

И.И. Кононов, И.Е. Юсупов

## К МЕТОДИКЕ ФОРМИРОВАНИЯ БАНКОВ КАНОНИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ФОРМ СИЛЬНОТОЧНЫХ КОМПОНЕНТ МОЛНИЕВЫХ ВСПЫШЕК

Физический факультет СПбГУ

В докладе обсуждается возможность формирования банков волновых форм атмосфериков в ОНЧ-диапазоне для произвольных расстояний в пределах средней и дальней зон распространения, основанных на использовании их усредненных (канонических) форм, полученных в пределах ближней части волновой зоны. Для оценки адекватности рассчитываемых волновых форм реальным атмосферикам приведены некоторые результаты сопоставления расчетных импульсов с экспериментально зарегистрированными и локализованными (лоцированными) с использованием пеленгационной системы местоопределения.

Современные тенденции развития и модернизации систем местоопределения грозových очагов связаны с существенным расширением зоны их оперативного обслуживания (до глобальных масштабов) при максимально возможном сохранении высокой эффективности обнаружения и точности локации отдельных молниевых разрядов. Среди различных систем пассивной локации гроз, используемых в последние десятилетия, наивысшей точностью характеризуются разностно-дальномерные системы местоопределения (РДСМ). Несмотря на то, что для их развертывания и эксплуатации требуется большее, чем у других систем, количество разнесенных пунктов регистрации атмосфериков, кроме того, более высокие требования предъявляются к точностям дискретизации сигналов, их синхронизации и временной привязки, именно эти системы получают наибольшее распространение. В большинстве существующих РДСМ поступающая в центральный пункт обработки информация ограничивается передачей из периферийных пунктов лишь отдельных параметров принятого сигнала, а не полного набора его оцифрованных дискретных отсчетов. Одним из важнейших передаваемых параметров, необходимого для определения местоположения молниевого разряда, является время прихода соответствующего ему электромагнитного сигнала, оцениваемое в абсолютной временной шкале по той или иной его характерной точке. Точность этой оценки зависит от многих факторов. Один из наиболее существенных связан с особенностями трансформации волновой формы ЭМИ разряда (атмосферика) при распространении в волноводном канале Земля-ионосфера. Достаточно подробный анализ влияния этого фактора на точность местоопределения в средней и дальней зонах распространения содержится в работе [1]. При большом разnose пунктов регистрации возможно появление особенно значительных ошибок (достигающих нескольких десятков микросекунд), связанных с неоднозначностью выбора характерной точки. Для их устранения (или существенного уменьшения) в последние годы предлагается способ, основанный на использовании банков эталонных (канонических) форм атмосфериков, сформированных тем или иным способом на разных удалениях от излучателя и для различных условий распространения. Путем сопоставления регистрируемых атмосфериков с эталонными формами сигналов, выбранными из банка волновых форм в соответствии с значениями текущего времени и направления прихода принятых сигналов, предполагается получить однопунктовую оценку дальности с точностью, позволяющей исключить неоднозначность привязки и, по возможности, путем введения соответствующих поправок, уменьшить влияние на точность местоопределения эффектов распространения.

В публикациях [2, 3] банки канонических форм предлагается формировать по экспериментальным данным регистрации атмосфериков. Так, в работе [3] приведены иллюстрации канонических форм атмосфериков, полученных усреднением сигналов, зарегистрированных в течение одного летнего грозового сезона в интервале расстояний от 250 км до 4000 км (с градациями по дальности 250 км), с помощью американской разностно-

дальномерной системой NLDN из выделенных из грозových очагов, соответствующих указанным выше градациям.

