

Особенности коронного разряда в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения

Д.В. Рыбка¹, М.В. Тригуб^{2,3}, Д.А. Сорокин¹,
Г.С. Евтушенко², В.Ф. Тарасенко^{1,2*}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 15.10.2013 г.

Исследовано формирование и распад диффузных «каналов» коронного разряда в воздухе атмосферного давления при подаче на электрод модулированных импульсов напряжения. Для регистрации излучения из коронного разряда применялись ФЭУ, скоростная камера и лазерный монитор на основе активной среды на парах бромида меди. Показано, что излучение диффузных «каналов» коронного разряда модулировано во времени, при этом частота импульсов излучения превышает вдвое частоту модуляции импульсов напряжения (~290 кГц). Установлено, что при изгибах «канала» коронного разряда могут происходить пробой по короткому пути, что уменьшает размывание канала.

Ключевые слова: коронный разряд в воздухе атмосферного давления, формирование и распад «каналов», оптическое излучение; corona discharge in atmospheric pressure air, formation and decay of "channels", optical radiation.

Введение

Импульсные разряды, в частности молнии, постоянно происходящие в атмосфере Земли, исследуются в различных лабораториях [1]. Однако исследования атмосферных разрядов ввиду их масштабности весьма сложны, дороги и опасны. В связи с этим большое внимание уделяется изучению различных типов разрядов в лабораторных условиях [2]. Так, например, в воздухе атмосферного давления проводятся исследования коронного разряда [3–10]. Такие исследования важны при создании эффективных линий для передачи электрической энергии. Коронный разряд находит различные практические применения, например для получения тонких пленок [11], а завершённый коронный разряд используется при создании лазеров [12, 13]. Процессы, происходящие при коронном разряде с электродов в виде острия, могут быть подобны процессам, которые наблюдаются в стримерной короне лидера молнии [1].

Целью нашей работы является исследование особенностей коронного разряда в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе

напряжения длительностью 10 мс, прикладываемого к острейшему электроду в импульсно-периодическом режиме с частотой 50 Гц. В данном режиме при каждом импульсе модулированного напряжения формируется один или несколько диффузных «каналов», от которых отходят более тонкие ветви. На спаде импульса напряжения диффузные «каналы» распадаются и во время паузы между импульсами свечение газа у острия не регистрируется. Работа продолжает исследования, которые были начаты в [6–10].

Установка и методики

Коронный разряд в воздухе атмосферного давления формировался с использованием генератора импульсов высокого напряжения, который подключался к электроду в виде острия. Генератор был собран на базе трансформатора Тесла. Коммутатором служила лампа ГУ-81. Генератор формировал импульсы напряжения, состоящие из отдельных цугов длительностью ~10 мс, которые следовали с частотой 50 Гц. Каждый цуг состоял из синусоидального сигнала с частотой колебаний ~290 кГц. Высоковольтные импульсы прикладывались к цилиндрическому электроду из меди с вершиной в форме острия, который был залужен тонким слоем припоя. Диаметр электрода равнялся 3,6 мм. Данная установка описана в работе [10]. При удалении заземленного электрода на расстояние от

* Дмитрий Владимирович Рыбка (RDm@loi.hcei.tsc.ru); Максим Викторович Тригуб; Дмитрий Алексеевич Сорокин; Геннадий Сергеевич Евтушенко (ime@tpu.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

острия 40 см и более в воздухе атмосферного давления формировался коронный разряд. При меньших зазорах образовывался слаботочный искровой разряд, ток которого не превышал 10 А. Для измерения амплитуды напряжения и формы сигнала в первичной и вторичной цепи высоковольтного трансформатора использовались омические делители напряжения. Импульсы напряжения во вторичной цепи импульсного трансформатора во время формирования коронного разряда, а также центральная часть цуга импульсов приведены в работах [7, 9, 10]. Наибольшая разность между положительным и отрицательным максимумами напряжения в цуге достигала ~300 кВ.

