

Использование особенностей формирования поля ближней зоны комбинированной антенны для улучшения её характеристик широкополосности

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

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Томский государственный университет, 634050 г. Томск, пр. Ленина, 36, rector@tsu.ru*

Анализируются условия образования интерференционного потока энергии в ближней зоне комбинированной антенны и его роль в процессе переноса энергии в пределах этой зоны. Используется модель антенны в виде ортогональных и пространственно разнесенных электрического и магнитного диполей. Отмечено, что интерференционный поток включает две составляющие. Показано, что эти составляющие могут быть использованы для регулирования импедансных и направленных свойств антенны.

Formation conditions of the interference energy flux in near zone of the combined antenna and its energy transfer role are analyzed. Antenna's model include orthogonal and spatially shifted electrical and magnetic dipoles. It is noted that interference flux contain two components. The prospects for using this flux to control impedance properties and radiation characteristics of the antenna are examined.

В последнее время значительно возрос интерес к исследованиям, направленным на более тщательное изучение факторов, определяющих полосу пропускания антенн. Под полосой пропускания антенны понимается интервал частот, в котором характеристики антенны остаются постоянными или изменяются в допустимых пределах. Если антенна имеет малые электрические размеры, то ее характеристики направленности слабо зависят от частоты. Однако достаточно сильна частотная зависимость входного импеданса, что затрудняет качественное согласование антенны в широкой полосе частот.

Хорошо известно, что основным препятствием на пути обеспечения хорошего согласования фидерного тракта с излучателем электромагнитных волн является наличие достаточно большого запаса реактивной энергии в ближней зоне излучателя. К настоящему времени предложены различные конструкции широкополосных антенных систем, обеспечивающих уменьшение этого запаса. Среди таковых можно отметить, например, спиральные антенны, биконические излучатели, снабженные шлейфами, антенны на основе комбинации излучателей электрического и магнитного типов.

К комбинированным антеннам относят [1,2] такие антенны, которые включают в свой состав достаточно четко выделяемые излучатели электрического и магнитного типов. Своими названиями эти излучатели обязаны тому обстоятельству, что в ближней зоне у первых преобладает запас электрической энергии, а у вторых – запас магнитной энергии. Разностью этих энергий определяется запас реактивной энергии излучающей системы. Принципиальная возможность выравнивания запасов энергий, безотносительно конструктивного выполнения комбинированной антенны (а, следовательно, и расширения её полосы согласования), была обоснована в [1,2]. Экспериментальные исследования [3] показали, что последние, наряду с IRA (impulse radiated antennas) и ТЕМ-антеннами, способны осуществлять малоискаженное эффективное излучение импульсов короткой длительности.

Успех разработки удачной конструкции комбинированной антенны обычно связывают с наличием в ней конструктивных элементов, обеспечивающих возможность эффективного обмена энергиями [4,5]. Что касается теоретических исследований, то они в значительной степени отстали от имеющихся экспериментальных наработок.

Здесь можно отметить, что в [6] численными методами изучено взаимодействие между совмещенными (а в [7] и между разнесенными) и одновременно излучающими электрическим диполем и рамкой. Обнаружено значительное поглощение мощности в такой комбинированной системе излучателей. Однако уяснить физические процессы, приводящие к этому, в [6,7] не удалось.

Гораздо более содержательные физические результаты получены в [8-10] при исследовании специфического интерференционного энергетического взаимодействия между электрическими или магнитными дипольными излучателями.

Данная работа имеет целью детальное изучение физических процессов в ближней зоне комбинированной антенны. Установлены механизмы формирования интерференционных потоков энергии в этой зоне. Характерная черта потоков – образование за счет интерференции реактивных и активных компонент полей. При этом выделяются два интерференционных потока, характеризующиеся разной зависимостью от разности начальных фаз токов в излучателях. Показано, что именно эти потоки ответственны за обмен энергиями в комбинированной антенне. Выявлены факторы, целенаправленное управление которыми позволяет улучшать импедансные и направленные свойства комбинированных антенн.

В качестве модели комбинированной антенны рассмотрим разнесенные в пространстве и ортогонально ориентированные электрический и магнитный диполи (рис. 1). Здесь магнитный диполь расположен в начале координат и ориентирован вдоль оси y . Электрический диполь находится на оси z , на расстоянии b от начала координат, и ориентирован параллельно оси x . Необходимо найти интерференционный поток энергии через сферическую поверхность S радиуса $r = a < b$, заключающую внутри себя магнитный диполь.