В публикации [4] предложен альтернативный способ формирования банков канонических форм, получаемых путем численных расчетов форм атмосфериков с интервальными значениями параметров трасс распространения и расстояний с использованием в качестве исходного массива банка усредненных типовых форм, полученных по экспериментальным данным регистрации атмосфериков в ближней зоне в течение грозového сезона 2001 года. Достаточно жесткие ограничения на пространственное положение источников атмосфериков (50...110 км от пункта регистрации) и временной интервал обработки каждого атмосферика (не превышающий 300 мкс от начала сигнала) позволяют использовать эти формы в качестве вторых производных дипольного момента для последующих расчетов. В процессе обработки экспериментальных сигналов было выделено четыре типа усредненных волновых форм. Образцы трех из них (типы 1, 2, 3) представлены на рис. 1а. (без указания интервальных оценок, характеризующих статистический разброс). Оценки максимумов взаимно-корреляционных функций для приведенных кривых меняются в пределах от 0,3 до 0,9. Тип 2а, приведенный на рисунке, получен в соответствии с процедурой обработки, описанной ниже и дополняет ансамбль волновых форм, полученный ранее.

Для численных расчетов волновых форм атмосфериков в произвольных (заданных) условиях распространения использовалась программа, разработанная В.И. Ивановым с использованием алгоритма, основанного на представлении поля в виде разложения по нормальным волнам.

Рис.1б иллюстрирует волновые формы атмосфериков приведенных на рис.1а типов, пересчитанных с использованием указанной программы на расстояние 2000 км для ночных условий распространения. Фильтрующие свойства трассы распространения приводят к тому, что взаимная корреляция дальних атмосфериков оказывается заметно большей, чем ближних. Так, для приведенных на рис.1б волновых форм интервал максимальных значений взаимной корреляции между кривыми сужается до 0,51...0,93.

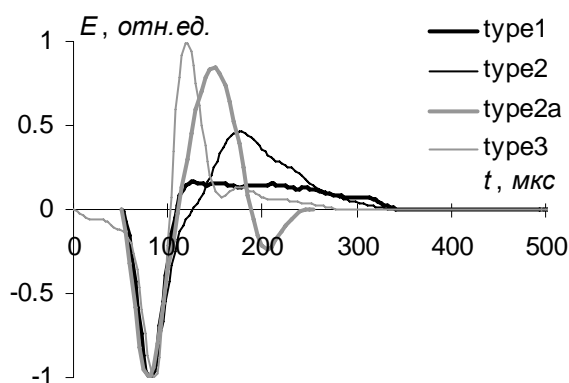


Рис. 1а. Усредненные волновые формы ближних атмосфериков различных типов (нормированные по максимальной полуволне).

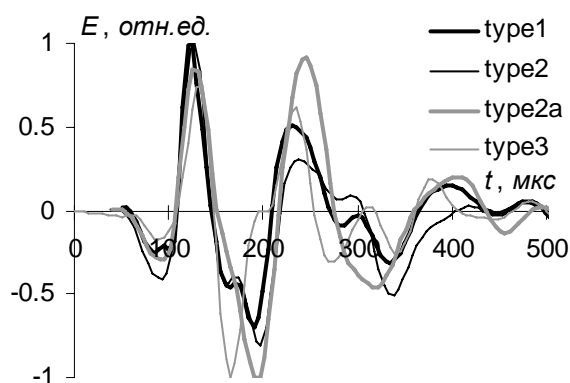


Рис. 1б. Волновые формы усредненных атмосфериков различных типов, пересчитанные на расстояние 2000 км для ночных условий распространения

Качество формирования банков волновых форм, полученных пересчетом канонических форм ближней зоны, зависит от степени их адекватности реальным атмосферикам, точности проводимых численных расчетов, адекватности модельных представлений трассы распространения. Чтобы получить реальную оценку этого качества и оценить возможность использования рассчитанных банков волновых форм для практических приложений, было проведено сопоставление рассчитанных волновых форм с данными экспериментальной регистрации дальних атмосфериков, проведенной в грозовой сезон 2001 г., с использованием

двухпунктовой пеленгационной системы местоопределения (ПСМ), развернутой в пунктах: SPb с координатами 60°с.ш. 30°в.д. и LM с координатами 43,5°с.ш. 5,5°в.д. Большая база между пунктами (2450 км) позволяет перекрыть практически всю территорию Западной Европы.

