

Повышение пропускной способности сети с помощью «закрученных радиоволн»



Об актуальности проблемы повышения эффективности использования частотного ресурса, следовательно, и пропускной способности в системах радиосвязи, думаю, знает каждый связист. Одно из возможных решений данной проблемы заключается в использовании технологии мультиплексирования с разделением по орбитальному угловому моменту (ОУМ).

В данной статье приведено описание данной технологии без сильного углубления в физику процесса, поскольку теоретическая база этого явления довольно сложна для восприятия.

Орбитальный угловой момент является одним из самых фундаментальных физических параметров и в классической и в квантовой механике (разделы физики). Отметим, что далее описание теории орбитального углового момента будет связано в первую очередь с квантовой физикой, поскольку к радиоволнам этот параметр стали относить сравнительно недавно. В параксиальном световом луче угловой момент фотона можно разделить на спиновый угловой момент (СУМ) и орбитальный угловой момент.

СУМ связан с вращением фотона (или если рассматривать с точки зрения волновой теории – вращением вектора электрического поля в электромагнитной волне) и проявляется в виде круговой поляризации. Спиновый угловой момент с точки зрения теории рассматривал еще в 1909 г. Пойнтинг. На практике СУМ продемонстрировал впервые в 1936 г. Ричард Бет – физик из Принстона.

Орбитальный угловой момент (ОУМ) связан с пространственным распределением – изменение направления электрического поля в пределах некоторого сектора. В сравнении с СУМ орбитальный угловой момент начали широко исследовать относительно недавно. Так, Аллен в 1992 г. показал, что сфазированные по спирали световые лучи, содержащие азимутальную фазовую составляющую $\varphi = \exp(i\ell\theta)$, имеют орбитальный угловой момент ℓh на 1 фотон, где ℓ – топологический заряд (равен числу поворотов фазы на величину 2π при обходе по замкнутому контуру, охватывающему ядро спиральной волны), θ – азимутальный угол, и h – постоянная Планка, деленная на 2π .

Теперь попытаюсь объяснить понятие орбитального углового момента простыми словами: поляризация связана с собственным вращением электромагнитной волны, в то время как орбитальный угловой момент связан с закручиванием электромагнитной волны в пространстве. Если попытаться объяснить еще более просто, то можно грубо привести следующую аналогию: спин условно соответствует вращению Земли вокруг оси, а ОУМ — вращению Земли вокруг Солнца. Закрученная радиоволна чем-то похожа на макароны Фузилли (рис. 1). Еще раз следует уточнить, что "закрученность" волны, связанная с орбитальным угловым моментом – это не круговая поляризация, это совсем другая характеристика. Во всех текущих стандартах беспроводной связи (Wi-Fi, LTE), используется уплотнение только по спинового углового моменту радиоволн.

