

The method of estimating the parameters of the electromagnetic fields scattered by the object with complex form in the near zone of wireless sensor networks

Методика оценки параметров электромагнитных полей, рассеянных объектом, имеющим сложную форму, в ближней зоне беспроводных сенсорных сетей

А.П. Преображенский, Я.Е. Львович, J. Štefanovič

Abstract:

At present time, many applications are connected with wireless sensor networks. Through such networks it is possible to determine the coordinates of various objects based on the analysis of the electromagnetic field distribution in space. This paper is based on the methodology that uses the representation of an object of complex shape as a set of facets, we investigate the characteristics of electromagnetic field scattered by this object in its near zone. It is shown how the calculated data are used to explore the effect how the spatial configuration of the field influences the accuracy of measurement of angular coordinates of the object. The calculated relative field amplitude of the object and the plate depends from the angle for the near zone to the far zone. The graphical analysis of the dependencies shows that in addition to monotonic attenuation length fields there exist oscillating damped oscillations. It is supposed that the antenna is moved around the object at random to get averaged characteristics over all measurement angles of the scattered field. After calculating the parameters of the distribution law of a random variable from section to section, we can conclude about how the process is changing after time. The analysis demonstrates that when we move from the far zone to the near, there is a shift of peak values of amplitudes and there is an extension of the main lobe of the secondary radiation. The histograms of the distributions of amplitudes and phases of a complex object were elaborated. After analysis it was found that the distribution of instantaneous values of the amplitudes of the scattered field by the object is described by Rayleigh law.

If we consider the distribution of the instantaneous phase of the scattered field, the shape of the histogram is close in form to the histogram of a uniform law. The analysis of the results allows to assert that the regularities of the distribution of amplitude and phase values of the scattered field related to the far and near zones are the same. Regressive function will be linear and its parameter is an angle of object, which coordinates are computed. The results will be useful to improve the accuracy of determining the coordinates of objects in wireless sensor networks.

Keywords:

Electromagnetic field, near zone, modeling.

ACM Computing Classification System:

Computer-communication networks, Distributed Systems, Local and Wide-Area Networks, Information systems applications, Communications Applications

Аннотация

В настоящее время все большее применение имеют беспроводные сенсорные сети. На основе таких сетей существуют возможности определения координат различных объектов на основе анализа распределения электромагнитного поля в пространстве. В статье на основе методики, в которой используется представление объекта сложной формы в виде совокупности фазетов, исследуются характеристики рассеянного этим объектом поля в его ближней зоне. Показано, каким образом, используя расчетные данные, можно исследовать влияние пространственной конфигурации поля на точность измерения угловых координат объекта. Приведены расчетные зависимости относительной амплитуды поля объекта и пластины от угла для ближней зоны, для дальней зоны. Анализ графических зависимостей демонстрирует, что помимо монотонного спада поля существуют осциллирующие затухающие колебания. Считается, что антенна перемещается вокруг анализируемого объекта случайным образом, находятся усредненные по всем углам наблюдения характеристики рассеянного поля. Проведя расчет параметров закона распределения случайной величины от сечения к сечению, мы можем сделать вывод о том, каким образом изменяется процесс во времени. Проведенный анализ показал, что при переходе из дальней зоны в ближнюю происходит сдвиг пиковых значений по амплитудам и идет расширение главного лепестка вторичного излучения. Даны гистограммы распределений амплитуд и фаз сложного объекта. После проведения анализа было установлено, что распределение мгновенных значений амплитуд рассеянного поля объектом описывается законом Рэлея. Если рассматривать распределение мгновенных значений фаз рассеянного поля, то форма гистограммы близка по форме к гистограмме равномерного закона. Анализ результатов дает возможность утверждать, что закономерности распределения значений по амплитудам и фазам рассеянного поля, относящимся к дальней и ближней зонам,

будет одинаковым. Функцией регрессии, которая приближает множество исходных точек при наименьшей среднеквадратичной погрешности, будет прямая линия, ее параметром является угловой размер объекта, координаты которого определяются. Результаты работы будут полезны для повышения точности определения координат объектов в беспроводных сенсорных сетях.