Достаточно высокий порог регистрации в пункте LM (300 мВ/м), выбранный, исходя из потребностей испытываемого в то время однопунктового грозопеленгатора- дальномера ближней зоны, обеспечивал точность пеленгования сигналов используемыми импульсными пеленгаторами около 1-2° и соответственно точность локации отдельных разрядов 50-70 км на удалениях до 2000 км. Для обработки данных регистрации выделялись отдельные грозовые комплексы в зонах, обеспечивающих точность местоопределения, близкую к максимальной для данной системы. На рис.2, имеющем иллюстративный характер, приведена карта Европы с пунктами регистрации, обозначенными точками и грозовыми комплексами, выделенными из общей грозовой обстановки за 6, 8 и 9 июля 2001 г. и помеченными соответственно индексами 1, 2, 3.

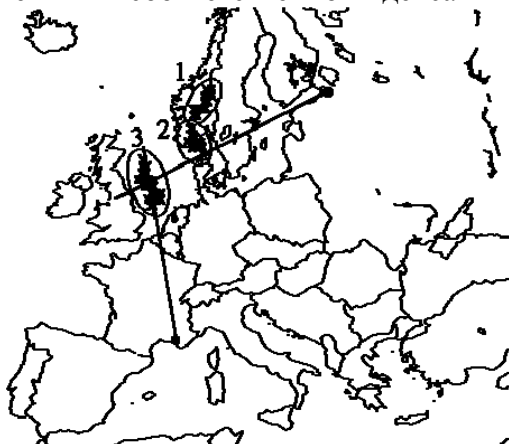
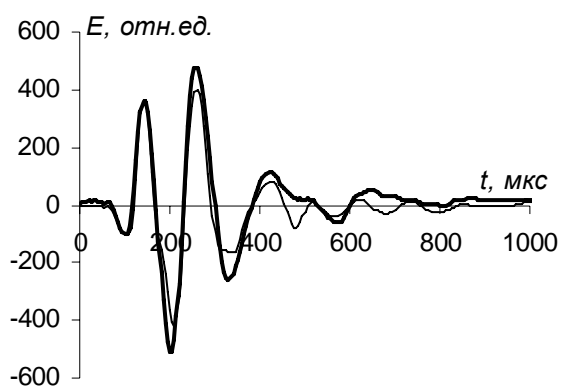
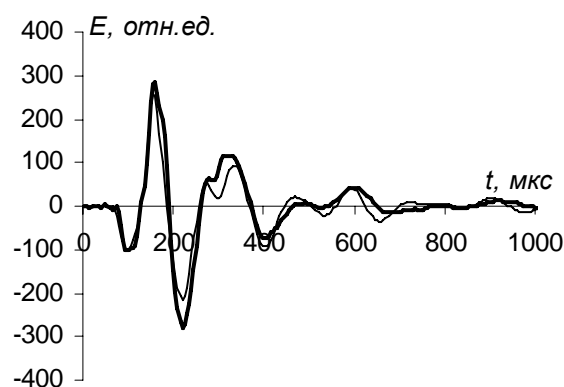


Рис.2 Конфигурация ПСМ и выделенные грозовые очаги 1, 2, 3, зарегистрированные соответственно 6-07, 8-07 и 9-07-2001

Особенность этих комплексов состоит в том, что они представляют собой последовательно развивающиеся в течение достаточно длительного времени грозовые очаги, что позволило оценить изменение усредненных волновых форм и их структуры практически в полном цикле суточных вариаций. Также в основном иллюстративный характер имеют данные сопоставления волновых форм, приведенные на рис. 3, 4 для сигналов, синхронно зарегистрированных в пунктах LM и SPb.



LM 06-07-2011, 22:30:54UT



SPb 07-07-2011, 02:30:54LT

Рис.3 Волновые формы, рассчитанные для исходного сигнала типа 2а (тонкие кривые) и экспериментальные атмосферники (жирные кривые), синхронно зарегистрированные на удалениях 2140 км (LM) и 950 км (SPb).). Значения расстояний, полученные в процессе минимизации, составили соответственно 2200 и 1000 км.

