрядов осуществлялась в полосе частот 0.3...30 кГц, являющейся рабочей областью тестируемого цифрового регистратора-дальномера «Очаг»,

изготовленного на кафедре радиофизики СПбГУ. В качестве поверочного инструмента для определения координат молниевых вспышек (МВ) использовалась высокоточная многопунктовая система SAFIR, среднеквадратичная погрешность местоопределения которой не превышала 1 км в радиусе 250 км от центра системы.

Сужение полосы до указанных выше значений приводит, несомненно, к заметным изменениям форм ближних атмосфериков. Иллюстрацией может служить рис.1а, на котором сплошными кривыми (в относительных единицах) воспроизведены формы ЭМИ одного из реальных молниевых разрядов, синхронно зарегистрированных на расстояниях 87 км и 1300 км от его основания в широкой полосе частот (до 2 МГц) и пунктирными кривыми – соответствующие формы откликов НЧ фильтров с граничной частотой 30 кГц (сопоставляемые кривые приведены с исключением дополнительной групповой задержки откликов фильтров).

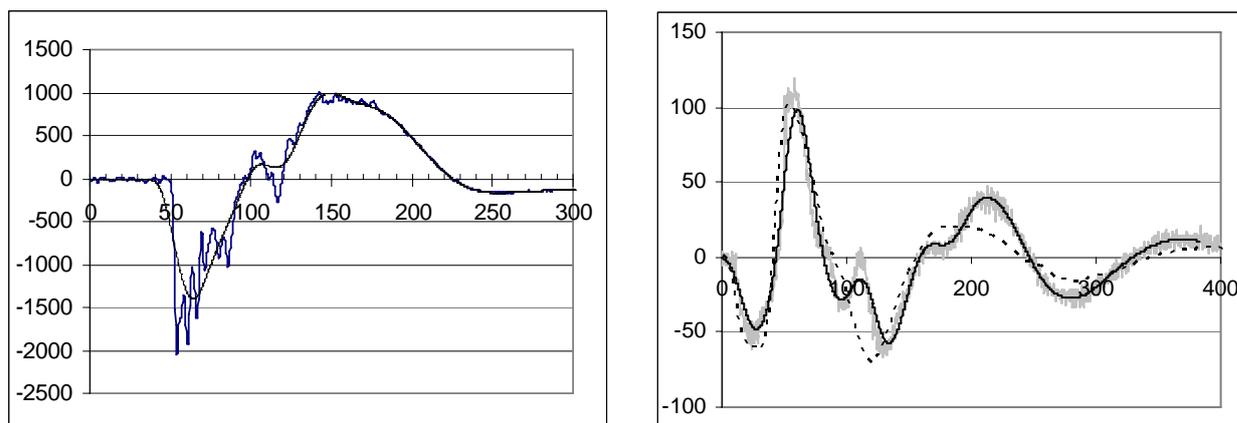


Рис.1 Синхронные атмосферики, зарегистрированные на расстояниях 87 км и 1300 км в частотной полосе 2 МГц (сплошные кривые серого цвета), соответствующие им отклики ФНЧ с частотой среза 30 кГц (тонкие сплошные кривые), и форма импульса (пунктирная кривая), рассчитанная для расстояния 1300 км с использованием усредненной (канонической) формы типа 2.

Решение обсуждаемой в сообщении задачи практически невозможно без предварительной точной и надежной пространственно-временной селекции грозовой активности с последующим соотносением регистрируемых волновых форм с выделенными грозовыми очагами. Формирование грозовых кластеров осуществлялось по методике пространственной кластеризации, описанной в [3].

Данные регистрации атмосфериков, отобранные для последующей обработки, результаты которой обсуждаются в сообщении, соответствуют грозовым дням **28-06-01** (Кл_10, Кл_51, Кл_121, Кл_262, Кл_298), **06-07-01** (Кл_231), **10-07-01** (Кл_33, Кл_177), условные номера выделенных грозовых кластеров приведены в скобках. Из множества (до нескольких десятков) кластеров, сформированных в приведенные даты в суточном цикле развития грозовой активности, были отобраны образцы, соответствующие разному типу ее развития (фронтальный или внутримассовый), разному времени суток и, самое главное, указанному выше пространственному ограничению.