Ключевые слова:

электромагнитное поле, ближняя зона, моделирование.

■ Введение

В настоящее время все большее применение имеют беспроводные сенсорные сети. На основе таких сетей существуют возможности определения координат различных объектов на основе анализа распределения электромагнитного поля в пространстве. Задачи, связанные с рассмотрением законов изменения положения мгновенных радиолокационных центров отражения, описывающих объект сложной формы, рассматриваются разработчиками систем связи уже достаточно давно [1-3]. Анализ проводится при условии интерференции волн, которые рассеиваются разными элементами объекта. Построение соответствующих алгоритмов оценки характеристик рассеяния объектов даст возможности для уменьшения ошибок измерения угловых координат объектов.

Угловые ошибки возникают вследствие флуктуаций фронтов рассеянных объектами электромагнитных волн, которые распространяются к апертуре приемной антенны [1-3]. Мы можем наблюдать флуктуации, когда происходит перемещение антенны относительно анализируемого объекта, поскольку она пересекает пространственную структуру вторичного поля этого объекта. Значение их интенсивности определяется характеристиками структуры объекта, траекторией и скоростью относительного движения объекта и приемной антенны. Помимо этого, есть связь флуктуаций с тем, что трансформируется отмеченная пространственная структура поля во времени как результат того, что существуют перемещения, повороты, вибрации исследуемого объекта и происходят изменения свойств среды в которой распространяются электромагнитные волны.

Исследователями было установлено теоретическим и экспериментальным образом, что могут быть флуктуации направления пеленга объектов, которые больше, чем его угловые размеры [4, 5]. На практике решение указанной проблемы может быть полезным при управлении движением нескольких близко расположенных объектов.

■ 1 Цель работы

Ошибки измерения угловых координат объекта появляются вследствие того, что искажается пространственно-временная структура рассеянного электромагнитного поля в беспроводных сенсорных сетях. Поэтому требуется определить конфигурации такого поля в области расположения объекта, особенно в той области,

которая находится рядом с поверхностью объекта, поскольку ее нерегулярность оказывает сильное влияние на структуру поля. Помимо этого, на практике представляет интерес определение закономерностей распределений мгновенных значений амплитуд и фаз рассеянных полей в ближней зоне объекта. Тогда, основываясь на полученных данных, есть возможность для предложения технических решений, ведущих к уменьшению влияния угловых шумов при измерении угловых координат объектов в ближней зоне в беспроводных сенсорных сетях.

2 Анализ литературных источников по рассматриваемой проблеме

В публикациях по указанной тематике, рассматриваются разные подходы и методики, позволяющие проводить требуемые оценки. Среди публикаций можно отметить разработку моделей, основанных на разных электродинамических методах обработки характеристик рассеяния объектов, имеющих сложную форму, например, [6-8], так как исследования показывают, что чем больше факторов, связанных с формированием рассеянных полей, мы сможем внести в модель, тем больше появляется возможностей для учета и исследования тонких эффектов. Есть работы, в которых рассматриваются статистические параметры флуктуаций излучения источников разных видов [9]. Можно познакомиться с особенностями математических моделей, дающих описание амплитудного, углового и дальномерного шумов объектов вблизи границ раздела сред [10].

Есть трудности в работе систем управления объектами также связанные с тем, что в состав объектов могут входить компоненты, имеющие нелинейные передаточные характеристики. То есть, существует практическая необходимость в определении параметров нестационарных процессов на входе антенны, которая располагается в ближней зоне объекта со сложной формой.

