

УДК 621.396.674

В.П. Беличенко, А.С. Запасной, П.В. Шестаков

Управление интерференционными потоками энергии в эванесцентных полях систем излучателей

Процесс формирования энергетических потоков в эванесцентных полях нескольких пространственно разнесенных элементарных излучателей существенно отличается от такового в случае уединенного излучателя. В частности, образуется комплексный интерференционный поток энергии, оказывающий значительное влияние как на структуру запасенной электромагнитной энергии, так и на мощность излучения подобных излучающих систем. Показано, что возможно эффективное управление указанными энергетическими потоками, обеспечивающее максимизацию мощности излучения. Высказано предположение о возможности применения такого управления в задачах ближнепольного зондирования сред и объектов.

Ключевые слова: радиоволновое зондирование, локализованные системы излучателей, эванесцентные поля.

Уже достаточно продолжительное время очень интенсивно и широкомасштабно проводятся исследования в области ближнепольной микроскопии [1]. Ключевые направления исследований, использующих излучение оптического диапазона длин волн, связаны:

- 1) с разработкой технологий изготовления зондов с субволновыми размерами апертуры;
- 2) созданием средств прецизионного позиционирования зонда на очень малых расстояниях от исследуемого объекта;
- 3) обеспечением прецизионного относительного перемещения зонда и объекта;
- 4) разработкой эффективных способов извлечения следов ближнепольного взаимодействия зонда и объекта в дальней зоне с последующей обработкой получаемой информации.

Исследования подобной направленности проводятся и в радиоволновом диапазоне [2, 3]. Причем используемые методы во многом родственны методам, применяемым в настоящее время в оптике. Однако важный вопрос о процессах происходящих в зоне ближнепольного взаимодействия, еще не нашел должного отражения в литературе, хотя необходимость такого исследования подчеркивает неослабевающий интерес к разнообразным интерференционным эффектам в целом ряде сред во встречных полях плоских электромагнитных волн, а также в ближних полях, порождаемых системами излучателей [4, 5]. Наряду с этим предпринимаются попытки более тщательного изучения физики излучения уединенных излучателей, основанные на выделении непосредственно в ближней зоне излучаемых и эванесцентных полей с привлечением мультипольных разложений этих полей [6, 7]. Имеются все основания полагать, что структура эванесцентных полей гораздо более сложная в полях систем излучателей [8].

В этой связи значительный интерес представляет исследование специфики формирования таких полей, а также возможности управления энергетическими потоками в этих полях. В качестве моделей излучающих систем в данной работе приняты пары излучателей, содержащие либо два электрических диполя, либо электрический и магнитный диполи.

Пусть в точке $(0,0,b)$ декартовой системы координат x,y,z помещен электрический диполь. Его момент ориентирован вдоль оси Oz . В точке $(0,0,0)$ размещаются или электрический, или магнитный диполи, ориентированные соответственно вдоль осей Oz и Oy .

В сферической системе координат r,θ,φ , совмещенной обычным образом с декартовой системой, в обоих случаях нами были получены мультипольные разложения полных полей с использованием соотношений из [9]. На основе этих разложений записаны соответствующие представления для комплексного вектора Пойнтинга. Показано, что этот вектор имеет интерференционную составляющую $\mathbf{S}^{\text{int}}(S_r^{\text{int}}, S_\theta^{\text{int}})$ для первой конфигурации диполей и $\mathbf{S}^{\text{int}}(S_r^{\text{int}}, S_\theta^{\text{int}}, S_\varphi^{\text{int}})$ – для второй. С целью более тщательного изучения поведения действительных частей этих составляющих найдены удобные расчетные соотношения, основанные на установленных авторами трех новых формулах суммирования мультипольных разложений для \mathbf{S}^{int} .

На рис. 1 показано поведение $\text{Re}[S_\theta^{\text{int}}]$ в поле системы из двух коллинеарных электрических диполей при удалении точки наблюдения от начала координат в радиальном направлении $\theta = \pi/4$. При этом модули моментов диполей приняты одинаковыми и произведена нормировка на $\text{Re}[S_r]$ вектора Пойнтинга электрического диполя, размещенного в точке $(0, 0, 0)$. Расстояние между диполями $kb=2$, k – волновое число, $\Delta\psi$ – разность начальных фаз.