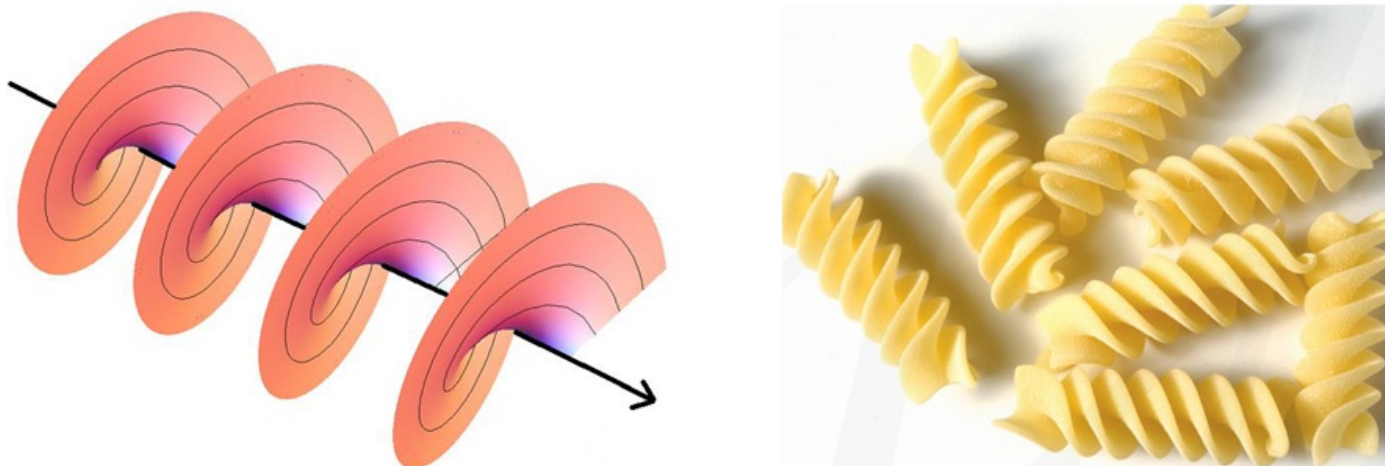


Рис. 1 – Электромагнитная волна с ненулевым ОУМ (слева), итальянские макароны Фузилли (справа)

На сегодняшний день ОУМ рассматривается как естественная характеристика различных сфазированных по спирали электромагнитных волн, начиная от электронных лучей заканчивая радиоволнами. Изучение ОУМ положило начало разработкам во многих отраслях, в том числе в томографии, астрономии и квантовой обработке информации и др. Например, среди новых разработок, появившихся благодаря изучению ОУМ, можно выделить следующие: оптический захват (атомов или ионов), "лазерный пинцет" (оптический инструмент, который позволяет манипулировать микроскопическими объектами с помощью света) и др.

В отличие от СУМ, у которого есть только два возможных значения $\pm h$ (вращение по часовой стрелке и против часовой), при теоретически неограниченном числе значений l , ОУМ в принципе, обеспечивает бесконечный диапазон возможно достижимых состояний. В связи с этим ОУМ может позволить значительно увеличить пропускную способность систем связи, например, путем кодирования информации через состояния ОУМ луча. Стоит отметить, что ОУМ также активно исследуется для использования в волоконно-оптических сетях. Но в данной статье был сделан упор применения ОУМ именно в радиосвязи.

Интерес к использованию волн с ОУМ в беспроводной связи появился совсем недавно. Самым известным экспериментом в этой области является публичная демонстрация передачи сигналов с ОУМ, проведенная в Венеции.

Венецианский эксперимент

В Италии в 2011 г. был проведен открытый эксперимент, демонстрирующий возможность передачи и приема сигналов на одной и той же частоте, но с различными ОУМ. Публичный эксперимент проходил на площади Сан-Марко в Венеции в присутствии международной прессы, экспертов, известных лиц и широкой публики.

Итальянские исследователи передавали одновременно два сигнала на одной и той же радиочастоте, через лагуну в Венеции – с маяка, расположенного на острове Сан-Джорджо до здания "Герцогского дворца" (известное здание Палаццо Дукале, итал. Palazzo Ducale di Mantova) на площади Сан-Марко (рис. 2). В итоге расстояние составило 442 метра.



Рис. 2 – Вид на место эксперимента Сан Марко в Венеции, Италия.

Стоит отметить, что итальянские ученые сделали из этого эксперимента настоящее шоу-представление. Световое и звуковое шоу проецировались на фасад здания Герцогского дворца, показывая аудитории результаты экспериментаторов. В 21:30 по местному времени более чем 2000 человек посетили этот "живой" эксперимент и когда передача данных посредством сигналов с различными ОУМ была успешно осуществлена, прогремел выстрел из винтовки. Этот выстрел был произведен в честь первой радиопередачи, сделанной Гульельмо Маркони в 1895. После этого на фасаде Герцогского дворца были спроектированы слова "segnale ricevuto", что в переводе с итальянского означает "сигнал получен" (рис. 3). (Дело в том, что в своих опытах Маркони размещал приемник и излучатель по разные стороны холма на расстоянии примерно 2-х миль. Помощник стрелял из винтовки всякий раз, когда принимал символ "S" в коде Морзе.)



