

УДК 551.594

МИЛЛИМЕТРОВОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВОЗВРАТНОГО УДАРА МОЛНИИ

В. Ф. Федоров, Ю. А. Фролов, П. О. Шишков

Московский государственный инженерно-физический институт, 115409 Москва

Приводятся результаты регистраций импульсных микроволновых излучений возвратного удара молниевых разрядов с использованием радиометра на длине волны 8 мм с высоким временным разрешением. Кратко описана методика регистрации импульсных излучений в миллиметровом диапазоне длин волн. Показано, что сложная форма регистрируемых импульсов обусловлена особенностями токовой системы в пределах антенного пятна при молниевом разряде в начальной стадии возвратного удара.

Введение. В последние годы интенсивно развивается микроволновая радиометрия. Микроволновые приборы используются в навигации, медицине, при решении ряда задач экологии атмосферы, дистанционном зондировании, для обнаружения и определения параметров различных объектов по их радиотепловому излучению и т. д. Особенно широко волны миллиметрового диапазона применяются в системах связи [1].

Как известно, молниевые разряды создают основные помехи при приеме радиоизлучения [2, 3], поэтому актуальным является определение форм и параметров электромагнитных излучений миллиметрового диапазона молний.

Максимум энергии электромагнитного импульса (ЭМИ) молнии лежит в диапазоне очень низких частот и соответствует стадии возвратного удара. При этом испускается несколько дискретных ЭМИ, характеристики которых связаны с макропараметрами молнии [4–7].

При увеличении частоты число импульсов в разряде возрастает, а максимальная амплитуда сигнала уменьшается. При частоте примерно 10 кГц и выше напряженность электрического поля изменяется с частотой ν по закону $1/\nu^\beta$, где $\beta = 1 \div 2$ в зависимости от характера изменения тока и геометрии источника [5]. В высокочастотной области спектра ЭМИ возрастает роль ступенчатого и стреловидного лидеров в генерации сигнала. В [4] приведены результаты измерений микроволнового излучения молнии на частотах 0,42 и 0,85 ГГц. Предполагалось, что это излучение возникает при пробое воздуха в основном в грозовом облаке и канале молнии.

Таким образом, так как длительность ожидаемого импульса порядка 10 мкс и менее, регистрация микроволнового излучения молнии в миллиметровом диапазоне возможна лишь импульсными радиометрами с постоянной времени порядка 1 мкс и менее. В миллиметровом диапазоне имеется четыре окна прозрачности воздуха. С учетом ослабления микроволнового излучения в дожде, возрастающего с уменьшением длины волны, для приема излучения молнии целесообразно использовать наиболее длинноволновое окно прозрачности с центром, соответствующим $\lambda \approx 8$ мм. Если с ростом частоты уровень сигнала уменьшается, ожидаемый сигнал является слабым. Следовательно, необходимо использовать антенну с большим коэффициентом усиления и узкой диаграммой направленности, что, однако, существенно уменьшает вероятность регистрации, так как радиометр регистрирует сигнал только тогда, когда источник оказывается в пределах антенного пятна,

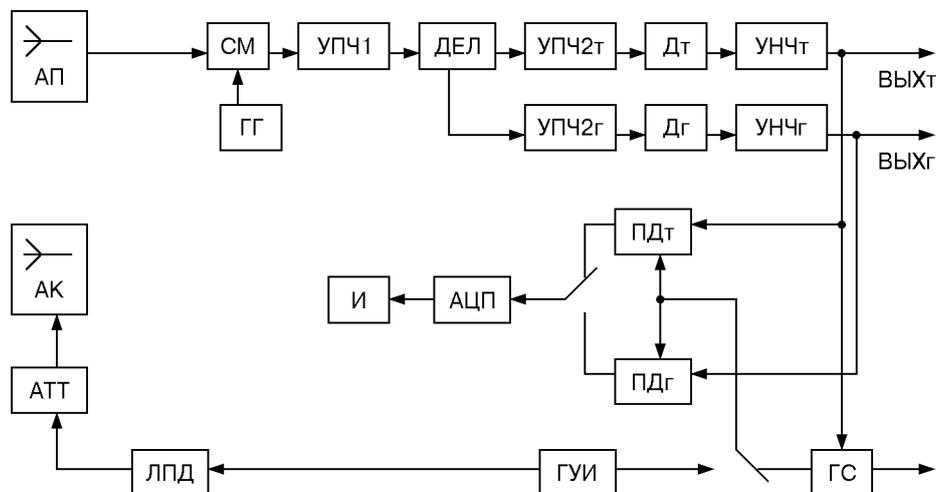


Рис. 1. Структурная схема радиометра:

АП — приемная антенна; ГГ — генератор на диоде Ганна ($\lambda \approx 8$ мм); СМ — смеситель; УПЧ1 — предварительный усилитель промежуточной частоты; ДЕЛ — делитель сигнала на два канала (точный и грубый) с десятикратным отношением амплитуд; УПЧ2т и УПЧ2г — основные усилители промежуточной частоты в точном и грубом каналах; Дт и Дг — квадратичные детекторы точного и грубого каналов; УНЧт и УНЧг — усилители низкой частоты точного и грубого каналов; ПДт и ПДг — пиковые детекторы точного и грубого каналов; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; И — семисегментные индикаторы; ГС — генератор синхроимпульсов с амплитудным селектором; ГУИ — генератор управляющих импульсов; ЛПД — лавинно-пролетный диод; АТТ — attenuator установки шумовой температуры; АК — антенна калибровочная

что происходит очень редко. Таким образом, малая длительность, низкий уровень сигнала и неопределенность положения источника затрудняют регистрацию микроволнового излучения молнии в миллиметровом диапазоне. В данной работе приводятся результаты наблюдений импульсных микроволновых излучений молниевых разрядов с помощью радиометра миллиметрового диапазона с высоким временным разрешением.

Аппаратура и методика регистрации. Для проведения экспериментальных исследований разработан радиометрический комплекс, состоящий из блока питания, блока управления, супергетеродинного радиометра компенсационного типа, работающего на длине волны 8 мм с постоянной времени 1 мкс, и параболической зеркальной антенны с рупорным облучателем. Эффективная площадь антенны составила $0,12 \text{ м}^2$ с угловой шириной диаграммы направленности по уровню 0,5 порядка $1,4^\circ$. Характеристики радиометрического комплекса и функциональная схема приведены в [8, 9]. Упрощенная структурная схема радиометра представлена на рис. 1.

Основное назначение прибора — регистрация коротких всплесков электромагнитного излучения длительностью от 1 мкс до 0,01 с, поэтому на выходе прибора сигнал от медленно меняющихся источников и помех отсутствует (нет постоянной составляющей). Поступающий в приемную антенну импульсный сигнал от источника смешивается в смесителе с сигналом местного гетеродина на частоте 37,5 ГГц, и разностная частота в диапазоне от 0,1 до 1,6 ГГц усиливается в предварительном усилителе промежуточной частоты УПЧ1, который и определяет полосу промежуточных частот. Таким образом приемник регистрирует верхнюю и нижнюю боковые полосы, общая ширина полосы регистрируемых частот составляет 3,2 ГГц. Сигнал с выхода УПЧ1 делится делителем на два канала (точный и грубый) с целью увеличения динамического диапазона прибора и поступает на основные усилители промежуточной частоты УПЧ2т и УПЧ2г. Усиленный ими сигнал

детектируется квадратичными детекторами Дт и Дг, поскольку необходимо, чтобы выходной сигнал был пропорционален не напряженности электрического поля, а его мощности и, следовательно, температуре. Далее сигнал усиливается усилителями низкой частоты УНЧт, УНЧг без постоянной составляющей, которые определяют постоянную времени прибора и предельную длительность регистрируемых импульсов. С выходов УНЧ сигнал поступает на пиковые детекторы ПДт, ПДг, запоминающие максимальную величину принятого импульса, и затем на аналого-цифровой преобразователь АЦП и цифровой индикатор И. Переключатель позволяет регистрировать показания точного или грубого канала. Запуск пиковых детекторов осуществляется с помощью генератора управляющих импульсов ГУИ или генератора синхроимпульсов ГС с амплитудным селектором. ГС вырабатывает синхроимпульс при превышении порогового уровня сигнала на выходе точного канала, что обеспечивает запуск пиковых детекторов. Поскольку в данном приборе постоянная составляющая отсутствует, калибровочный сигнал должен представлять собой импульсы необходимой длительности, что достигается управлением генератором шумового сигнала на лавинно-пролетном диоде ЛПД с помощью ГУИ. Установка необходимой шумовой температуры осуществляется с помощью аттенюатора АТТ на пин-диоде. Для подключения внешних устройств регистрации радиометр снабжен аналоговыми выходами точного и грубого каналов и выходом синхроимпульса для запуска внешнего устройства.

