УДК: 621.396.677 DOI: 10.26907/rwp29.2025.581-584

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ОТ УГЛА МЕЖДУ ТОЧКАМИ ИХ РАЗМЕЩЕНИЯ

О.В. Нескородова, А.А. Кононов, К.В. Смусева, Г.К. Усков

Воронежский государственный университет, 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1
E-mail: bazhanova_phys@bk.ru, kononov@phys.vsu.ru, smuseva@phys.vsu.ru, uskov@phys.vsu.ru

Аннотация. В работе исследуется вопрос о зависимости параметров, характеризующих возникающее между элементами антенной решётки взаимное влияние, от угла между точками, в которых эти элементы расположены. Проведено моделирование, к полученным результатам применена построенная и успешно опробованная ранее линейная модель эффектов взаимного влияния. Также изучена возможность априорного прогнозирования этих эффектов на основе диаграммы направленности изолированного антенного элемента.

Ключевые слова: антенная решетка; полуволновые диполи; матрица взаимного влияния; парциальная диаграмма направленности; параметры переизлучения

INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF THE MUTUAL COUPLING COEFFICIENTS OF ANTENNA ARRAY ELEMENTS ON THE ANGLE BETWEEN THEIR PLACEMENT POINTS

O.V. Neskorodova, A.A. Kononov, K.V. Smuseva, G.K. Uskov

Abstract. The paper examines the dependence of the parameters characterizing the mutual coupling of an antenna array elements on the angle between the points at which these elements are located. Modeling has been carried out, and a previously constructed and successfully tested linear model of mutual coupling effects has been applied to the obtained results. The possibility of a priori prediction of these effects based on the directivity pattern of an isolated antenna element has also been studied.

Keywords: antenna array; half-wave dipoles; mutual coupling matrix; partial directivity pattern; re-radiation parameters

Введение

Явление взаимного влияния излучающих элементов антенных решёток (АР), именуемое также в англоязычной литературе термином “coupling”, может в отдельных ситуациях вызывать заметные отклонения диаграмм направленности (ДН) антенных элементов (АЭ), находящихся в составе решётки (т. н. парциальных ДН), от «идеальных» диаграмм, которые характеризуют изолированные АЭ, размещённые в тех же координатах, но рассматриваемые как бы в отсутствие всех остальных элементов [1–3]. В некоторых из весьма многообразных областей применения антенных решёток подобные эффекты иногда бывают способны оказывать достаточно ощутимое влияние на целевые характеристики функционирования АР [1–2, 4–5]. В связи с этим задача анализа возникающих в парциальных ДН искажений является актуальной; ещё большую значимость приобретает вопрос о возможности их прогнозирования на основе некоторого набора априорных данных.

Согласно линейной модели взаимного влияния АЭ, парциальная ДН представляется в виде суперпозиции всех идеальных ДН той же АР [3, 6]. Это удобно описывать с помощью матрицы взаимного влияния [7], каждый коэффициент $\dot{c}_{mn}$ которой показывает вклад n-го АЭ в формирование m-й парциальной ДН. В [8] было показано, что эта матрица (определяемая по полученным экспериментом или моделированием данным об идеальных и парциальных ДН путём псевдоинверсии [9]) может быть найдена теоретически с помощью ещё одной матрицы, элементы $\dot{q}_{mn}$ которой характеризуют однократные переизлучения и, в свою очередь, обычно определяются анализом взаимного влияния в АР сходной структуры, но меньшего размера. В настоящей работе рассматривается зависимость этих величин от взаимного расположения соответствующих АЭ, а именно от угла между точками их размещения (заметим: аналогичная зависимость для коэффициентов взаимного влияния была частично исследована в [7]).

Математическое описание антенных элементов и их взаимного влияния

Наша основная цель — изучить зависимость описывающего однократное переизлучение между двумя АЭ коэффициента $\dot{q}$ от угла θ, под которым один из этих элементов виден из точки расположения другого. В частности, требуется проверка гипотезы о том, что выражение этой зависимости будет так или иначе содержать в себе диаграмму направленности АЭ (стоит пояснить, что, хоть эффекты взаимного влияния и относятся, конечно, к явлениям ближней зоны, возможность прогнозировать их хотя бы частично на основе ДН представляла бы большой практический интерес, так как именно ДН является основной характеристикой любого излучающего устройства, следовательно, предполагается известной). Для этого вначале придётся выбрать модель конкретных АЭ и определить параметры их взаимного влияния для некоторого набора значений θ.