Интегральная картина свечения разряда фотографировалась фотоаппаратом SONY A100. Для регистрации динамики излучения коронного разряда использовалась высокоскоростная камера HiSpec 1 (Fastec Imaging Company, США). Длительность каждого кадра могла изменяться от 2 до сотен микросекунд, максимальная частота съемки составляла 100 тыс. кадров в секунду. Наряду со скоростной съемкой динамика излучения регистрировалась с помощью лазерного монитора с покадровой регистрацией изображения на основе усилителя яркости на парах брома меди [14]. Временной ход импульсов излучения регистрировался ФЭУ-100. Электрические сигналы с шунтов, делителей напряжения и фотодетекторов подавались на осциллографы TDS 3054B (0,5 ГГц, 5 GS/s) или DPO 70604 (6 ГГц, 25 GS/s).

Экспериментальные результаты

Излучение коронного разряда, регистрируемое с помощью ФЭУ. На рис. 1 приведены осциллограммы импульсов на остром электроде (1), тока в первичной обмотке трансформатора (2) и излучения (3). На рис. 1, а показаны импульсы цуга, а на рис. 1, б импульсы внутри цуга. Измерения показали, что излучение коронного разряда модулировано во времени с частотой, в 2 раза превышающей модуляцию импульса напряжения.

Общая длительность импульсов излучения примерно соответствует длительности модулированного импульса напряжения. Однако осциллограмма излучения во время одного импульса напряжения длительностью 10 мкс состоит из отдельных импульсов, амплитуда которых максимальна при изменении полярности импульса напряжения. Причем при изменении импульса напряжения от отрицательной к положительной полярности амплитуда импульсов излучения в 2–3 раза больше, чем при изменении импульса напряжения от положительной к отрицательной полярности. В паузах между импульсами напряжения излучение не регистрировалось (с 9 мкс, рис. 1, а), а при подаче импульса напряжения наблюдалась задержка появления импульсов излучения. Кроме того, при появлении первых импульсов излучения, показанных на рис. 2, в момент включения генератора, видно, что они состоят из отдельных пиков длительностью около 1 мкс (рис. 2), которые затем

сливаются (см. рис. 1) в импульсы большей длительности с паузами между этими импульсами.

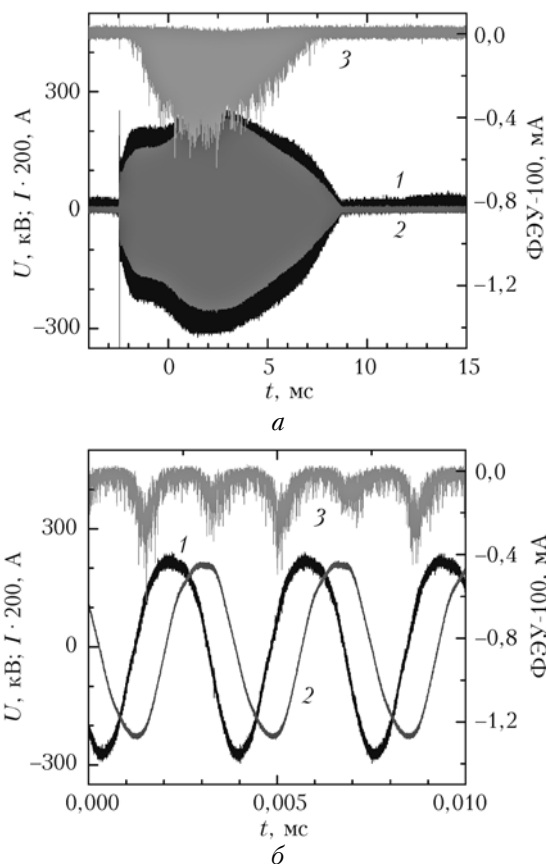


Рис. 1. Осциллограммы напряжения (1), тока (2) и светового импульса (3): а – всего цуга; б – в средней части цуга