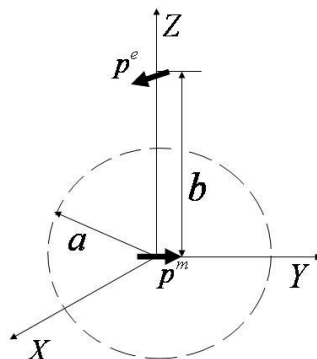


Рис. 1 – Модель комбинированной антенны для расчета интерференционного потока энергии

При расчёте воспользуемся общими представлениями для полей произвольной системы электрических и магнитных токов в сферической системе координат [11]. Тогда компоненты поля электрического диполя запишутся в виде

$$E_r^{(1)} = \frac{p^e Z_0}{4\pi br} \cos\varphi \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) j_n(kr) \left[bh_n^{(2)}(kb) \right]' P_n^1(\cos\theta),$$

$$E_\theta^{(1)} = \frac{p^e Z_0}{4\pi} \cos\varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left\{ \frac{1}{br} [rj_n(kr)]' \left[bh_n^{(2)}(kb) \right]' \frac{dP_n^1(\cos\theta)}{d\theta} + \right.$$

$$\left. + k^2 j_n(kr) h_n^{(2)}(kb) \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta} \right\},$$

$$E_{\varphi}^{(1)} = -\frac{p^e Z_0}{4\pi} \sin \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left\{ \frac{1}{br} [rj_n(kr)]' [bh_n^{(2)}(kb)]' \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} + \right. \\ \left. + k^2 j_n(kr) h_n^{(2)}(kb) \frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta} \right\}, \quad (1)$$

$$H_r^{(1)} = \frac{ikp^e}{4\pi r} \sin \varphi \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) j_n(kr) h_n^{(2)}(kb) P_n^1(\cos \theta),$$

$$H_{\theta}^{(1)} = -\frac{ikp^e}{4\pi} \sin \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left\{ \frac{1}{b} j_n(kr) [bh_n^{(2)}(kb)]' \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} - \right. \\ \left. - \frac{1}{r} [rj_n(kr)]' h_n^{(2)}(kb) \frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta} \right\},$$

$$H_{\varphi}^{(1)} = -\frac{ikp^e}{4\pi} \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left\{ \frac{1}{b} j_n(kr) [bh_n^{(2)}(kb)]' \frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta} - \right. \\ \left. - \frac{1}{r} [rj_n(kr)]' h_n^{(2)}(kb) \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \right\}.$$

Для компонент поля магнитного диполя имеют место представления

$$H_r^{(2)} = \frac{kp^m}{2\pi r Z_0} h_1^{(2)}(kr) P_1^1(\cos \theta) \sin \varphi, \\ H_{\theta}^{(2)} = \frac{kp^m}{4\pi r Z_0} [rh_1^{(2)}(kr)]' \frac{dP_1^1(\cos \theta)}{d\theta} \sin \varphi, \\ H_{\varphi}^{(2)} = \frac{kp^m}{4\pi r Z_0} [rh_1^{(2)}(kr)]' \frac{P_1^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \cos \varphi, \quad (2) \\ E_{\theta}^{(2)} = -\frac{ik^2 p^m}{4\pi} h_1^{(2)}(kr) \frac{P_1^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \cos \varphi, \\ E_{\varphi}^{(2)} = \frac{ik^2 p^m}{4\pi} h_1^{(2)}(kr) \frac{dP_1^1(\cos \theta)}{d\theta} \sin \varphi.$$

Радиальную компоненту S_r вектора Пойнтинга на сфере $r = a$ можно определить воспользовавшись следующим представлением

$$S_r = \frac{1}{2} \left[E_{\theta} H_{\varphi}^* - E_{\varphi} H_{\theta}^* \right]_{r=a}$$

в котором фигурируют компоненты суммарного поля электрического и магнитного диполей и звездочка означает комплексное сопряжение. Используя это выражение нетрудно убедиться в том, что радиальная компонента S_r^{int} вектора Пойнтинга интерференционного потока энергии имеет вид

$$S_r^{\text{int}} = \frac{1}{2} \left[E_{\theta}^{(1)} H_{\varphi}^{(2)*} + E_{\theta}^{(2)} H_{\varphi}^{(1)*} - E_{\varphi}^{(1)} H_{\theta}^{(2)*} - E_{\varphi}^{(2)} H_{\theta}^{(1)*} \right]_{r=a} \quad (3)$$

После подстановки требуемых компонент полей (1), (2) в (3) и проведения интегрирования по поверхности S , с использованием соотношений ортогональности для тригонометрических функций и присоединённых полиномов Лежандра, получаем

замкнутое выражение для интерференционного потока энергии. Поток является комплексным. Его действительная часть имеет вид

$$P_a = \frac{k^2}{8\pi} |p^e| |p^m| n_1(kb) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{k^2}{8\pi} |p^e| |p^m| j_1(kb) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (4)$$

Здесь $n_1(kb)$ и $j_1(kb)$ – сферические функции Неймана и Бесселя; φ_1 и φ_2 – начальные фазы токов в электрическом и магнитном диполях, соответственно. Как видно поток P_a состоит из двух потоков. Один (пропорциональный $\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$) возрастает при $kb \rightarrow 0$. Именно с этим потоком связано ярко выраженное взаимодействие дипольных излучателей в области низких частот, если разность начальных фаз токов в них не равна $\pm\pi/2$. Второй (пропорциональный $\sin(\varphi_1 - \varphi_2)$) стремится к нулю при $kb \rightarrow 0$. Направления этих потоков противоположные.