Для разделения волновых форм атмосфериков из выделенных грозовых кластеров по типам и последующего формирования их усредненных (канонических) форм была разработана эвристическая итеративная двухэтапная процедура классификации. На первом этапе все зарегистрированные формы, синхронизированные с данными системы SAFIR и нормализованные по амплитуде первой полуволны, подвергались последовательному усреднению с разделением по типам с использованием в качестве критерия селекции некоторого заданного предельно допустимого отклонения очередного анализируемого атмосферика от усредненной формы (в метрике L_2), полученной на предшествующей стадии обработки. При достаточно жестком пороге допустимого с.к.о. (в используемом алгоритме он не превышал 20%) при первом проходе формировалось довольно много средних форм

(количество которых могло достигать 5...10% от общего числа исходных сигналов). При следующем запуске процедуры усреднения эти формы использовались в качестве исходных эталонных образцов. Процедура усреднения повторялась до тех пор, пока количество усредненных форм не переставало заметно сокращаться. На втором этапе отбрасывались формы, представленные выборками, количество которых не превышало трех экземпляров за весь период анализа. После этого рассчитывались функции взаимной корреляции оставшихся усредненных волновых форм и окончательная выборка сигналов, соответствующих тому или иному типу, формировалась объединением выборок из тех форм, коэффициенты взаимной корреляции которых были не меньше некоторого заданного порогового значения (для обсуждаемых ниже данных этот порог составлял 0.9).

Некоторые результаты использования обсуждаемой процедуры классификации (селекции по типам) в виде усредненных волновых форм, нормированных по амплитуде первой полуволны, приведены на (рис.2).

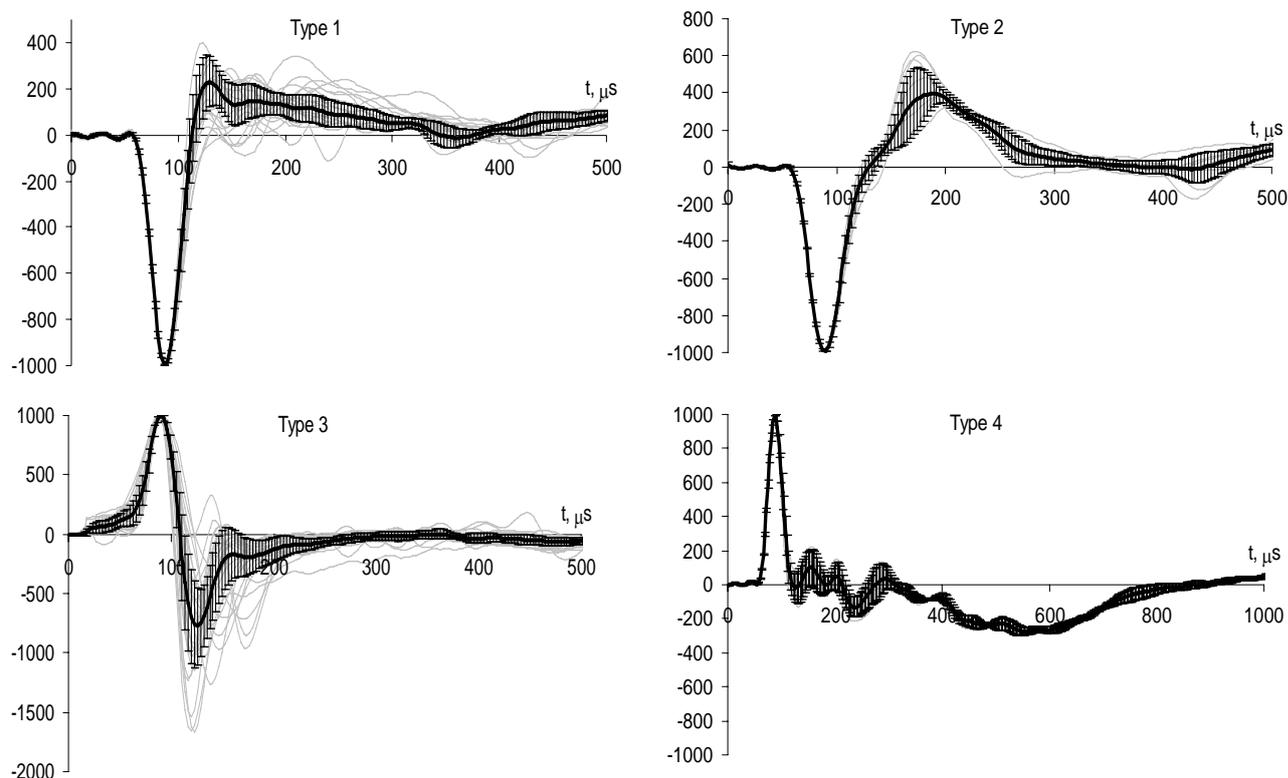


Рис.2. Типовые волновые формы атмосфериков, полученные усреднением по отдельным кластерам (тонкие линии), жирными линиями выделены формы, полученные усреднением по всем кластерам, вертикальные черточки характеризуют разброс в пределах с.к.о.