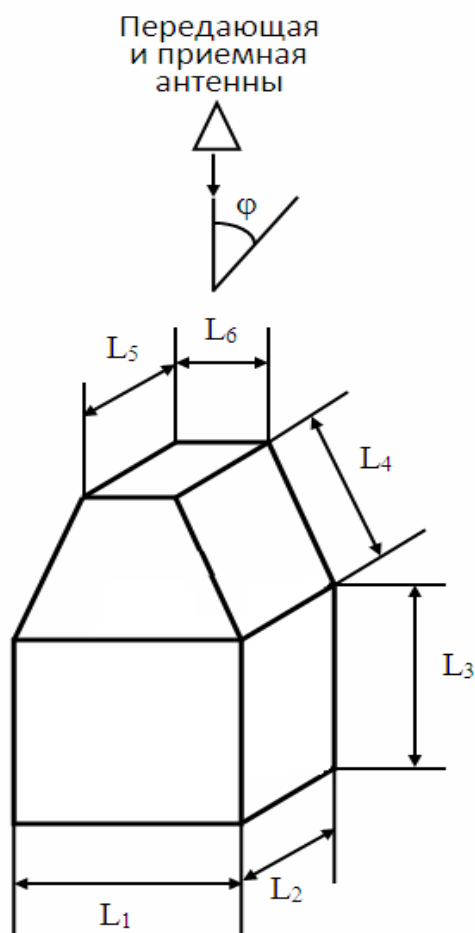
Для того, чтобы решить задачу, требуется провести расчет электромагнитного поля рассеянного объектом. Решения на основе аналитического представления могут быть получены лишь для очень ограниченной совокупности объектов, например [11-13]. Но с использованием численных методов решения класс анализируемых объектов можно существенно расширить, в том числе и при реализации вычислений на современных персональных компьютерах. Это дает возможности для полной замены физического эксперимента расчетами, что определяет весомые преимущества, так как результаты для любой заданной точности могут быть получены намного быстрее и дешевле [14-17].

3 Методика

Объект сложной формы может быть представлен в виде совокупности facets [18], которые являются элементами, имеющими одинаковую форму. На основе того, что проводится численное интегрирование плотностей поверхностных токов, которые наведены падающей электромагнитной волной, проводится вычисление полей, отраженных от каждого из facets, и они суммируются.

Для ускорения вычислений следует применять методики, на основе которых интегрируются быстроосциллирующие функции. После проведения расчетов получают амплитудные и фазовые диаграммы полей рассеяния для заданного сектора углов. Указанный способ расчета характеризуется рядом важных достоинств, среди которых можно указать: нет больших ограничений по тому, какая геометрия объекта и как она изменяется, получение точного учета по фазовым соотношениям полей, которые рассеиваются фацетами, возможности для того, чтобы учесть переотражения между компонентами объекта.

На рис. 1 приведен пример исследуемого объекта. Рассматривался случай, когда передающая и приемная антенны совпадали (моностатическая локация), угол отсчитывался от вертикального направления. Частота падающей волны была 10 ГГц (длина волны – 3 см).



$$L_1=10\lambda, L_2=8\lambda, L_3=12\lambda, L_4=7\lambda, L_5=6\lambda, L_6=3\lambda.$$

Рисунок 1: Пример анализируемого объекта

Алгоритм расчета характеристик рассеяния идеально проводящей дифракционной структуры, базирующийся на методе интегральных уравнений, имеет следующие основные этапы:

1. Записывается интегральное уравнение Фредгольма второго рода для электрического тока $J_S(\mathbf{r})$ с учетом граничных условий на поверхности идеально проводящей дифракционной структуры.

2. С целью определения неизвестных поверхностных электрических токов $J_S(\mathbf{r})$ на поверхности рассматриваемой структуры интегральное уравнение решается методом моментов с кусочно-постоянными базисными функциями и пробными функциями - δ - функциями Дирака.

В результате этого интегральное уравнение дискретизируется и приводится к системе линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{bmatrix} U_{xx} & U_{xy} & U_{xz} \\ U_{yx} & U_{yy} & U_{yz} \\ U_{zx} & U_{zy} & U_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

где J_x, J_y, J_z - компоненты плотности поверхностного электрического тока.