Отметим ещё, что выражение для мнимой части интерференционного потока энергии выглядит достаточно громоздко и здесь не приводится.

Модель комбинированной антенны, представленная на рис. 1 оказывается удобной и при расчёте интерференционной части комплексной мощности излучения через сферу произвольного радиуса $r = a > b$. Для действительная части этой мощности получается следующее выражение

$$\text{Re}\{P^{\text{int}}\} = -\frac{k^2}{4\pi} |p^e| |p^m| j_1(kb) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (5)$$

Мнимая часть зависит от радиуса сферы по которой производится интегрирование плотности потока энергии

$$\text{Im}\{P^{\text{int}}\} = \frac{k^3 a}{4\pi} |p^e| |p^m| j_1(kb) \left\{ j_1^2(ka) + n_1^2(ka) + ka [j_1(ka) j_1'(ka) + n_1(ka) n_1'(ka)] \right\} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (6)$$

При $ka \gg 1$

$$\text{Im}\{P^{\text{int}}\} = \frac{k^2}{4\pi(ka)} |p^e| |p^m| j_1(kb) \sin(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (7)$$

Анализ выражений (5), (6) позволяет сделать следующие выводы:

1. Интерференционный поток энергии пропорционален произведению $|p^e| |p^m|$.
2. Он равен нулю при $\varphi_1 = \varphi_2$; если $0 < kb < 4.5$, то при $\varphi_1 > \varphi_2$ происходит уменьшение суммарного потока энергии, а при $\varphi_1 < \varphi_2$ – его увеличение. Наиболее благоприятная разность начальных фаз $\varphi_1 - \varphi_2 = -\pi/2$.
3. Оптимальным с точки зрения максимизации потока является выбор $kb \approx 2$.
4. Если $kb = 0$, то интерференционный поток отсутствует; таким образом, совмещенные диполи не порождают интерференционного потока.
5. Оценка показывает, что при $|p^m| = Z_0 |p^e|$ за счет интерференционного потока в комбинированной антенне поток энергии может на 65% превысить сумму потоков энергии уединенных диполей.
6. Если существует действительный интерференционный поток энергии, то существует и мнимый поток. Причем последний, как видно из (7), весьма медленно стремится к нулю при $ka \rightarrow \infty$.

Изложенным выше демонстрируется реальная возможность в широкой полосе частот управлять переносом энергии в области интерференции активных и реактивных компонент поля ближней зоны комбинированной антенны и её мощностью излучения. Это осуществимо путем изменения амплитудно-фазовых соотношений возбуждающих

антенну электрических и магнитных токов. Анализ результатов численных расчетов для других моделей комбинированных антенн показал, что указанное управление позволяет регулировать импедансные и направленные характеристики антенн в широкой полосе частот.

Литература

1. High-power ultrawideband electromagnetic pulse radiation / V.I. Koshelev, Y.I. Buyanov, V.M. Kovalchuk, Yu.A. Andreev, V.V. Belichenko, A.M. Efremov, V.V. Plisko, K.N. Sukhushin, V.A. Vizir, V.B. Zorin // Proc. SPIE. – 1997. – V. 3158. – P. 209-219.
2. Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И., Плиско В.В. О возможности расширения полосы пропускания малогабаритных антенн // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44. – № 2. – С. 178-184.
3. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Комбинированная антенна с расширенной полосой пропускания // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50. – № 5. – С. 585-594.
4. Патент № 1259374 (РФ), МКИ H01Q 9/00. Антенна / Буянов Ю.И., Силенин В.Н. // опубл. в Б.И. – 1986. – № 35. – С. 239.
5. Федянович В.И. О предельной широкополосности излучателей. // Антенны. – 2008. – Вып. 1 (128). – С. 3-17.
6. Tefiku F., C.A. Coupling between elements of electrically small compound antennas // Microwave and Optical Technology Letters. – 1999. – V. 22. – No 1. – P. 16-21.
7. da Costa K.Q., Dmitriev V. Combination of electric and magnetic dipoles with single element feeding for broadband application // MOTL. – 2006. – V. 48. – No. 1. – P. 8–11.
8. Колоколов А.А., Скроцкий Г.В. Интерференция реактивных компонент электромагнитного поля // Успехи физических наук. – 1992. – Т. 162. – № 12. – С. 165-174.
9. Сидоренков В.В., Толмачёв В.В. Интерференционное энергетическое взаимодействие дипольных электромагнитных излучателей. // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. – 1992. – № 1. – С. 43-56, 127.
10. Афанасьев С.А., Семенцов Д.И. Потоки энергии при интерференции электромагнитных волн // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178. – № 4. – С. 377-384.
11. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. – М.: Радио и связь, 1983. – 296 с.