

Увеличение длины корреляции немонохроматического излучения при распространении в одномодовом волоконном световоде со случайными неоднородностями и ее влияние на работу волоконного кольцевого интерферометра

© Г.Б. Малыкин, В.И. Позднякова

Институт прикладной физики РАН,
603699 Нижний Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 23 июля 1998 г.)

Рассмотрены условия, при которых связь ортогональных поляризационных мод на случайных неоднородностях одномодовых волоконных световодов (ОВС) приводит к увеличению длины корреляции источника немонохроматического излучения. Показано, что в случае использования длинноволновых волоконных кольцевых интерферометров (ВКИ) с контуром из ОВС со слабым линейным двулучепреломлением длина корреляции немонохроматического излучения на выходе ВКИ возрастает, что позволяет реализовать удовлетворительную видность интерференционной картины даже при значительной разности плеч интерферометра, которая обусловлена эффектом Саньяка от вращения Земли. Расчеты проводились методом математического моделирования случайных неоднородностей в волокне.

Длина корреляции немонохроматического излучения является одним из важнейших параметров в оптической интерферометрии, в частности в волоконной интерферометрии. Для различных задач выгодно иметь малую или, наоборот, большую длину корреляции. Так, в волоконной оптической томографии [1] пространственное разрешение соседних слоев тканей в основном определяется длиной корреляции и для повышения разрешающей способности требуется иметь как можно меньшую длину корреляции. С другой стороны, в интерферометрах Майкельсона и Маха-Цандера с неравными длинами плеч требуется увеличение длины корреляции, в противном случае видность интерференционной картины может оказаться очень низкой.

Неравенство плеч интерферометров необязательно является следствием их недостаточной балансировки. Приведем пример, когда встречные волны в волоконном кольцевом интерферометре (ВКИ) проходят существенно различные пути. В работе [2] было предложено провести измерения предполагаемого эффекта анизотропии скорости света с помощью ВКИ, изготовленного на основе одномодового волоконного световода (ОВС), с контуром большой площади. Оценки показывают, что для достижения необходимой точности площадь контура ВКИ должна составлять не менее нескольких десятков km^2 . Поскольку ВКИ вращается вместе с Землей, то эффект Саньяка приведет к значительной разности оптических длин для встречных волн в контуре — порядка нескольких сотен микрон и видность интерференционной картины на выходе ВКИ будет очень низкой. Уменьшение видности интерференции на выходе ВКИ с широкополосным источником излучения наблюдалось в работе [3], где исследовался ВКИ со сравнительно небольшой площадью контура, но при большой угловой скорости вращения.

Цель настоящей работы — показать, что длина корреляции немонохроматического излучения, прошедшего достаточно длинный отрезок ОВС со слабым линейным двулучепреломлением, может значительно возрасти вследствие связи поляризационных мод на неоднородностях ОВС, а также рассмотреть влияние увеличения длины корреляции на работу ВКИ с контуром из ОВС со слабым линейным двулучепреломлением. Объяснить физический смысл этого явления можно следующим образом. В случае, когда выполняется условие $L \gg h^{-1}$, где L — длина волокна контура ВКИ, h — параметр сохранения поляризации в ОВС [4] (величина h^{-1} характеризует длину ОВС, на которой происходит эффективный обмен энергией между поляризационными модами), излучение, прошедшее по медленной и по быстрой осям двулучепреломления ОВС, многократно переходит из одной поляризационной моды в другую, в результате на выходе ВКИ спектральные характеристики излучения сильно изменяются по сравнению с тем, какими они были на входе ВКИ: если на входе спектр излучения имел гауссовскую форму, то на выходе он становится сильно изрезанным (сохраняя при этом прежнюю ширину), что и приводит к увеличению длины корреляции [5]. Иными словами, ОВС является двухканальной системой и каждому каналу соответствует одна поляризационная мода. В отсутствие случайных неоднородностей в ОВС эти каналы являются независимыми — обмена энергией между ними не происходит и спектральные характеристики излучения в каждой из поляризационных мод будут такими же, как и на выходе ВКИ. Однако при наличии случайных неоднородностей имеет место обмен энергией между двумя каналами, быстрой и медленной поляризационными модами, который и меняет форму спектра в каждой из поляризационных мод. При этом в отсутствие дихроизма спектр суммарной интенсивности