Рис. 3 – Объявление публике о приеме сигнала

Как рассказал BBC News один из авторов эксперимента профессор Тайд: "Это то самое место, где Галилео 400 лет назад продемонстрировал властям Венеции свой телескоп. Власти не были полностью уверены в изобретении; они никогда не видели лун Юпитера, но сказали, что увиденное ими изображение должно находится внутри телескопа, поскольку луны не могут быть такими. В некоторой степени мы чувствовали то же самое (здесь он имеет в виду недоверие населения), поэтому, мы сказали себе: "Давайте сделаем это, давайте продемонстрируем эксперимент для общественности"".

Эксперимент заключался в следующем: два сигнала передавались на одинаковой частоте (2.414 ГГц): один в режиме ОУМ $l=0$, а другой в режиме ОУМ $l=1$. Сигнал с $l=0$ режим передавался с помощью обычной антенны типа "волновой канал". Режим ОУМ $l=1$, был получен с использованием специальной параболической антенны.

К приемнику были подключены две идентичные 12 элементные антенны типа "волновой канал", с коэффициентом усиления 16.5 дБи. Каждая из приемных антенн была установлена на механическом подводчике, который обеспечивал точную настройку положения в диапазоне 10 см ($\sim 0.8\lambda$). Кабельные соединения были сделаны на коаксиальном кабеле Belden H155, с волновым сопротивлением 50 Ом и диаметром 5.4 мм.



Рис. 4 – Одна из используемых антенн типа "волновой канал"

Демонстрация эксперимента шла отлично весь день, однако чуть не потерпела неудачу ночью – ветры разрегулировали передающую антенну. Но все же в последний момент под аплодисменты выжидающей толпы по одному каналу была передана высокая нота (как тестовый информационный аудио сигнал), по другому каналу – низкая нота.

Профессор Тайд и его коллеги уже обсуждают с производителями разработку системы, которая может передать много больше двух сигналов с различным орбитальным угловыми моментами.

"Ложка дегтя в бочку мёда"

Как всегда в любой новой тенденции находятся ее противники, и здесь технология ОУМ не исключение. Вышедшая недавно в журнале "New Journal of Physics" работа швейцарских специалистов в области телекоммуникаций указывает на то, что использованная физиками для экспериментов схема является вариантом MIMO. По их мнению, демонстрация радиопередачи двух потоков в одном канале, имевшая место в Венеции, прошла успешно только потому, что использовалось малое число ОУМ значений. Подобное можно осуществить и при помощи MIMO. Швейцарские инженеры полагают, что если бы итальянские экспериментаторы расширили передачу до заявленных десятков и сотен радиопотоков на одном канале, они бы потерпели неудачу.

На это итальянские исследователи (во главе с профессором Тамбурини) отвечают следующее: "Типичный инженер, специализирующийся на беспроводной связи, даже если он профессор, не знает ничего об орбитальном угловом моменте. Утверждения, сделанные этими людьми, противоречат любой книге по электродинамике. Это не что-то изобретённое нами, и не что-то такое, что мы придумали за чашкой кофе, – это нечто, основанное на солидной теоретической базе, подтверждённой несколькими Нобелевскими премиями".

Решайте сами, чья точка зрения кажется более убедительной. В любом случае то, насколько перспективна данная технология для систем телекоммуникаций покажет будущее. В завершение приведена шуточная фотография, которая попала мне при подборе материала для данной статьи, а также несколько интересных ссылок. Например, согласно [1] исследователи из Университета Южной Калифорнии, лаборатории реактивного движения НАСА и университета Тель-Авива, "закрутили" вместе восемь сигналов, каждый из которых передавал 300 Гбит/с. В результате они смогли достичь нового рекордного уровня скорости передачи по беспроводному каналу в 2,5 Терабит в секунду.



Рис. 5 – 2 марта 2012 г. Фабрицио Тамбурини (на фото слева) заявил, что они подали заявку на патент

Использованные материалы:

1. [Infinite-capacity wireless vortex beams carry 2.5 terabits per second.](#)
2. ["Twisted light" data-boosting idea sparks heated debate.](#)
3. [Is Orbital Angular Momentum \(OAM\) Based Radio Communication an Unexploited Area?](#)