

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

Достижима ли идеальная невидимость даже при монохроматическом излучении?

Н.Н. Розанов

Обсуждаются выводы статьи А.Е. Дубинова и Л.А. Мытаревой "Маскировка материальных тел методом волнового обтекания" [УФН 180 475 (2010)] относительно возможности идеальной оптической маскировки объекта.

PACS numbers: 41.20.Jb, 42.25.Bs

DOI: 10.3367/UFNr.0181.2011071.0787

В недавней статье [1] представлен анализ многочисленных современных публикаций в области оптической маскировки макроскопических тел. В ряде существенных вопросов выводы [1] отличаются от приведённых в более раннем обзоре [2], что, возможно, связано с ограниченным объёмом и популярным характером изложения в [2]. Поэтому представляется, что эти выводы подлежат уточнению.

Сначала поясним терминологию. Маскировка методом волнового обтекания (эквивалентный английский термин — cloacking) состоит в окружении маскируемого объекта оболочкой с определённой пространственной зависимостью электродинамических характеристик среды. При идеальной маскировке оптическое излучение, падающее на объект и оболочку в любом направлении и с любой частотой, должно рассеиваться так, чтобы полное излучение вне оболочки было таким же, как и в случае отсутствия объекта и оболочки. Снизив требования, ограничимся вариантом монохроматического излучения (с фиксированной частотой), что снимает сложную для решения проблему частотной дисперсии. Кроме того, полагаем, что эта частота принадлежит области прозрачности среды, иначе поглощение неизбежно приведёт к обнаружимости объекта. В идеальном случае оболочка универсальна, т.е. её электродинамические характеристики не зависят от свойств объекта. В [1] рассмотрен подбор характеристик оболочки методом трансформационной оптики, основанным на инвариант-

ности уравнений Максвелла к непрерывному и взаимно однозначному преобразованию координат. При этом, например, свободному распространению излучения в изотропной однородной среде для одной из систем координат однозначно ставится в соответствие его распространение в анизотропной среде с определённой пространственной зависимостью элементов тензоров диэлектрической проницаемости ϵ и магнитной восприимчивости μ в другой системе координат.

Отметим приоритетный вопрос. В разделах 1 и 3 [1] подход трансформационной оптики связывается с работами 2006 г. английских исследователей Дж. Пендри и др. [3, 4] и У. Леонхардта [5] (мы не комментируем приведённые в приложении III [1] гипотезы). Однако, как указывалось в [2], в научной литературе этот подход был предложен ещё в 1961 г. российским физиком Л.С. Долиным [6].

Далее, принципиален вопрос о возможности идеальной маскировки методом волнового обтекания. Не будем повторять аргументы [2] о противоречии между идеальной невидимостью и единственностью решения обратной задачи рассеяния (единственность математически строго доказана для оптически изотропных сред, хотя вряд ли этот результат может нарушиться при учёте анизотропии). Отметим заключительную фразу статьи У. Леонхардта [5]: "Нельзя полностью спрятаться от волн, но можно — от лучей", что подразумевает возможность только приближённой маскировки — в рамках геометрической оптики. Мы же считаем, что и последнее утверждение чрезмерно оптимистично по излагаемым ниже причинам.

Ключевым моментом применения метода трансформационной оптики к задаче невидимости является преобразование координат (отображение), при котором область реального пространства с исключённым объёмом, внутри которого находится скрываемый объект, переводится в односвязную область. Так, в приводимом в [1] примере область шара радиусом R_2 преобразуется в шаровой слой $R_1 < r < R_2$ (r — расстояние от точки до начала координат, совпадающего с центром шара и слоя). После нахождения такого преобразования уже

Н.Н. Розанов. Федеральное государственное унитарное предприятие Научно-производственная корпорация "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Биржевая линия 12, 199034 Санкт-Петербург, Российская Федерация, Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Кронверкский просп. 49, 197101 Санкт-Петербург, Российская Федерация Тел. (812) 328-10-93 E-mail: nrosanov@yahoo.com

Статья поступила 5 октября 2010 г.

сравнительно легко рассчитываются пространственные зависимости элементов тензоров ε и μ .

Возможно ли такое преобразование? Процитируем [7]: "... многосвязную область нельзя взаимно однозначно и непрерывно отобразить на одно связную". В [7] это утверждение поясняется для двумерного пространства следующим образом. Пусть такое отображение многосвязной области D на одно связную D^* существует. Возьмём в D замкнутый контур C , внутри которого содержится исключённая область с маскируемым объектом. Рассматриваемое отображение переведёт C в замкнутый контур C^* , лежащий в D^* . Если непрерывным образом стягивать контур C^* в какую-либо точку из D^* , то ввиду непрерывности отображения контур C должен, оставаясь внутри области D , стягиваться непрерывным образом в некоторую точку области D . Но это невозможно, так как внутри контура C лежат точки, не принадлежащие D .

