на известных канонических экспериментах, а затем проводить апробацию на конкретных (специальных) вихревых устройствах.

Список литературы

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
2. Турбулентность. /Под ред. П. Брэдшоу. – М.: Машиностроение, 1980. – 343 с.
3. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений.- СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. 108 с.
4. Hoekstra, AJ., Derksen, JJ., & Van Den Akker, HEA. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones //Chemical Engineering Science – 1999, V. 54(13-14), P. 2055-2065.
5. Сажин Б.С., Гудим Л.И. Вихревые пылеуловители. М.: Химия, 1995. – 144 с.
6. Белоусов А.С., Сажин Б.С. Структура потоков в вихревых устройствах // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 5.– с.98-103.
7. Белоусов А.С., Сажин Б.С. Поля скоростей в вихревых аппаратах // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 2.– С. 100-105.
8. Belousov A.S., Sazhin B.S. Application of guided vortex breakdown for drying and separation of the powder in vortex cyclone // Proc. 2nd Nordic Drying Conf., Copenhagen, Denmark. 2003. P.475 -479.
9. Белоусов А.С., Сажин Б.С.. Радиальный сток в центробежных пылеуловителях //Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006. – № 4. – С. 96–100.

РАЗРАБОТКА АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ КАНАЛОВ РАДИОСВЯЗИ

Вавилова Виктория Сергеевна
Аспирант, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

АННОТАЦИЯ

Электромагнитное излучение переносит энергию и импульс. Обычно передаваемый импульс связан с линейным импульсом. Тем не менее, существует еще одна составляющая – момент количества движения, он связан с действием крутящего момента и, при определенных условиях, может быть приближен к векторной сумме спинового момента и орбитального углового момента (OAM). Спиновый момент является наиболее известным компонентом углового момента, и связан с понятием смещения.

Основной целью работы является, аналитическая передача нескольких каналов радиоволн на одной частоте, что в свою очередь подтверждает, что свет может иметь гораздо более сложную структуру, чем обычно полагается, и, следовательно, он может нести гораздо больше информации. Для достижения поставленной цели произведено разложение электромагнитных полей по мультиполям.

ABSTRACT

Electromagnetic radiation transfers energy and momentum. Usually the transmitted impulse is associated with a linear pulse. Nevertheless, there is another component - the moment of momentum, it is associated with the action of torque and, under certain conditions, can be approximated to the vector sum of the spin moment and the orbital angular momentum (OAM). The spin moment is the most known component of the angular momentum, and is related to the concept of displacement.

The main goal of the work is the analytical transmission of several radio wave channels on one frequency, which in turn confirms that light can have a much more complex structure than is normally assumed, and therefore it can carry much more information. To achieve this goal, the electromagnetic fields are decomposed into multipoles.

Ключевые слова: орбитальный угловой момент, мультиполя, квантовое число, ортогональность.
Keywords: orbital angular momentum, multipole, quantum number, orthogonality.

В области, где источники отсутствуют, уравнения Максвелла имеют вид [1, с.591]

$$rotE = -\frac{1}{c}\frac{\partial B}{\partial t},$$
$$rotB = \frac{1}{c}\frac{\partial E}{\partial t}, \qquad (1)$$
$$divE = 0,$$
$$divB = 0.$$

При гармонической зависимости величин от времени эти уравнения записываются в форме

$$rotE = ikB,$$
$$rotB = -ikE, \qquad (2)$$
$$divE = 0,$$
$$divB = 0.$$

Исключая из первых двух уравнений E, приходим к следующим уравнениям для вектора B и и соотношению, определяющему E:

$$\left.\begin{aligned} &(\nabla^2 + k^2)B = 0, \\ &\mathrm{E} = \frac{i}{k} rotB. \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Если же мы исключим вектор B, то получим уравнения для вектора E и добавочное соотношение, определяющее вектор B:

$$\left.\begin{aligned}&(\nabla^2+k^2)E=0, \operatorname{div}E=0\\&B=-\frac{i}{k}rotE.\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

Совокупность трех формул (3) или (4)-эквивалентна уравнениям Максвелла (2).

Определим теперь мультипольные поля E и B. Из (3) очевидно, что каждая декартова составляющая B удовлетворяет уравнению Гельмгольца. Поэтому общее решение для каждой составляющей B можно представить в виде, объединяя выражения, приходим к векторному решению:

$$B=\sum_{l,m}\left[A_{lm}^{(1)}h_l^{(1)}(kr)+A_{lm}^{(2)}h_l^{(2)}(kr)\right]Y_{lm}(\theta,\varphi), \quad (5)$$

где A_{lm} – произвольные постоянные векторы.