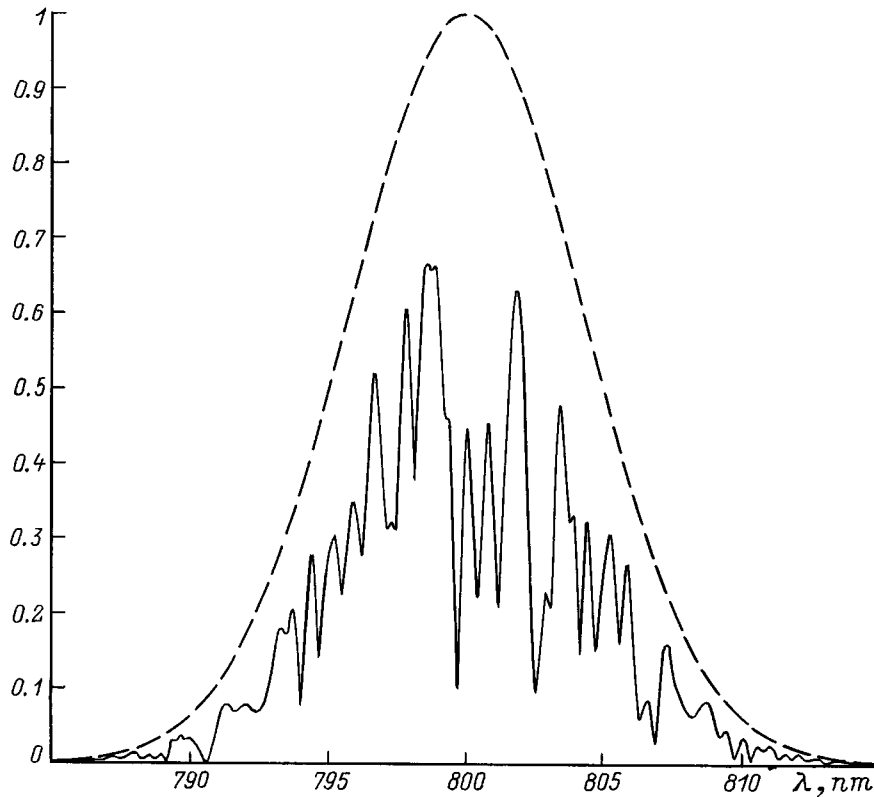


Рис. 1. Спектры излучения на входе (штриховая кривая) и выходе (сплошная кривая) ВКИ при $\varepsilon = 10^{-4}$.

обеих поляризационных мод для волны, которая распространяется в том или ином направлении в контуре ВКИ, остается неизменным и совпадает со спектром излучения на входе ВКИ. Таким образом, рассматриваемый эффект является следствием того, что ОВС, из которого изготовлен контур ВКИ, — двухканальная система, в которой из-за случайных неоднородностей имеется связь между двумя каналами.

Для того чтобы рассчитать функцию корреляции прошедшего ОВС немонахроматического излучения, выберем для описания случайных неоднородностей в ОВС модель, предложенную в нашей работе [6]. Эта модель предполагает случайное кручение осей линейного двулучепреломления ОВС, причем всю длину ОВС можно разделить на отрезки случайной длины, величина кручения на которых случайна, но постоянна. Вне зависимости от величины линейного двулучепреломления ОВС, длины случайных отрезков имеют пуассоновское распределение со средним значением 2.5 см, а величина случайного кручения равномерно распределена в интервале ± 2 rad/m. Как показано в [6], расчет зависимости величины h — параметра от линейного двулучепреломления ОВС, основанный на данной модели случайных неоднородностей, дает хорошее совпадение с экспериментами, выполненными различными авторами с различными типами ОВС. Следует отметить, что для того чтобы огибающая спектра излучения на выходе ВКИ была изрезанной, вовсе не-

обязательно, чтобы кручение осей двулучепреломления по длине ОВС имело случайный характер, оно может меняться и периодически. Однако в последнем случае зависимость видности интерференционной картины на выходе ВКИ от разности оптической длины плеч ΔL будет периодически спадать до нуля. На рис. 1 приводится вид спектра излучения на входе и выходе ВКИ. Отметим, что в случае $\varepsilon \ll 1$, когда поляризационная невзаимность ВКИ мала [7,8], вид спектров для встречных волн на выходе ВКИ практически одинаков. Отметим также, что в случае отсутствия поляризатора ($\varepsilon = 1$) форма спектра для ортогональных поляризаций в каждой из встречных волн является взаимно дополнительной и, как было отмечено выше, спектр суммарной интенсивности обеих поляризаций каждой из встречных волн совпадает со спектром излучения на входе ВКИ. Вопрос о длине корреляции немонахроматического излучения на выходе ВКИ без поляризатора в рамках данной работы не рассматривался.