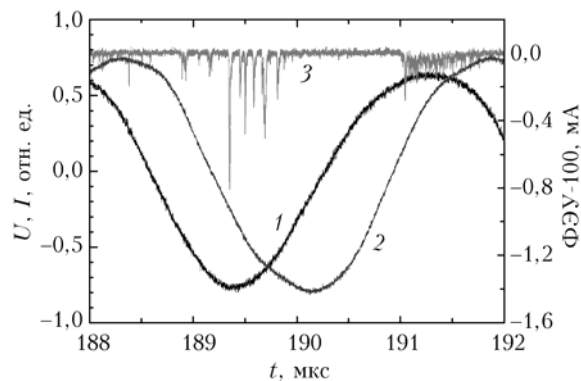


Рис. 2. Осциллограммы напряжения (1), тока (2) и светового импульса (3) во время начала формирования коронного разряда

Изменение формы «канала» коронного разряда в отдельном импульсе при временном разрешении 200 мкс. В пределах одного цуга формируется канал, состоящий из одной или нескольких ветвей (рис. 3).

При рассмотрении серии последовательно идущих кадров, снятых скоростной камерой, была рассчитана средняя скорость прорастания диффузного канала, которая превышала ~8 см/мс. Ограничение сверху (рис. 4) обусловлено размером изображения (верх канала не попадал в кадр).

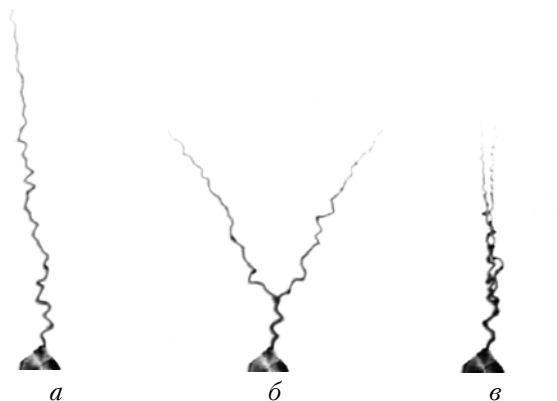


Рис. 3. Варианты развития коронного разряда в пределах одного цуга

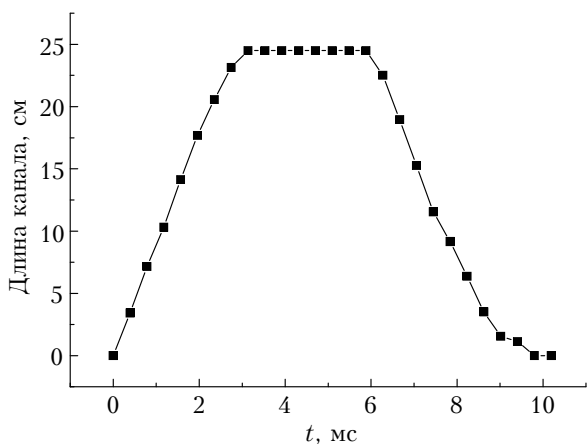


Рис. 4. Зависимость длины диффузного канала от времени

При прорастании канала образуются петли, которые могут в дальнейшем закорачиваться за счет пробоя между двумя рядом расположенными участками канала (рис. 5).

Для оценки напряжения на канале, используя результаты визуализации, представленные на рис. 5, определим падение напряжения на канале коронного разряда. Так как в нормальных условиях электрическая прочность воздуха составляет 30 кВ/см, то средняя напряженность поля в канале, рассчи-

танная по длине петли напряжения, находится в диапазоне от ~6 до ~13 кВ/см. Таким образом, если длина канала ~30 см, то падение напряжения на канале может составлять от 190 до 390 кВ, что соответствует измерениям с помощью делителя напряжения.