Векторные коэффициенты A_{lm} в (5) не вполне произвольны, поскольку должно выполняться условие обращения в нуль дивергенции div**B**=0. Так как радиальные функции линейно независимы, то условие div**B**=0 должно порознь выполняться для обеих сумм в (5). Таким образом, коэффициенты A_{lm} должны удовлетворять соотношению

$$\operatorname{div}\sum_{l,m}\left[h_l\,(kr)A_{lm}Y_{lm}(\theta,\varphi)=0\right]. \quad (6)$$

Оператор дивергенции может быть заменен операторным множителем

$$\frac{\mathrm{r}}{r}\frac{\partial}{\partial r}-\frac{i}{r^2}\mathrm{r}\times\mathrm{L}, \quad (7)$$

где L — оператор. Подставляя (7) в (6), приходим к условию

$$\mathrm{r}\cdot\sum_l\left[\frac{\partial h_l}{\partial r}\sum_m A_{lm}Y_{lm}-\frac{ih_l}{r}\mathrm{L}\times\sum_m A_{lm}Y_{lm}\right]=0. \quad (8)$$

Из рекуррентных формул очевидно, что в общем случае коэффициенты A_{lm} с данным l связаны с коэффициентами $A_{l'm}$, где $l'=l\pm1$. Эта связь отсутствует лишь в том случае, когда $(2l+1)$ векторных коэффициента для каждого значения l подобраны так, что

$$\mathrm{r}\cdot\sum_m\left[A_{lm}Y_{lm}\right]=0. \quad (9)$$

В этом частном случае окончательное условие на коэффициенты накладывается вторым членом уравнения (8):

$$\mathrm{r}\cdot\left(\mathrm{L}\times\sum_m\left[A_{lm}Y_{lm}\right]\right)=0. \quad (10)$$

Условие (9), означающее поперечность поля относительно радиуса-вектора, в сочетании с уравнением (10) позволяет однозначно определить системы векторных угловых функций порядка l для каждого заданного значения m. Эти функции могут быть найдены непосредственно из (9) и (10) с учетом общих свойств функций Y_{lm}. Однако нетрудно заметить, что угловое решение имеет вид

$$\sum_m A_{lm'}Y_{lm'}=\sum_m a_{lm}\mathrm{L}Y_{lm}. \quad (11)$$

Из соотношения видно, что условие поперечности поля (9) удовлетворяется. Аналогично, используя второе из коммутационных соотношений и формулу, можно показать, что выполняется и второе условие (10). А то, что функции $f_l(r)\mathrm{L}Y_{lm}$ удовлетворяют волновому уравнению, следует из последнего соотношения (9).

Итак, принимая условие (9), мы приходим к следующей системе частных решений, или электромагнитных мультипольных полей:

$$\mathrm{B}_{lm}=f_l(kr)\mathrm{L}Y_{lm}(\theta,\varphi), \quad (12)$$

$$\mathrm{E}_{lm}=\frac{i}{k}rot\mathrm{B}_{lm}.$$

где

$$f_l(kr)=A_{lm}^{(1)}h_l^{(1)}(kr)+A_{lm}^{(2)}h_l^{(2)}(kr). \quad (13)$$

Любая линейная комбинация этих полей с различными индексами l и m удовлетворяет системе уравнений (3). Характерной особенностью полученных решений является ортогональность вектора магнитной индукции радиусу-вектору (B_{lm}=0). Поэтому подобные волны не представляют общего решения уравнений (3). Это сферический аналог поперечных магнитных (TM), или, иначе говоря, электрических цилиндрических волн [2, с.19].

Если бы мы исходили из системы уравнений (4), а не (3), мы пришли бы к другой системе мультипольных полей, в которой радиусу-вектору ортогонален вектор E:

$$\mathrm{E}_{lm}=f_l(kr)\mathrm{L}Y_{lm}(\theta,\varphi),$$

$$\mathrm{B}_{lm}=\frac{i}{k}rot\mathrm{E}_{lm}. \quad (14)$$

Эти сферические волны являются аналогом поперечных электрических (TE), или магнитных, цилиндрических волн.