Для определения длины корреляции вычислялась зависимость видности интерференционной картины на выходе ВКИ от разности оптической длины контура ВКИ ΔL для встречных волн

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1)$$

где I — интенсивность излучения на выходе ВКИ.

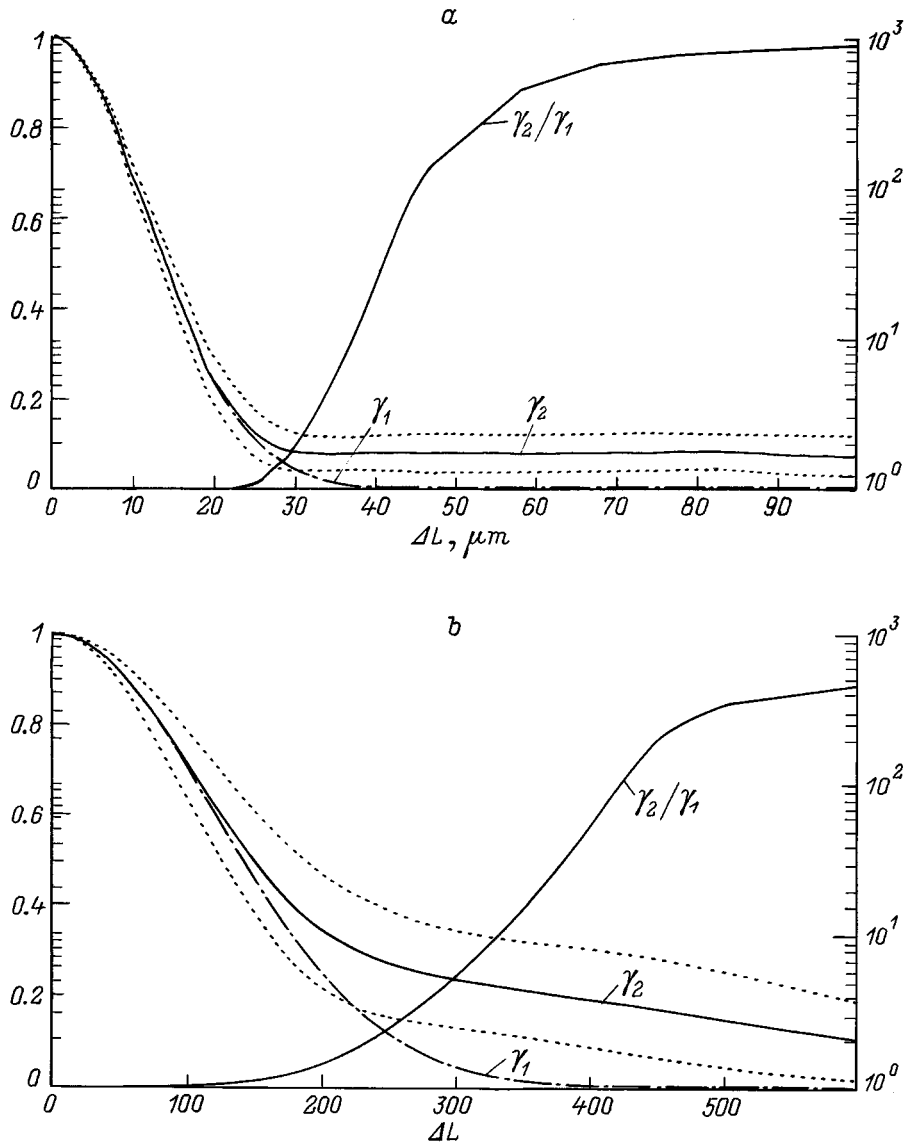


Рис. 2. Зависимость видности интерференционной картины на выходе ВКИ от разности оптических путей встречных волн, обусловленной эффектом Саньяка, для идеального ОВС без случайных неоднородностей (γ_1 — штрихпунктир) и для реального ОВС со случайными неоднородностями (γ_2 — сплошная кривая, штриховая линия — коридор возможных значений γ_2 для различных реализаций случайных неоднородностей в ОВС контура ВКИ). Длина контура 21 km, средняя длина волны источника излучения $\lambda_0 = 0.8 \mu\text{m}$, ширина линии источника излучения $\Delta\lambda = 10$ (a) и 1 nm (b).

Величина γ рассчитывалась для двух случаев: 1) контур ВКИ выполнен из волокна без случайных неоднородностей, 2) контур ВКИ выполнен из реального волокна со случайными неоднородностями. Запишем выражение для вычисления интенсивности излучения на выходе ВКИ

$$I = |E_x^+ + E_x^-|^2 + |E_y^+ + E_y^-|^2, \quad (2)$$

где $E_x^+, E_y^+, E_x^-, E_y^-$ — компоненты электрических полей встречных волн на выходе ВКИ.