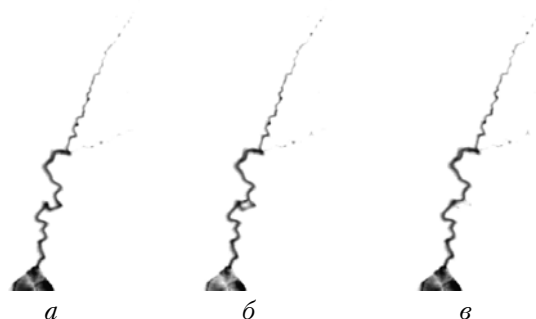


Рис. 5. Коронный разряд при пробое между двумя рядом расположенными участками канала

Визуализация разряда с помощью лазерного монитора. Для получения дополнительной информации и уточнения результатов, полученных с помощью скоростной визуализации, было решено провести визуализацию с помощью лазерного монитора с усилителем яркости на парах бромиде меди [14]. Использовалась газоразрядная трубка традиционной геометрии, диаметр активной зоны 25 мм, длина 500 мм. Для накачки усилителя яркости применялся источник питания с импульсным зарядом рабочей емкости [15], частота следования импульсов накачки составляла 24 кГц. Для увеличения контраста получаемых изображений в схему было введено зеркало (рис. 6), что позволило реализовать схему лазерного монитора в проходящем свете.

Скорость съемки составляла 2665 кадр./с, при этом каждый кадр формировался за время, соответствующее длительности импульса сверхсветимости усилителя яркости, т.е. 40 нс. На рис. 7 приведены первые 4 кадра развития разряда (до 1,125 мс). Ввиду относительно малой области зрения (21 мм) анализировался лишь начальный этап развития разряда (первые два кадра).