С помощью разработанной аппаратуры предварительно были проведены лабораторные эксперименты по регистрации импульсного микроволнового излучения, генерируемого потоком высокоэнергетических электронов, при лазерной вспышке, взрыве проволок, пробое воздуха высоковольтным разрядом. Разработана и апробирована методика оценки спектральной интенсивности микроволнового излучения по известному импульсу тока источника [8–11].

Эксперименты по регистрации импульсного микроволнового излучения молний были начаты в 1996 г. Методика экспериментов состояла в следующем. Антенная система располагалась на высоте около 3 м и во время регистрации находилась либо в покое, либо непрерывно поворачивалась. В последнем случае антенное пятно непрерывно перемещалось по грозовому облаку. При полевых измерениях регистрировался максимальный уровень импульса вертикально поляризованного излучения двумя каналами регистрации (грубым и точным).

Регистрируемая действующая температура радиометра

$$T_d = T_a + T_{ш},$$

где $T_a = I_\nu S_{eff} / (2k)$ — антенная температура; I_ν — спектральная интенсивность; S_{eff} — эффективная площадь антенны; k — коэффициент Больцмана; $T_{ш}$ — эффективная шумовая температура радиометра. При включении точного канала $T_{ш} \approx 1200$ К.

Одновременно на коротких волнах регистрировался радиосигнал от молнии и проводились наблюдения оптического сигнала. По запаздыванию звукового сигнала относительно радиосигнала от молниевых разрядов оценивалась дальность источника с учетом направления приема микроволнового излучения. В 1996 г. в семи событиях при молниевых разрядах показания радиометра от грозового облака при отсутствии дождя в пункте наблюдения превышали фоновые значения. Основные результаты регистрации приведены в [12].

Эксперименты были продолжены летом 1997 г. по измененной методике (регистрация микроволнового излучения от канала возвратного удара). Ожидался максимальный уровень сигнала, поскольку максимальные токи соответствуют именно этой стадии. Заранее вблизи пункта регистрации на расстоянии приблизительно 900 м был выбран высотный металлический объект. Антенна была нацелена на область над объектом, размер антенного пятна составлял примерно 40 м. Было зарегистрировано шесть близких молний, причем

Дата и время события (ггммддччмм)	T_d , отн.ед.	L , км	T_a , К
9607281408	30	—	600
9608031812	52	≈ 3	1900
9608031813	65	≈ 3	2700
9608031909	61	—	2500
9708070108	42	—	1300
9708070110	133	$\approx 0,35$	6800
9708070117	66	$\approx 0,9$	2800
9708070119	68	$\approx 0,9$	2900
9807271539	29	—	500
9808101721	31	—	600
9908201607	40	≈ 5	1200
9908201609	38	≈ 5	1100

7 августа 1997 г. в 1 ч 10 мин источник сигналов оказался расположенным существенно ближе (произошел разряд на вершину дуба), хотя и в том же направлении. Данные регистрации с включенным точным каналом приведены в таблице. Следует отметить, что регистрация 7 августа 1997 г. проведена во время ливня через мокрое стекло толщиной 3,5 мм. Расстояние до источника определено путем измерения расстояния до места удара молнии.

Позднее были проведены лабораторные исследования прохождения 8-миллиметрового излучения через мокрое стекло толщиной 3,5 мм. При этом коэффициент пропускания был равен 0,2, коэффициент поглощения — 0,4, коэффициент отражения — 0,4.

В 1998–1999 гг. в основном регистрировались форма и длительность микроволнового излучения молнии. Лишь 20 августа 1999 г. были четко зарегистрированы два почти одинаковых по форме сигнала от верхней части канала возвратного удара молний, наблюдаемых на расстояниях порядка 5 км и менее. Сигнал оказался сложным, состоящим из серии одиночных импульсов с длительностью, превышающей 5 мкс, частично накладываемых друг на друга (рис. 2, *a*). Общая длительность составила примерно 60 мкс. В обоих случаях наибольшую амплитуду имел не первый начальный импульс, а второй.