На рисунке представлено несколько типовых форм, представляющих подавляющее большинство из числа обрабатываемых сигналов. Не приведены формы, представленные значительно меньшим (более чем на порядок) количеством реализаций. Из приведенных волновых форм следует отметить прежде всего типы 1 и 2, соответствующие разрядам между облаком и землей. Формы этих типов встречаются практически во всех кластерах, формируемых в грозах как фронтального, так и внутримассового характера. Их соотношение в выборках может меняться в зависимости от типа грозы и стадии ее развития, а суммарное количество в потоке импульсного излучения сильноточных разрядов может достигать 50...90 % от общего числа регистрируемых сигналов. Коэффициенты взаимной корреляции усредненных по разным кластерам форм этих двух типов в большинстве случаев лежат в пределах 0.95...0.99, что значительно превышает приведенное выше пороговое значение 0.9. Корреляция между формами 1 и 2 типов также весьма значительна (0.6...0.95), что, в принципе, позволяет (ценой потери точности оценок в некоторых приложениях)

рассматривать их как один тип (что отчасти оправдывает введение единой канонической формы для каждого фиксированного расстояния в публикации [2]). Значительно большим разнообразием характеризуются формы, выделенные как тип 3. Они соответствуют отдельным наибольшим по амплитуде импульсным компонентам из цуга так называемых К-импульсов, формируемых внутриоблачными стримерами молниевых вспышек. Как правило, количество усредненных волновых форм этого типа, получаемых на первом этапе процедуры кластеризации, оказывается преобладающим. Взаимная коррелированность соответствующих этим типам волновых форм находится в пределах от 0.2 до 0.8, оказываясь значительно меньше порогового значения 0.9, используемого для последующего объединения выборок, как это делалось для сигналов 1 и 2 типов. Поэтому они были выделены в отдельный тип по другому критерию: более затянутому переднему фронту и практически равному соотношению первых двух полуволн. Мы сочли это допустимым, учитывая, что средние значения максимальных амплитуд полуволн этих импульсов в несколько раз меньше аналогичных величин для атмосфериков типов 1 и 2 и в дальней зоне, для которой в основном и предполагается использование канонических форм, при относительно высоком пороге регистрации, с сигналами этого типа приходится встречаться значительно реже, чем с двумя первыми. Усредненная форма типа 4, приведенная на рис.2, также не является характерной для исследуемого региона. Это, скорее, уникальный случай генерирования в течение ночных и утренних часов нескольких десятков очень мощных импульсов с положительным знаком первой полуволны (противоположном знаку, характерному для полуволн типов 1 и 2), зафиксированных из расположенного над морем малоподвижного диффузного грозового очага. Их отличительным признаком, кроме большей амплитуды и длительности первой полуволны, является значительная нерегулярность формы после первой полуволны и наличие выраженного низкочастотного «хвоста», обусловленного, по-видимому, непрерывным током, протекающим после окончания основной фазы пробоя. В таблице1 приведены статистические характеристики некоторых параметров первых полуволн рассматриваемых типов волновых форм (в скобках указано количество атмосфериков, характеризующее объем выборки каждого типа).

Таблица 1. Усредненные значения параметров типовых форм

Типы форм	E_{m1} (В/м)	E_{m2} (В/м)	τ_1 (мкс)
T1 (935)	2.5 ± 1.7	0.7 ± 0.6	61 ± 14
T2 (144)	6.0 ± 3.2	3.0 ± 2.5	80 ± 17
T3 (550)	1.3 ± 0.8	1.2 ± 1.0	77 ± 25
T4 (22)	14.3 ± 4.4	-2.9 ± 1.9	100 ± 40

Полученные усредненные (канонические) формы, заданные (в зависимости от конкретных потребностей) либо в виде банка формирующих эти формы реализаций, либо в виде таблиц или аппроксимаций сформированных усредненных волновых форм, могут служить моделью источника (используемого в качестве второй производной дипольного момента) при проведении расчетов полей молниевых разрядов в широком диапазоне расстояний, результаты которых, в свою очередь, предполагается использовать в целом ряде практических приложений.

Литература

1. Taylor W.L. "J. Res. NBS", 1963, 67D, p. 539-550.
2. Ryan K.S. Patent US PTO 12/152896 from 05/12/2008.
3. Kononov I.I., Yusupov I.E. Proc. 18th ILDC, 2004, Helsinki, Finland, Ref. No. 23.