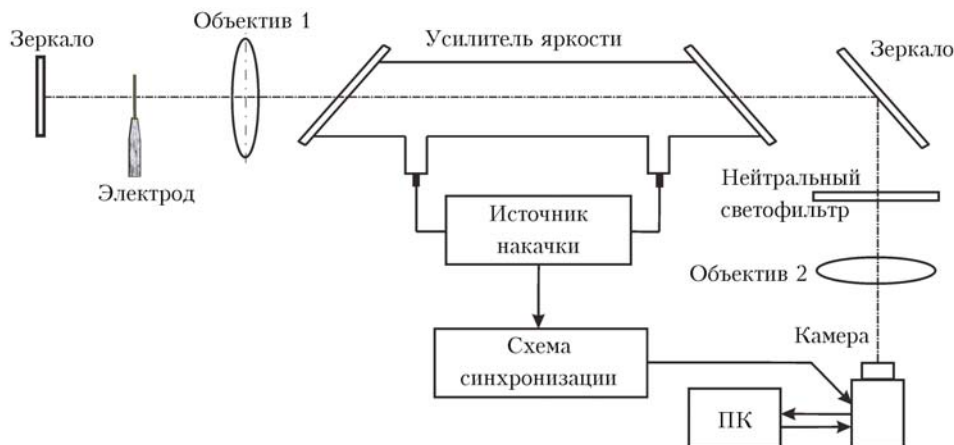


Рис. 6. Схема лазерного монитора

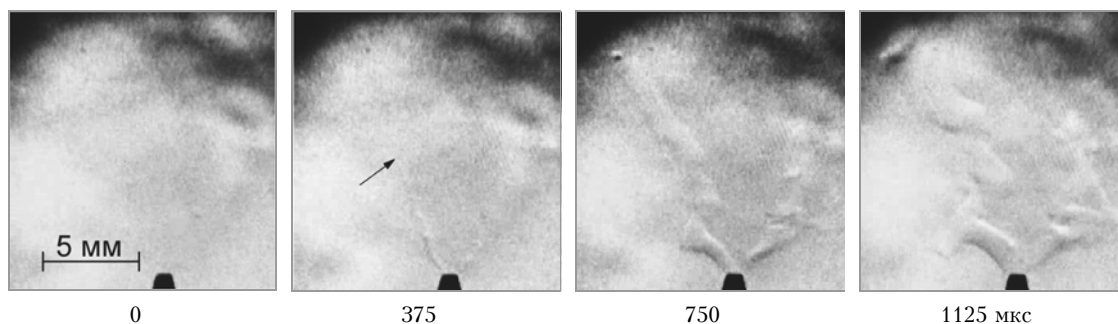


Рис. 7. Кадры визуализации разряда с помощью лазерного монитора

На втором кадре (375 мкс) наблюдается отображение градиента плотности воздуха, связанное с формированием диффузного канала, окончание которого указано стрелкой. Длина канала составляет 6–12 мм. Исходя из этого, можно оценить скорость распространения диффузного канала, которая составила ~1630 см/с. Данная скорость на порядок выше скорости теплового расширения канала, рассчитанной по результатам скоростной съемки процесса. При этом она ниже скорости прорастания канала. Разряд является «прозрачным» для излучения усилителя яркости, однако создаваемая разрядом оптическая неоднородность, обусловленная тепловым действием, распространяется со скоростью, которая меньше скорости звука в среде, и может быть зарегистрирована в лазерном мониторе. Для воздуха в нормальных условиях скорость звука ~300 м/с.

На рис. 8 показаны два кадра с оптической неоднородностью (область, отмеченная прямоугольником).

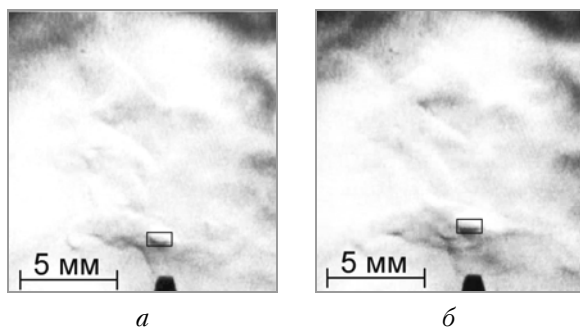


Рис. 8. Кадры визуализации разряда с помощью лазерного монитора в различные моменты времени

Временной интервал между ними составляет 375 мкс. Первый кадр соответствует времени 1,125 мс после начала разряда. Перемещение области за кадр составило 0,621 мм, следовательно, скорость движения составляет ~166 см/с. Это соответствует скорости теплового расширения.

Обсуждение полученных результатов

Проведенные исследования показали следующие новые особенности развития и распада диффузных каналов при коронном разряде. Применение модулированного импульса напряжения приво-

дит в установившемся режиме к усилению свечения канала при смене полярности напряжения. Причем при переходе от отрицательной к положительной полярности напряжения интенсивность излучения диффузного канала наибольшая (см. рис. 1). По-видимому, в этот отрезок времени наблюдается наибольшее увеличение длины диффузного канала. Можно предположить, что на скорость развития канала оказывают влияние убегающие электроны, рентгеновское излучение при торможении которых было зарегистрировано нами ранее в работе [10]. Формирование диффузного канала происходит в виде отдельных импульсов, которые хорошо видны на рис. 2.

Оценим концентрацию электронов в диффузном канале. Ток и напряжение в первичной и вторичной цепи составляют 1 А, 8,5 кВ и 30 мА и 300 кВ соответственно. Диаметр канала токопрохождения составляет ~0,2 см. Используя указанные значения тока вторичного контура и диаметра токового канала, а также формулы

$$j = i/S,$$

$$j = eN_e v_{\partial p},$$

$$v_{\partial p} = \mu_e E,$$

$$N_e = j / e\mu_e E,$$

где j — плотность тока; $v_{\partial p}$ — дрейфовая скорость; e — заряд электрона; μ_e — подвижность электронов; S — площадь поперечного сечения канала; N_e — концентрация электронов; E — средняя напряженность в канале, определим концентрацию электронов. Величина электронной плотности в токовом канале коронного разряда согласно этим оценкам составила $N_e \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Заключение

Проведенные исследования показывают сложную динамику формирования и распада «канала» коронного разряда. Установлено, что излучение диффузных «каналов» коронного разряда модулировано во времени, при этом частота импульсов излучения превышает вдвое частоту модуляции импульсов напряжения (~290 кГц). Показано, что при изгибах «канала» коронного разряда могут происходить пробои по короткому пути, а это уменьшает

размывание канала. Оценена концентрация электронов в канале, которая составила 10^{12} см^{-3} .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-00081_а.

1. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
2. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. 736 с.
3. *Akishev Yu.S., Grushin M.E., Deryugin A.A., Napatovich A.P., Pan'kin M.V., Trushkin N.I.* Self-oscillations of a positive corona in nitrogen // *J. Phys. D.* 1999. V. 32. P. 2399–2409.
4. *Афанасьев С.Б., Лавренюк Д.С., Петрушенко И.Н., Стишков Ю.К.* Некоторые особенности коронного разряда в воздухе // *Ж. техн. физ.* 2008. Т. 78, вып. 7. С. 30–34.
5. *Козырев А.В., Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Шутько Ю.В.* Генерация мягкого рентгеновского излучения и его роль в развитии пробоя воздушного промежутка при повышенных давлениях // *Письма в ЖТФ.* 2011. Т. 37, вып. 22. С. 26–33.
6. *Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Kostyrya I.D., Jiang H., Xu R., Rybka D.V., Yan P.* Generation of Runaway Electrons and X-Rays in Repetitive Nanosecond Pulse Corona Discharge in Atmospheric Pressure Air // *Appl. Phys. Express.* 2011. V. 4. P. 066001. (3 p.).
7. *Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В.* Излучение диффузного коронного разряда в воздухе атмосферного давления // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 11. С. 1009–1017.
8. *Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Rybka D.V., Kostyrya I.D., Kozhyrev A.V., Yan P., Kozhevnikov V.Yu.* Runaway electrons and X-rays from a corona discharge in atmospheric pressure air // *New J. Phys.* 2011. V. 13. P. 113305. (20 p.).
9. *Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д., Рыбка Д.В.* Пробой в воздухе атмосферного давления при наносекундной длительности импульса напряжения за счет убегающих электронов // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 1. С. 103–108.
10. *Рыбка Д.В., Андроников И.В., Евтушенко Г.С., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Тригуб М.В., Шутько Ю.В.* Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 1. С. 85–90.
11. *Thyen R., Weber A., Klages C.-P.* Plasma-enhanced chemical-vapour-deposition of thin films by corona discharge at atmospheric pressure // *Surface and Coatings Technology.* 1997. V. 97, iss. 1–3. P. 426–434.
12. *Ломаяев М.И., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф.* Излучение ВУФ-области спектра бинарных смесей аргона и гелия с ксеноном при диффузном наносекундном разряде в неоднородном электрическом поле // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 3. С. 226–229.
13. *Панченко А.Н., Панченко Н.А., Ломаяев М.И., Тарасенко В.Ф.* Лазеры УФ-, видимого и ИК-диапазона с накачкой диффузным разрядом, формируемым убегающими электронами // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 10. С. 1–5.
14. *Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н.* Лазерный монитор с возможностью покадровой регистрации изображений // *Контроль. Диагностика.* 2011. Вып. Специальный. С. 140–143.
15. *Красников И.В., Тригуб М.В., Евтушенко Г.С.* Источник накачки CuVg-лазера с импульсным зарядом рабочей емкости // *Вестник науки Сибири.* 2012. № 5 (6). С. 54–58.

D.V. Rybka, M.V. Trigub, D.A. Sorokin, G.S. Yevtushenko, V.F. Tarasenko. **Corona discharge in atmospheric pressure air when using modulated voltage pulses.**

This paper presents the formation and decay of diffuse “channels” of a corona discharge in atmospheric pressure air using modulated voltage pulses. Photomultipliers, a high-speed camera, and a copper bromide vapor laser monitor are used to register the radiation from the corona discharge. It is shown that the radiation of corona discharge diffuse “channels” is modulated in time and the pulse repetition frequency is twice as high as the voltage pulse modulation frequency (~290 kHz). It is also demonstrated that at a corona discharge channel curves the breakdowns can occur over a short distance, which reduces the blurring of the channel.