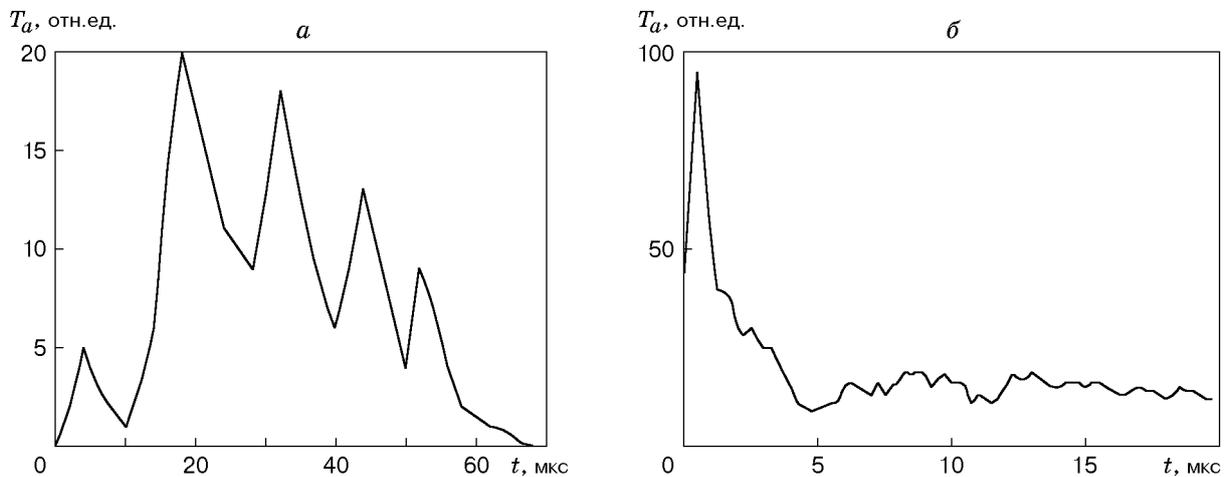


Рис. 2. Зависимость интенсивности микроволнового излучения молниевых разряда (*a*) и высоковольтного разряда в воздухе (*b*) от времени

Амплитуда второго импульса примерно в четыре раза превысила амплитуду начального. По-видимому, сложная форма сигнала объясняется тем, что в пределах антенного пятна в момент регистрации оказался ветвистый канал молнии, имеющий сложную геометрию. Для сравнения на рис. 2,б приведена форма сигнала от одиночного разряда в воздухе. На рис. 2 по оси ординат отложена антенная температура в относительных единицах (значению 100 соответствует значение примерно 6000 К). Сигналы зарегистрированы от перемещающегося в северо-восточном направлении грозового облака в моменты световой вспышки в отсутствие дождя в пункте наблюдения через открытое окно. Антенна была нацелена на облако под углом примерно 45° . Обнаружено возрастание уровня фона (примерно на 10 %) от грозового облака даже в отсутствие видимого молниевых разряда. По-видимому, это связано с внутриоблачными разрядами, не сопровождающимися световыми вспышками.

Обсуждение результатов. Если с ростом частоты сигнала максимальная амплитуда напряженности убывает обратно пропорционально частоте [4], то спектральная интенсивность и антенная температура убывают обратно пропорционально квадрату частоты. В соответствии с результатами теоретических исследований такая зависимость когерентного излучения может быть обусловлена резкими изменениями возникающего тока электронов на фронте импульса тока. Для грубой теоретической оценки уровня микроволнового излучения молнии воспользуемся методикой, разработанной в [10] для оценки когерентного сигнала от потока высокоэнергетичных электронов. В соответствии с этой методикой в [9] получена формула для оценки максимальной антенной температуры радиометра (измеряемой в кельвинах)

$$T_a = \alpha F I^2 S_{eff} / (L^2 t_i \omega^2),$$

где α — коэффициент пропорциональности (в системе СИ $\alpha = 4,3 \cdot 10^{22}$); L — расстояние до источника, м; I — сила тока, А; t_i — характерное время изменения тока, с; ω — круговая частота микроволнового излучения, с^{-1} ; S_{eff} — эффективная площадь антенны, м^2 ; F — коэффициент ослабления.