Напомним, что, согласно вышеуказанной линейной модели [6–8], парциальные диаграммы $\dot{\mathbf{D}}_{1;2}^{(p)}$ двух АЭ выражаются через их идеальные ДН $\dot{\mathbf{D}}_{1;2}$ как

$$\dot{\mathbf{D}}_1^{(p)} = \dot{c}_{11}\dot{\mathbf{D}}_1 + \dot{c}_{21}\dot{\mathbf{D}}_2, \quad \dot{\mathbf{D}}_2^{(p)} = \dot{c}_{21}\dot{\mathbf{D}}_1 + \dot{c}_{22}\dot{\mathbf{D}}_2. \tag{1}$$

причём с учётом свойства взаимности параметры переизлучения равны

$$\dot{c}_{12} = \dot{c}_{21}, \quad \dot{c}_{11} = \dot{c}_{22}. \tag{2}$$

На практике, однако, соотношение (1) не обязательно выполняется в точности, а (2), как правило, достигается только после принудительного усреднения экспериментальных данных (впрочем, соответствующие коэффициенты, не удовлетворяя строгому равенству, обычно всё же принимают достаточно близкие значения). Аналогично придётся поступать и с матрицей параметров однократных переизлучений: определяя её, как обычно [8], выражением

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_{11} & \dot{q}_{12} \\ \dot{q}_{21} & \dot{q}_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \dot{c}_{11} & \dot{c}_{12} \\ \dot{c}_{21} & \dot{c}_{22} \end{pmatrix}^{-1}, \tag{3}$$

мы будем затем усреднять результаты по принципу $\dot{q} = (\dot{q}_{12} + \dot{q}_{21})/2$ (кроме того, при пользовании выражением (3) по близости $\dot{q}_{11} \approx \dot{q}_{22}$ к нулю можно судить об общей степени корректности применения линейной модели взаимного влияния).

В качестве модели АЭ, как и в [8], рассмотрим полуволновые диполи, наклонённые на $45°$ и расположенные на расстоянии $d \approx 0.66\lambda$ (рис. 1); угол θ отсчитывается от продольной оси диполя. Как известно [10], в таком случае ДН такого АЭ, по сути, определяется формулой

$$\dot{\mathbf{D}}(\theta) = \dot{\mathbf{e}}_\theta(\theta) \cdot F(\theta), \quad F(\theta) = \tfrac{1}{\sin\theta} \cdot \cos\left(\tfrac{\pi}{2}\cos\theta\right), \tag{4}$$

при этом (ввиду симметрии — см. рис. 1), если направление из центра 1-го диполя на 2-й задаётся углом θ, то обратное направление соответствует углу $\pi - \theta$, в то же время, на основе (4) нетрудно убедиться, что $F(\theta) = F(\pi - \theta)$, поэтому учитывающий направленные свойства обоих АЭ множитель равен $\dot{\mathbf{D}}_1^{\top} \cdot \dot{\mathbf{D}}_2 = F(\theta) \cdot F(\pi - \theta) = F^2(\theta)$.

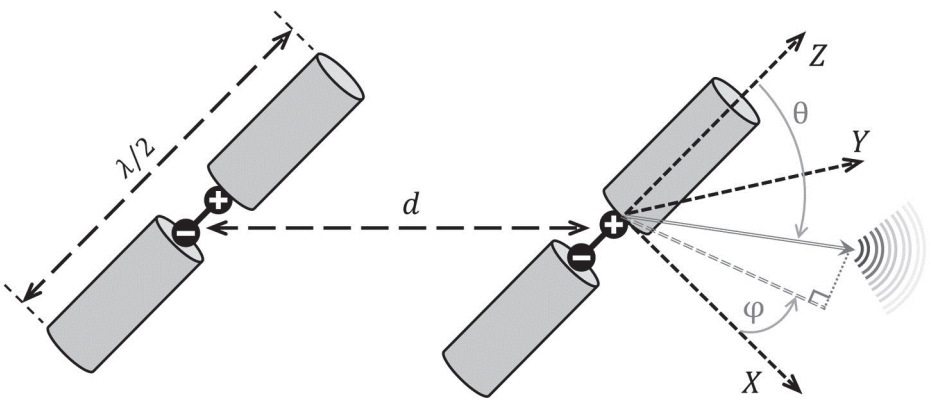

Рис. 1. Модель двух взаимодействующих диполей с указанием направлений отсчёта углов

