

Маскировка при помощи оптимизированных однородных анизотропных слоев

Bogdan-Ioan Popa, Steven A. Cummer

Аннотация

Мы представляем метод уменьшения рассеяния произвольных объектов, заключающийся в окружении их оболочкой, состоящей из нескольких слоев анизотропных однородных материалов. Для нахождения физических параметров для каждого слоя используется оптимизационный метод, отправной точкой которого является дискретная аппроксимация координатного преобразования маскирующей оболочки. Мы покажем, что оптимизированная трехслойная оболочка может снизить рассеяние на целых 15дБ больше, чем 100 слойная реализация маскирующей оболочки с преобразованием координат. Более того, оптимизационный метод может решить высокопроизводительной маскировочной оболочки, которые удовлетворяют внешним ограничениям, таким как максимальное значение диэлектрической или магнитной проницаемости. Такой подход может значительно упростить маскировочных оболочек среднего размера.

Недавно значительные исследования сфокусировались на разработке новых методов оптимизации взаимодействия между заданными объектами и электромагнитными волнами. Пендри и другие [1] показали, что тщательно спроектированные неоднородные и анизотропные оболочки могут препятствовать распространению электромагнитного излучения внутрь них, и, гораздо важнее, убирает рассеяние этих оболочек, превращая их и их внутренность прозрачным для электромагнитных волн. В преобразовании координат является привлекательным его общность: он может быть применен для сокрытия объектов любой формы и размера.

Несмотря на то, что численное моделирование [?] и далее теоретический анализ [?] подтвердили эффективность этого метода, экспериментальные демонстрации оказались более сложной задачей. Одна попытка [?], включающая цилиндрическую оболочку, окружающую металлический цилиндр продемонстрировала основную физику таких структур, а именно, что волны можно направлять вокруг структуры. Однако, в данной работе были сделаны приближения [?], значительно снижающие эффективность оболочки. В другой работе были выведены различные аппроксимации к идеальной маскировочной оболочке, которые также жертвуют производительностью в пользу простоты изготовления [?].

Трудность построения маскировочных оболочек, заданных теорией преобразования координат, вытекает из требований материала, их состоящего: оболочка должна быть анизотропной, с диэлектрической и магнитной проницаемостью непрерывно изменяющимися в широком диапазоне значений. Физическая ее реализация всегда будет требовать некоторую форму дискретизации этих непрерывных профилей. Например, Шуринг и другие [?] в их эксперименте использовали десятислойную ступенчатую аппроксимацию идеальных параметров.

Начиная с идеи, что анизотропия, кажется, является самым важным ингредиентом маскирующих оболочек, которые не являются электрически малыми, можно было бы задать вопросом, могут ли анизотропные оболочки, состоящие из анизотропных слоев построены другим образом? Здесь мы покажем, что уменьшающие рассеяние оболочки, составленные из относительно малого числа однородных слоев, могут быть построены при помощи оптимизационного метода, использующего оболочку, построенную по принципу преобразования координат в качестве начального условия. Производительность менее чем 5 оптимизированных слоев может быть равной, или даже превосходить стослойную дискретную аппроксимацию гладкой однородной оболочки, построенной через преобразование координат.

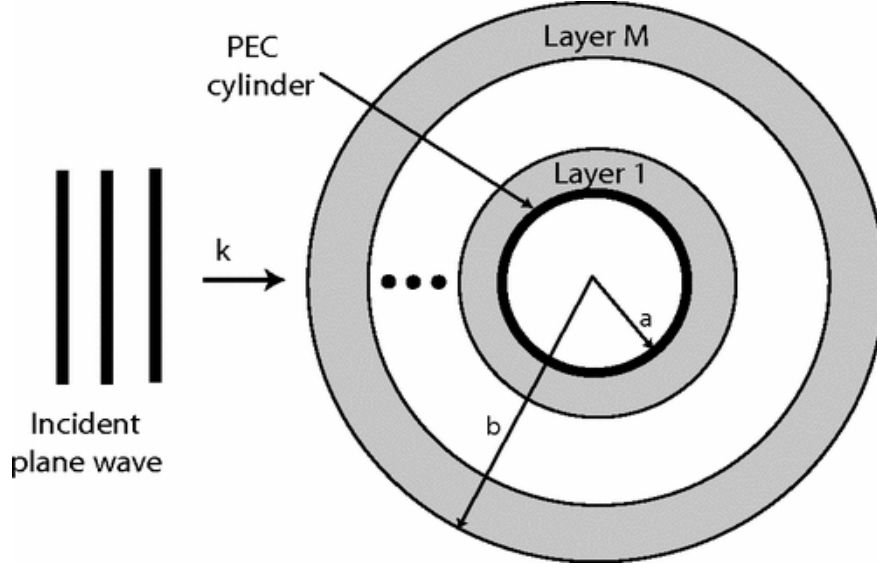


Рис. 1: Цилиндрический идеальный проводник, окруженный многослойной оболочкой и освещенный плоской волной. Входный и выходные радиусы оболочки есть a и b соответственно.

Для простоты, мы сосредоточим наше внимание на двумерной цилиндрической оболочке для электромагнетизма, но представленный здесь анализ может быть применен для других геометрий и типов волн, таких, как акустические [?]. На рис. 1 изображен идеальный электрический проводник — цилиндрический объект радиуса a , окруженный оболочкой с внешним радиусом b . Было показано [?], что один набор относительных физических параметров, который может полностью убрать рассеяние от структуры имеет вид (в цилиндрических координатах):

$$\begin{aligned} \epsilon_r(r) = \mu_r(r) &= \frac{r-a}{r}, & \epsilon_\phi(r) = \mu_\phi(r) &= \frac{r}{r-a}, \\ \epsilon_z(r) = \mu_z(r) &= \left(\frac{b}{b-a}\right)^2 \frac{r-a}{r}, \end{aligned} \quad (1)$$

где z — инвариантное направление, а r и ϕ — радиальная и азимутальная координаты соответственно.

Мы рассматриваем только поперечно электрическую поляризацию, для которой релевантны только ϵ_z , μ_r и μ_ϕ . Предполагаем, что оболочка может быть собрана из M concentric слоев однородного материала, как показано на рис. 1.

Список литературы

- [1] J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, Science 312, 1780 (2006)