Расчеты проводились для случая, когда длина контура ВКИ составляла 20 km, он был выполнен из ОВС с разностью показателей преломления в медленной и быстрой

осях линейного двулучепреломления $\Delta n = 10^{-6}$, для источника излучения с длиной волны $0.8 \mu\text{m}$ и шириной линии 10 и 1 nm. Коэффициенты экстинкции поляризатора ε составлял 10^{-4} , а азимуты осей линейного двулучепреломления на входах ВКИ α_1 и α_2 совпадали с направлением пропускания поляризатора. Построенная в соответствии с выражением (2) зависимость I от ΔL имеет характер затухающих колебаний с периодом, равным длине волны, на фоне постоянной подставки. Величины I_{max} и I_{min} определялись как максимум и минимум кривой на периоде. Результаты численного моделирования показали, что спектр излучения на выходе ВКИ, как и ожидалось, оказался сильно изрезанным.

На рис. 2 приводятся зависимости $\gamma(\Delta L)$. Из рис. 2, *a* видно, что при ширине полосы источника излучения 10 nm до разности оптических длин $\Delta L \sim 25 \mu\text{m}$ видность интерференционной картины на выходе ВКИ не зависит от наличия случайных неоднородностей в ОВС, при больших ΔL видность интерференционной картины на выходе ВКИ с контуром из ОВС со случайными неоднородностями существенно больше (примерно в тысячу раз), чем в случае ОВС без случайных неоднородностей. При ширине полосы источника излучения 1 nm (рис. 2, *b*) вплоть до $\Delta L \sim 220 \mu\text{m}$ видность интерференционной картины при наличии случайных неоднородностей в ОВС несколько меньше, чем в случае ОВС без случайных неоднородностей, но затем она становится существенно больше (примерно в пятьсот раз).

Основной результат работы заключается в том, что с помощью численного моделирования случайных неоднородностей в ОВС показано, что длина корреляции излучения, прошедшего контур ВКИ из ОВС со случайными неоднородностями, значительно превышает длину корреляции излучения при отсутствии случайных неоднородностей в ОВС. Это позволяет использовать источники немонахроматического излучения в неравноплечных волоконных интерферометрах, изготовленных на основе ОВС со слабым линейным двулучепреломлением, и получать при этом удовлетворительную видность интерференционной картины. Наличие случайных неоднородностей в ОВС контура ВКИ приводит к появлению дополнительного, не связанного с вращением фазового дрейфа интерференционной картины на выходе ВКИ, который, как показывают результаты теоретических [7,8] и численных расчетов [9], по порядку величины не превышает ϵ , что требует поддержания стабильной температуры волокна, в противном случае фаза интерференции встречных волн будет меняться с изменением температуры. Таким образом, наличие случайных неоднородностей в ОВС, с одной стороны, ухудшает характеристики ВКИ, поскольку приводит к дополнительному сдвигу нуля, а с другой стороны, позволяет получить удовлетворительную видность интерференционной картины при наличии невязимых эффектов, приводящих к разности оптических путей для встречных волн.

В заключение авторы выражают благодарность И.А. Шерешевскому за обсуждение результатов работы.

Работа частично поддержана грантом № 96-15-96742 РФФИ.

Список литературы

- [1] Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Гладкова Н.Д. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 61. Вып. 2. С. 149–153.
- [2] Scully M.O., Zubairy M.S., Haugan M.P. // Phys. Rev. 1981. Vol. A24. N 4. P. 2009–2016.
- [3] Burns W.K., Moeller R.P. // J. Lightwave Techn. 1987. Vol. LT-5. N 7. P. 1024–1025.

- [4] Rashleigh S.C. // J. Lightwave Techn. 1983. Vol. LT-1. N 2. P. 312–331.
- [5] Борн М., Вольф Э. // Основы оптики. М.: Наука, 1972. 719 с.
- [6] Малыкин Г.Б., Позднякова В.И., Шерешевский И.А. // Опт. и спектр. 1997. Т. 83. N 5. С. 843–852.
- [7] Козел С.М., Листвин В.Н., Шаталин С.В., Юшкайтис Р.В. // Опт. и спектр. 1986. Т. 61. № 6. С. 1295–1299.
- [8] Малыкин Г.Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 7. С. 817–824.
- [9] Малыкин Г.Б., Позднякова В.И. // Опт. и спектр. 1997. Т. 84. № 1. С. 145–151.