Как видно, при $\Delta\psi=0$ имеется характерная особенность в зависимости, связанная с изменением знака $\text{Re}[S_\theta^{\text{int}}]$ при $kr \approx 3$. Она оказывает существенное влияние на величину излучаемой системой мощности. В отличие от этого при $\Delta\psi = \pi/2$ подобного изменения знака не происходит и, кроме того, вклад данной составляющей в меридиональную компоненту полного вектора Пойнтинга значительно увеличивается.

На рис. 2, а и б иллюстрируется поведение $\text{Re}[S_r^{\text{int}}]$, $\text{Re}[S_\theta^{\text{int}}]$ и $\text{Re}[S_\varphi^{\text{int}}]$ в поле ортогонально ориентированных электрического и магнитного диполей при удалении точки наблюдения в направлении $\theta = \varphi = \pi/4$. Расстояние между диполями по-прежнему составляет $kb=2$, модули моментов диполей численно равны. Произведена также нормировка на действительную часть радиальной составляющей вектора Пойнтинга уединенного магнитного диполя.

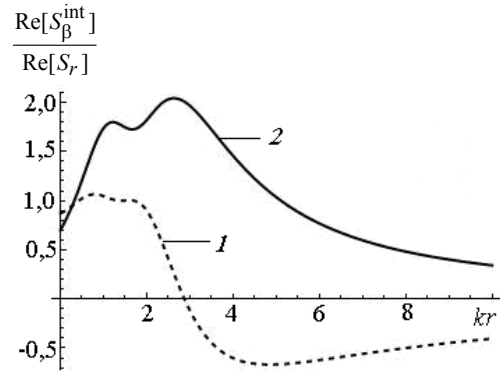


Рис. 1. Зависимость $\text{Re}[S_\theta^{\text{int}}]$ от kr при $\theta = \pi/4$; $\Delta\psi=0$ (1), $\Delta\psi = \pi/2$ (2)

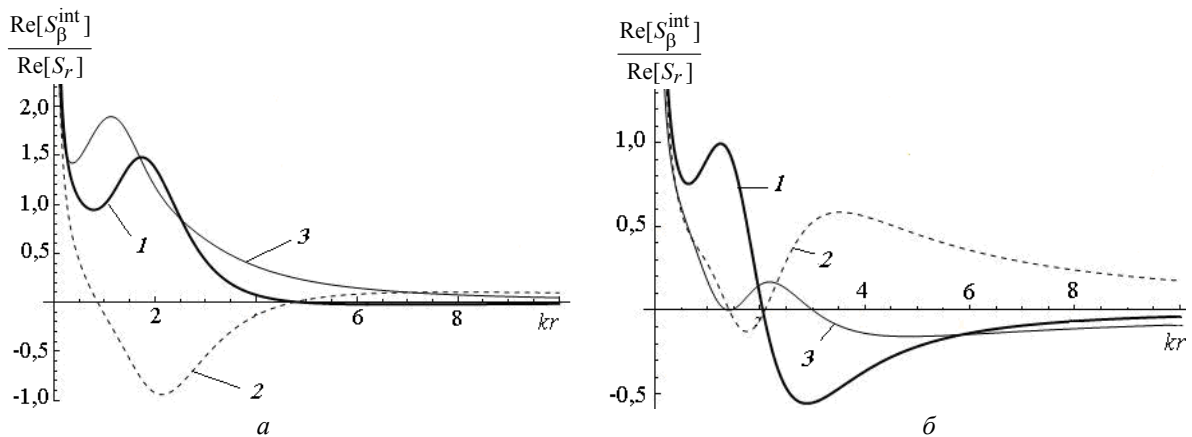


Рис. 2. Зависимость $\text{Re}[S_\beta^{\text{int}}]$ от kr при $\theta = \varphi = \pi/4$: кривая 1 – $\beta = r$; кривая 2 – $\beta = \theta$ и кривая 3 – $\beta = \varphi$; а – $\Delta\psi=0$; б – $\Delta\psi = \pi/2$

При равенстве разности фаз нулю поведение $\text{Re}[S_r^{\text{int}}]$ и $\text{Re}[S_\varphi^{\text{int}}]$ сходное. Обе составляющие быстро возрастают при $kr < 0,5$. На отрезке $0,5 < kr < 2$ их поведение носит осциллирующий характер, которое при $kr > 2$ сменяется монотонным убыванием. Иным поведением, как видно из рис. 2, а, характеризуется $\text{Re}[S_\theta^{\text{int}}]$.