Сопоставление экспериментальных и расчетных волновых форм и минимизация расхождений осуществлялась в метрике  $L_2$  по специальной программе, в которой расчет волновых форм проводился с последовательным перебором типовых форм из ансамбля, представленного на рис.1а для условий распространения, соответствующих времени регистрации и азимуту на источник, расстояния варьировались в интервале от 50 до 3000 км

с шагом 50 км. На рисунках 3-4 приведены иллюстрации такого рода сопоставления для различных дней. Оказалось, что в первом случае (рис.3) минимум достигается для типовой формы 2а, а во втором случае (рис.4) – для более короткой формы типа 3. В обоих случаях для улучшения соответствия форм и величин расстояний до источника, измеренных системой и оцененных в процессе минимизации пришлось увеличить высоту ионосферного профиля на 5 км.

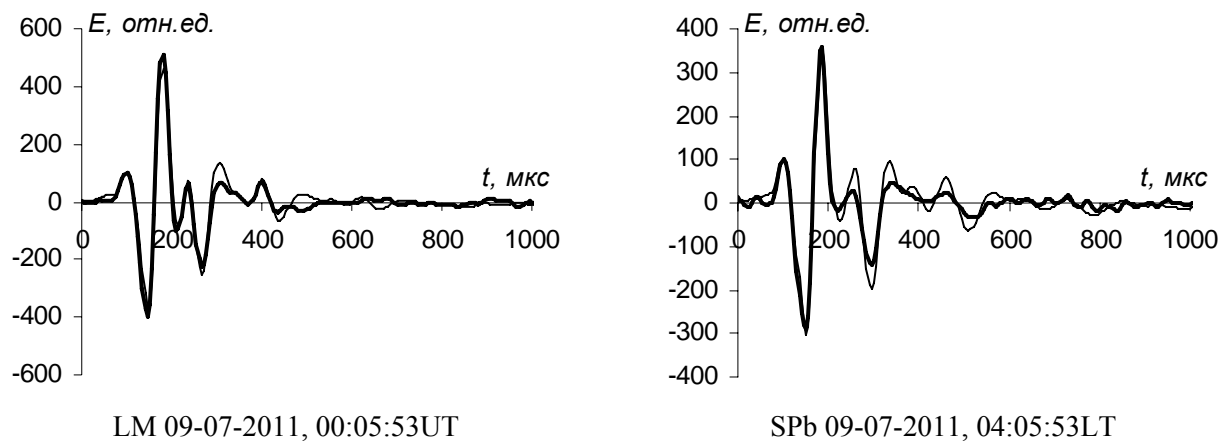


Рис.4 Волновые формы, рассчитанные для исходного сигнала типа 3 (тонкие кривые) и экспериментальные атмосферерики (жирные кривые), синхронно зарегистрированные 09-07-2011 на удаленностях 1700 км (LM) и 1190 км (SPb). Значения расстояний, полученные в процессе минимизации, составили соответственно 1750 и 1250 км.

В целом по результатам сопоставлений можно сделать вывод, что рассматриваемая методика подтвердила свою эффективность и достаточно высокую точность местоопределения, позволяющую использовать ее как для целей однопунктовой дальнометрии с ожидаемой точностью 5-10%, так и в структуре программного обеспечения РДСМ.

В то же время необходимо признать, что полученные результаты, в силу отмеченных выше недостатков, носят предварительный характер как с точки зрения полноты ансамблей усредненных волновых форм ближней зоны, так и их пересчитанных на большие расстояния эквивалентов и работа по формированию базы данных ближней зоны должна быть продолжена.

#### Литература

1. Иванов В.И., Крутой Д.М., Юсупов И.Е. Систематические ошибки местоопределения грозных очагов // Сб. трудов XVII Междунар. Конф. «Радиолокация, навигация, связь», 2011, т.3, С. 1990-2002.
2. Rayan K.S. Long-range lightning detection and characterization system and method. Patent US PTO 12/152896 from 05/12/2008.
3. Said R. K., Inan U. S., Cummins K. L. Long-range lightning geolocation using a VLF radio atmospheric waveform bank. // Journal of Geophysical Research, 2010, Vol. 115, D23108, doi:10.1029/2010JD013863.
4. Кононов И.И., Юсупов И.Е. Канонические волновые формы сильноточных компонент молниевых вспышек. // Тезисы докладов XVI Региональной конференции по распространению радиоволн. С-Петербург. 2010. С.165-168.