Результаты моделирования и их анализ

Изначально оба диполя были расположены на одной оси, что соответствует $\theta = 0°$. При этом наблюдалось некоторое малое, но отличное от нуля значение коэффициента $\dot{q} = \dot{q}_0$, усреднённого вышеописанным образом. Поскольку известно, что диполь не излучает вдоль собственной оси, это обстоятельство может быть объяснено эффектами реактивной (т. е. не волновой) природы, которые имеют место в ближней зоне и не могут быть учтены на основе данных, содержащихся в ДН. Поэтому далее, когда значение угла θ изменялось (с шагом $10°$), из получаемых значений параметра переизлучения $\dot{q}$ вычиталась величина $\dot{q}_0$. В итоге была сформирована зависимость «коэффициента однократного переизлучения в дальнюю зону (Far Field)» $\dot{q}_{FF} = \dot{q} - \dot{q}_0$ от угла θ. Она представлена на рис. 2 вместе с соответственным образом отнормированной зависимостью $F^2(\theta)$, а также с аналогичной кривой, построенной для более простой характеристики направленности

$$F_0(\theta) = \sin\theta, \tag{5}$$

свойственной бесконечно малому диполю. Кроме того, там же изображена зависимость фазы $\dot{q}_{FF}$. Далее, для полноты картины, на рис. 3 приведены зависимости амплитуд и фаз всех коэффициентов $\dot{c}_{mn}$ и $\dot{q}_{mn}$ от угла θ (в том числе, можно заметить наличие вышеупомянутой симметрии параметров, выражаемой соотношениями (2)).

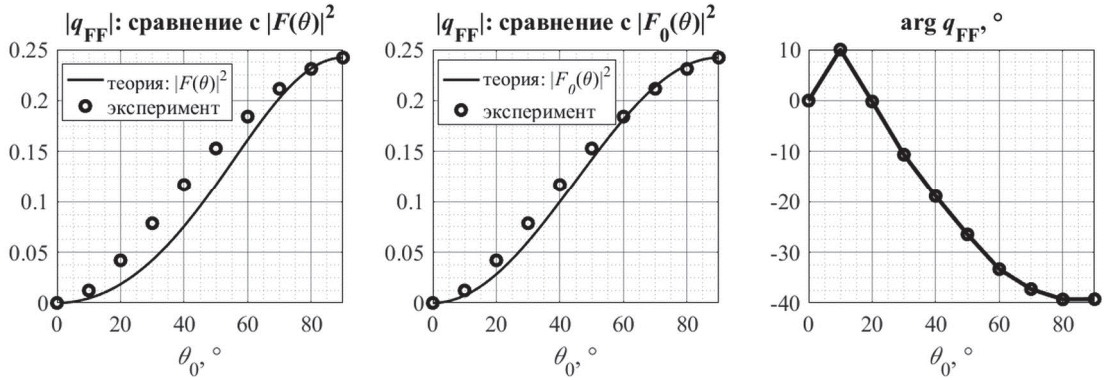

Рис. 2. Зависимость коэффициента переизлучения от угла между антенными элементами