При разности фаз, равной $\pi/2$, характер поведения интерференционных потоков энергии в эванесцентном поле системы из электрического и магнитного диполей кардинальным образом изменяется (рис. 2, б). В этом случае ближнепольное взаимодействие диполей оказывается минимальным, а вклад интерференционной составляющей в мощность излучения максимальным.

Заключение

1. Интерференционные потоки энергии оказывают существенное влияние на структуру эванесцентного поля систем излучателей. При этом эффективное управление этими потоками можно осуществлять в широких пределах путем изменения начальных фаз токов в излучателях.

2. При надлежащем выборе разности фаз токов мощность излучения существенно увеличивается за счет максимизации ее интерференционной составляющей. Следует также подчеркнуть, что более существенное значение эта составляющая имеет в поле излучения системы из неидентичных излучателей, каковой является, например, система, образованная электрическим и магнитным диполями.

3. Существует интервал значений разности фаз токов излучателей, в котором обеспечивается эффективное управление величиной и структурой $\text{Re}[S^{\text{int}}]$. Отмеченное обстоятельство может найти применение в задачах зондирования сред и объектов эванесцентными полями систем излучателей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 13-02-98025 регионального конкурса РФФИ (p_сибирь_a) «Фундаментальные ограничения в ближнеполевой электродинамике сложных излучающих систем» (2013–2015).

Литература

1. Novotny L. In Progress in Optics / E. Wolf, ed. – Elsevier, 2007. – Vol. 50. – P. 137–184.
2. Резник А.Н. Обнаружение контрастных образований внутри биологических сред при помощи ближнеполевой СВЧ-диагностики / А.Н. Резник, Н.В. Юрасова // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76, № 1. – С. 90–104.
3. Evanescent microwave microscopy / C. Martínez, V. Coello, R. Cortés, R. Villagómez // J. Korean Phys. Soc. – 2005. – Vol. 47. – P. 152–156.
4. Афанасьев С.А. Потоки энергии при интерференции электромагнитных волн / С.А. Афанасьев, Д.И. Семенов // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 4. – С. 377–384.
5. Геворкян Э.А. Взаимодействие встречных электромагнитных волн в поглощающей пластине, помещенной в волновод // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, вып. 4. – С. 113–117.
6. Seshadri S.R. Resonances of a spherical antenna // Radio Science Meeting (USNC-URSI NRS), 2013 US National Committee of URSI National, 9–12 Jan. 2013 [Электронный ресурс]. – URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=6525099&abstractAccess=no&userType=inst (дата обращения: 15.09.2014).
7. Seshadri S.R. Constituents of power of an electric dipole of finite size // J. Opt. Soc. America A. – 2008. – Vol. 25, № 3. – P. 805–810.
8. О возможности расширения полосы пропускания малогабаритных антенн / В.П. Беличенко, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев, В.В. Плиско // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, № 2. – С. 178–184.
9. Марков Г.Т. Возбуждение электромагнитных волн / Г.Т. Марков, А.Ф. Чаплин. – М.: Радио и связь, 1983. – 296 с.

Беличенко Виктор Петрович

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. радиофизики

Национального исследовательского Томского государственного университета (НИТГУ)

Тел.: 8 (382-2) 41-25-83

Эл. почта: bvp@mail.tsu.ru

Запасной Андрей Сергеевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. радиофизики НИТГУ

Эл. почта: zas_rff@sibmail.com

Шестаков Пётр Владимирович

Аспирант каф. радиофизики радиофизического факультета НИТГУ

Тел.: 8 (382-2) 41-25-83

Эл. почта: frost_away@mail.ru

Belichenko V.P., Zapasnoy A.S., Shestakov P.V.

Control of interference energy fluxes in the evanescent fields of the radiating systems

The formation process of energy fluxes in the evanescent fields of several spatially distributed elementary radiators substantially differs from the one in case of an isolated radiator. In particular, the complex interference energy flux is formed, which has a significant influence on both the structure of the stored electromagnetic energy, and the radiation power of these radiating systems. The study demonstrates the possibility of the effective control of the specified energy fluxes which provides maximizing the radiation power. We suggested that there is possibility of applying these control to problems in the near-field sensing media and objects.

Keywords: Radio frequency sounding, localized systems of the radiators, evanescent fields.