При переходе к трёхмерному пространству достаточно слово "контур" заменить словом "поверхность" (полностью охватывающую маскируемый объект), для того чтобы вновь прийти к выводу о невозможности требуемого преобразования координат. Другими словами, такое преобразование неизбежно будет сингулярным. Тогда нарушается справедливость приведённого в приложении I [1] доказательства инвариантности уравнений Максвелла. Этот вывод применим и к приближению геометрической оптики. Он, в соответствии с [2], свидетельствует о неизбежности сингулярности (обращения в бесконечность) элементов тензоров ε и/или μ для достижения идеальной невидимости.

Приведём ещё один аргумент против возможности "универсального" маскирующего покрытия, позволяющего скрывать объекты с произвольными электродинамическими характеристиками. Для электромагнитного поля это возможно, если объект идеально экранирован от внешнего излучения произвольного вида, т.е. если напряжённости поля тождественно равны нулю в объёме объекта. Но тогда решением уравнений Максвелла для монохроматического излучения и сред с конечными значениями и кусочно-гладким пространственным профилем элементов тензоров ε и μ служит тождественный нуль во всём пространстве, что противоречит наличию излучателя. И в этом случае мы приходим к необходимости привлечения для идеальной невидимости или физически несодержательной неаналитичности пространственной зависимости ε и/или μ , или также физически недопустимых их бесконечных значений. Конечно, и в реальных средах в рамках полных (нестационарных) уравнений Максвелла поле может быть

равным нулю за границей раздела (в области, в которую излучение не успело проникнуть за время действия источника). Но эта граница не может быть стационарной, она движется со световой скоростью [8], так что излучение непрерывно действующего источника со временем заполняет всё пространство, затекая и в объём маскируемого объекта.

Таким образом, даже для монохроматического излучения идеальная невидимость макроскопического объекта конечных размеров недостижима при использовании сред с физически допустимыми (конечными) значениями элементов тензоров диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости. Однако это сохраняет значимость предложенного в [6] и развитого затем в приведённых в [1, 2] работах изящного подхода трансформационной оптики. Поскольку для идеальной невидимости требуются бесконечные значения ε и/или μ , то невидимость будет хотя и не идеальной, но тем более полной, чем ближе к идеальным свойства среды оболочки (метаматериала), в том числе, чем шире рабочий диапазон изменения этих величин. При допущении различных частот диагностирующего излучения пространственный профиль ε и μ в оболочке должен будет зависеть от частоты. В этом случае оболочка уже не может быть универсальной. В частности, полосы поглощения в её среде должны располагаться в более высокочастотной области, чем у объекта, поскольку при достаточно больших частотах излучения маскирующая оболочка эффективно исчезает (становится электродинамически подобной вакууму), не обеспечивая должной рефракции излучения. Представляется, что знание естественных ограничений может только способствовать решению нетривиальных проблем реальной невидимости.

Автор благодарен А.П. Киселеву, Г.Б. Сочилину и А.Н. Шацеву за полезные обсуждения. Работа частично поддержана Министерством образования и науки РФ, грант РНП 2.1.1/9824.

Список литературы

1. Дубинов А Е, Мытарева Л А УФН **180** 475 (2010) [Dubinov A E, Mytareva L A *Phys. Usp.* **53** 455 (2010)]
2. Розанов Н Н *Природа* (6) 3 (2008)
3. Pendry J B, Schurig D, Smith D R *Science* **312** 1780 (2006)
4. Schurig D et al. *Science* **314** 977 (2006)
5. Leonhardt U *Science* **312** 1777 (2006)
6. Долин Л С *Изв. вузов. Радиофизика* **4** 964 (1961)
7. Лаврентьев М А, Шабат Б В *Методы теории функций комплексного переменного* (М.: Физматгиз, 1958)
8. Born M, Wolf E *Principles of Optics* (Oxford: Pergamon Press, 1969) [Борн М, Вольф Э *Основы оптики* (М.: Наука, 1970)]

Can even monochromatic radiation ensure ideal invisibility?

N.N. Rozanov State Research Center "S.I. Vavilov State Optical Institute",
Birzhevaya liniya 12, 199034 St. Petersburg, Russian Federation,
St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
Kronverkskii prospr. 49, 197101 St.-Petersburg, Russian Federation
Tel. (7-812) 328-10 93. E-mail: nrosanov@yahoo.com

Discusses conclusions reached by A.E. Dubinin and D.A. Mytareva in their paper "Invisible cloaking of material bodies using the wave flow method" (*Usp. Fiz. Nauk* **180** 475 (2010) [*Phys. Usp.* **53** 455 (2010)]) on whether the perfect optical cloaking of material objects is possible.

PACS numbers: 41.20.Jb, 42.25.Bs

Bibliography — 8 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **181** (7) 787–788 (2011)

DOI: 10.3367/UFNr.0181.2011071.0787

Received 5 October 2010

Physics – Uspekhi **54** (7) (2011)