Если с учетом данных [4] для грубых оценок использовать значение тока в канале возвратного удара 10–20 кА, а характерное время изменения тока примерно 40 мкс, то с помощью данной антенны на расстоянии около 0,9 км с учетом ослабления сигнала на трассе распространения во время ливня (при интенсивности дождя 80 мм/ч ослабление составляет примерно 20 дБ/км) для антенной температуры получим оценку $T_a = 4700 \div 19\,000$ К, что по порядку величины согласуется с данными эксперимента, проведенного 7 августа 1997 г. в 1 ч 17 мин, если учесть дополнительно ослабление сигнала в стекле. Для сравнения отметим, что экстраполированное на частоту 37 ГГц значение антенной температуры, вычисленное по максимальной напряженности электрического поля вертикально поляризованного излучения от молнии, по данным [4, с. 146], составляет тысячи градусов на расстоянии примерно 0,9 км с учетом ослабления сигнала во время ливня.

Таким образом, можно полагать, что при молниевых разрядах генерируется микроволновое излучение миллиметрового диапазона. Максимальная спектральная интенсивность этого излучения на расстояниях порядка нескольких километров соответствует антенной температуре несколько тысяч градусов. С учетом параметров антенны максимальная спектральная интенсивность излучения составляет более 10^7 Ян ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$). Длительность сигнала составляет 20–60 мкс. По нашему мнению, зарегистрированные сигналы обусловлены импульсами тока, возникающими в проводящем канале при возвратном ударе. При приеме волн миллиметрового диапазона молнии являются радиопомехой лишь на расстояниях менее 5 км.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров Р. П., Самойлов С. И., Соколов А. В. Применение миллиметровых волн в системах связи // Зарубеж. радиоэлектрон. 1999. № 10. С. 60–71.
2. Качурин Л. Г., Дивиденский Л. И., Иванов Б. Д. и др. Активно-пассивная радиолокация грозových очагов // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24, № 6. С. 601–612.
3. Степаненко В. Д., Гальперин С. М. Радиотехнические методы исследования гроз. Л.: Гидрометеиздат, 1983.
4. Юман М. А. Молния. М.: Мир, 1972.
5. Lin Y. T., Uman M. A., Standler R. B. Lightning return stroke models // J. Geophys. Res. 1980. V. 85, N C3. P. 1571–1583.
6. Горбачев Л. П., Федоров В. Ф. Об электромагнитном излучении возвратного удара молнии // Геомагнетизм и аэрномия. 1977. Т. 17. С. 954–956.
7. Vecchi G., Labate D., Canavero F. Fractal approach to lightning radiation on a tortuous channel // Radio Sci. 1994. V. 29, N 4. P. 691–704.
8. Федоров В. Ф., Фролов Ю. А., Шишков П. О. и др. О микроволновом излучении взрывающихся проволочек // Письма в ЖТФ. 1993. № 24. С. 3–5.
9. Горбачев Л. П., Соколов В. Б., Федоров В. Ф. и др. Исследование импульсных микроволновых излучений радиометрическим методом. М., 1993. (Препр. / Моск. гос. инж.-физ. ин-т; 014-93).
10. Федоров В. Ф. Электромагнитный импульс в микроволновом диапазоне, возбуждаемый асимметричным нестационарным источником гамма-излучения // Радиофизика. 1991. Т. 34, № 10/12. С. 1116–1119.
11. Горбачев Л. П., Новиков С. В., Соколов В. Б. и др. О микроволновом излучении в процессах электрического взрыва проводников // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 1. С. 3–5.
12. Fyodorov V. F., Frolov Yu. A., Shishkov P. O. Microwave radiation of lightning discharge // Proc. of the Intern. symp. of EMC, Rome, Italy, Sept. 14–18, 1998. Rome: Artigiana Multistampa, 1998. P. 120–122.

*Поступила в редакцию 28/II 2000 г.,
в окончательном варианте — 7/VIII 2000 г.*