Точно так же, как в случае цилиндрических волноводов, можно показать, что полученные две системы мультипольных полей (12) и (14) образуют полную систему векторных решений уравнений Максвелла [3, с.6]. Мы будем называть эти мультипольные поля соответственно электрическими и магнитными (а не поперечно магнитными и т. п.), так как они определяются, как мы увидим, соответственно плотностью электрического заряда и распределением магнитного момента. Ввиду важной роли векторных сферических гармоник удобно ввести нормированные функции

$$X_{l,m}(\theta,\varphi)=\frac{1}{\sqrt{l(l+1)}}LY_{lm}(\theta,\varphi) \quad (15)$$

с условием ортогональности

$$\int \mathrm{X}^*_{l'm'}\cdot\mathrm{X}_{lm}\,d\Omega=\delta_{ll'}\delta_{mm'}. \quad (16)$$

Комбинируя оба типа полей, можно написать общее решение уравнений Максвелла (2) в виде

$$\mathrm{B}=\sum_{l,m}\left[a_E(l,m)f_l(kr)X_{lm}-\frac{i}{k}a_M(l,m)\mathrm{rot}(g_l(kr)X_{lm})\right],$$

$$\mathrm{E}=\sum_{l,m}\left[\frac{i}{k}a_E(l,m)\mathrm{rot}(f_l(kr)X_{lm})+a_M(l,m)g_l(kr)X_{lm}\right]. \quad (17)$$

где коэффициенты $a_E(l, m)$ и $a_M(l, m)$ определяют амплитуды электрических и магнитных мультипольных полей, соответствующих индексам (l, m). Радиальные функции $f_l(kr)$ и $g_l(kr)$ имеют вид (13). Значения коэффициентов $a_E(l, m)$ и $a_M(l, m)$, так же как и амплитуды в (13), определяются источниками и граничными условиями.

Приведенные выражения для разложения электромагнитных полей по мультиполям имеют практическую значимость при проектировании и разработке многоканальных систем радиосвязи на основе мультиплексирования по орбитальному угловому моменту.

Список литературы:

1. Джексон Дж. Классическая электродинамика: учеб. Пособие. М.: Мир, 1962.- с. 591.

2. Bennis A., Niemiec R., Brousseau C. Flat plate for oam generation in the millimeter band, in Antennas and Propagation (EuCAP): 7th European Conference on, 2013. – 19 с.

3. Nguyen D. Discussion about the link budget for electromagnetic wave with orbital angular momentum, in Antennas and Propagation (EuCAP): 8th European Conference on, 2014. – 6 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО УГЛОВОГО МОМЕНТА В СИМСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ

Вавилова Виктория Сергеевна

Аспирант, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

АННОТАЦИЯ

Телекоммуникационная отрасль в последнее время развивается очень динамично. Мир продолжает стремительно адаптироваться в эпоху цифровых технологий, что приводит к уменьшению количества полос радиочастот доступных для передачи информации.

С течением времени, производители телекоммуникационного оборудования начнут ощущать нехватку частотного спектра. Возникшую в перспективе проблему, можно решить путем перехода на абсолютно новый механизм, позволяющий увеличить в несколько раз число независимых радиоканалов в одном и том же узком частотном диапазоне. Инновационная технология позволит увеличить информационную ёмкость радиоволн за счет использования орбитального углового момента вращающихся волн.

Исследования, направленные на изучение и применение характеристики электромагнитной волны – орбитального углового момента, в телекоммуникациях ограничены и представляют собой разрозненный материал, отраженный только в публикациях и работах иностранных ученых, в отечественной литературе работы по данной тематике отсутствуют. В связи с этим необходимо рассмотреть степень разработанности рассматриваемой тематики и основные тенденции развития данной технологии уплотнения каналов в системах радиосвязи.

ABSTRACT

The telecommunications industry has been developing very dynamically lately. The world continues to rapidly adapt in the digital age, which leads to a reduction in the number of radio frequency bands available for transmission of information. Over time, telecom equipment manufacturers will begin to feel the lack of a frequency spectrum. The problem that arose in the future can be solved by switching to a completely new mechanism that allows several times to increase the number of independent radio channels in the same narrow frequency range. Innovative technology will increase the information capacity of radio waves by using the orbital angular momentum of rotating waves.

Studies aimed at studying and applying the characteristics of the electromagnetic wave - the orbital angular momentum, in telecommunications are limited and represent a disparate material, presented only in publications and works of foreign scientists, in the domestic literature there is no work on this topic. In this regard, it is necessary to consider the degree of development of the subject matter under consideration and the main trends in the development of this technology for channel compaction in radio communication systems.

Ключевые слова: орбитальный угловой момент, круговая поляризация, несущая частота, азимутальное квантовое число.

Keywords: orbital angular momentum, circular polarization, carrier frequency, azimuthal quantum number.

В работе [1, с.3] для представления теории углового момента рассматривается свойства сохранения, симметрии электромагнитного поля, теоретическое представление самой физики,