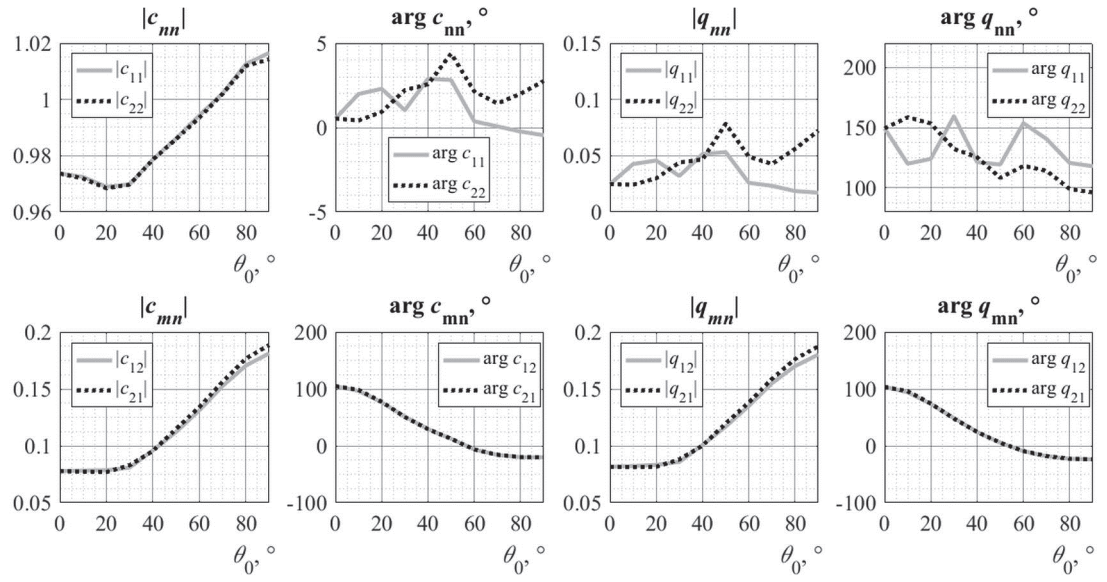

Рис. 3. Зависимость модулей и фаз коэффициентов взаимного влияния и переизлучения от угла между антенными элементами

Из рис. 2 видно, что в обоих случаях удалось, как минимум, качественно предсказать ход изменения модуля коэффициента $\dot{q}$. Более того, формула (5) оказалась даже более пригодной для прогнозирования. Это, вероятно, можно объяснить тем, что реальное переизлучение волн происходит всё же в ближней зоне и сводится к суперпозиции взаимодействий элементарных участков АЭ, то есть как раз бесконечно малых диполей с ДН, заданной зависимостью (5); её влияние может оказаться более решающим в результате усреднения взаимодействий отдельных участков (у которых взаимное расположение несколько различается).

Заключение

В работе рассмотрена зависимость коэффициента переизлучения, который характеризует взаимное влияние между двумя антенными элементами, от угла между точками их размещения. На основе развитой в предшествующих исследованиях линейной модели взаимного влияния проанализирован конкретный пример. Показана возможность прогнозирования эффектов взаимного влияния по диаграмме направленности изолированного антенного элемента.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00891, https://rscf.ru/project/24-19-00891/. Для выполнения численных расчетов в работе использовалось оборудование учебно-научного дизайн-центра проектирования радиоэлектронных систем СВЧ, терагерцового и оптического диапазонов на отечественной электронной компонентной базе ФГБОУ ВО «ВГУ» в рамках реализации федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности».

Список литературы

1. Urimubenshi F., Konditi D., Iyakaremye J., Mpele P., Munyaneza A. A Novel Approach for Low Mutual Coupling and Ultra-Compact Two Port MIMO Antenna Development for UWB Wireless Application // Heliyon. 2022. – Vol. 8. – No. 3. – P. 1–13.
2. Паршин Ю.Н., Грачев М.В. Анализ пропускной способности MIMO системы связи с учетом взаимного влияния каналов приемного тракта // Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь»: в 6 т. – Воронеж, 2019. – Т. 5. – С. 242–248.
3. Steyskal H., Herd J. Mutual Coupling Compensation in Small Array Antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1990. – Vol. 38. – No. 12. – P. 1971–1975.
4. Wang H., Li A., Liu Y.-F., Qin Q., Song L., Li Y. Active Reconfigurable MIMO Communications: Capacity Maximization Pattern Design // 2022 IEEE 12th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). – Trondheim, Norway, 2022. – P. 271–275.
5. Бобрешов А.М., Серегина Е.А., Смусева К.В., Усков Г.К. Методики улучшения направленных свойств апертурных приемных элементов пеленгационной антенной решетки // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2019. – Т. 22. – № 4. – С. 44–49.
6. Бажанова О.В., Степкин В.А., Бобрешов А.М., Усков Г.К., Смусева К.В., Аверина Л.И. Оценка искажения парциальных диаграмм направленности элементов ФАР по матрицам рассеяния и диаграмме изолированного элемента // Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь»: в 5 т. – Воронеж, 2023. – Т. 4. – С. 198–201.
7. Бажанова О.В., Кононов А.А., Смусева К.В., Степкин В.А., Усков Г.К. Исследование коэффициентов взаимного влияния в двухполяризационных антенных решетках // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2023. – Т. 26. – № 4. – С. 78–87.
8. Бажанова О.В., Кононов А.А., Смусева К.В., Усков Г.К. Особенности учёта эффектов взаимного влияния антенных элементов в системах Massive-MIMO // Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь»: в 5 т. – Воронеж, 2024. – Т. 4. – С. 158–167.
9. Тыртышников Е.Е. Матричный анализ и линейная алгебра. – М.: Физматлит, 2007. – 480 с.
10. Наденко С.И. Антенны. – М.: Связьиздат, 1959. – 551 с.