В приведенной выше системе уравнений блоки в матрице U вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} (U_{xx})_{mn} &= \frac{1}{2\pi_S} \int ((n_y)_m (\text{grad}'_y)_{mn} + (n_z)_m (\text{grad}'_z)_{mn}) ds'_n - \delta_{mn}; \\ (U_{xy})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi_S} \int (n_y)_m (\text{grad}'_x)_{mn} ds'_n; \quad (U_{xz})_{mn} = -\frac{1}{2\pi_S} \int (n_z)_m (\text{grad}'_x)_{mn} ds'_n; \\ (U_{yx})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi_S} \int (n_x)_m (\text{grad}'_y)_{mn} ds'_n; \quad (U_{yz})_{mn} = -\frac{1}{2\pi_S} \int (n_z)_m (\text{grad}'_y)_{mn} ds'_n; \\ (U_{yy})_{mn} &= \frac{1}{2\pi_S} \int ((n_x)_m (\text{grad}'_x)_{mn} + (n_z)_m (\text{grad}'_z)_{mn}) ds'_n - \delta_{mn}; \quad (2) \\ (U_{zx})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi_S} \int (n_x)_m (\text{grad}'_z)_{mn} ds'_n; \quad (U_{zy})_{mn} = -\frac{1}{2\pi_S} \int (n_y)_m (\text{grad}'_z)_{mn} ds'_n; \\ (U_{zz})_{mn} &= \frac{1}{2\pi_S} \int ((n_x)_m (\text{grad}'_x)_{mn} + (n_y)_m (\text{grad}'_y)_{mn}) ds'_n - \delta_{mn}, \end{aligned}$$

где $m, n = 1, \dots, N$, где N - число точек дискретизации поверхности дифракционной структуры.

Здесь δ_{mn} – символ Кронекера,

$$\text{grad } G_{mn} = -\hat{r}_{mn} \frac{1 + jkr}{r_{mn}} \exp(-jkr_{mn}) =$$

$$\mathbf{i}(\text{grad}_x)_{mn} + \mathbf{j}(\text{grad}_y)_{mn} + \mathbf{k}(\text{grad}_z)_{mn}, \quad (3)$$

где $\hat{r}_{mn} = \frac{\mathbf{r}_{mn}}{|\mathbf{r}_{mn}|}$ – единичный вектор, направленный из точки источника в точку наблюдения.

3. После решения приведенной системы уравнений (1) вычисляется рассеянное электромагнитное поле, связанное с найденным электрическим током $\mathbf{J}_s(\mathbf{r})$.

4 Анализ результатов

Рассмотрим некоторые результаты расчетов, которые были проведены на основе указанной методики. На рис. 2 изображены амплитудные диаграммы рассеянного поля указанного объекта для совмещенного приема при разных расстояниях до него.

В ближней зоне объекта, когда проводится интегрирование полей, которые рассеиваются фацетами, различия в их амплитудах довольно незначительны, при расчетах требуется учитывать сдвиг фазы.

То, что у векторов \mathbf{E} - и \mathbf{H} - в рассеянном поле помимо поперечной, есть и продольная компонента, определяет более сложную структуру поля в ближней зоне, чем в дальней зоне. Зависимость от r не похожа на ту, которая есть в сферической волне $\exp(-jkr)/r$. Так же, от r есть зависимость и углового распределения амплитуд поля.

Анализ рис. 2 демонстрирует, что когда мы переходим из дальней зоны в ближнюю, то происходит сдвиг пиковых значений по амплитудам (на 4-5%) и расширяется главный лепесток вторичного излучения. Когда уменьшается расстояние r , то наблюдаем раздваивание главного лепестка углового распределения амплитуд поля происходит его частичное сливание с боковыми лепестками.

На рис. 3 дана зависимость амплитуды рассеянного поля от расстояния для объекта, имеющего максимальный размер 30λ . Также дана зависимость для амплитуды поля, рассеянного идеально проводящей пластиной с размером 30λ . Анализ графических зависимостей демонстрирует, что помимо монотонного спада поля существуют осциллирующие затухающие колебания. Такую осцилляцию амплитуд для ближней зоны можно объяснить тем, что есть интерференция волн, которые идут в точку наблюдения от разных зон Френеля на поверхности объекта, значение частоты таких осцилляций будет больше, чем меньше расстояние между точкой наблюдения и поверхностью. Для объектов, имеющих сложную форму поверхности, указанная картина зависимости амплитуды поля от расстояния является обычной, но идет изменение среднего значения амплитуды в зависимости от того, какой ракурс движения к объекту.

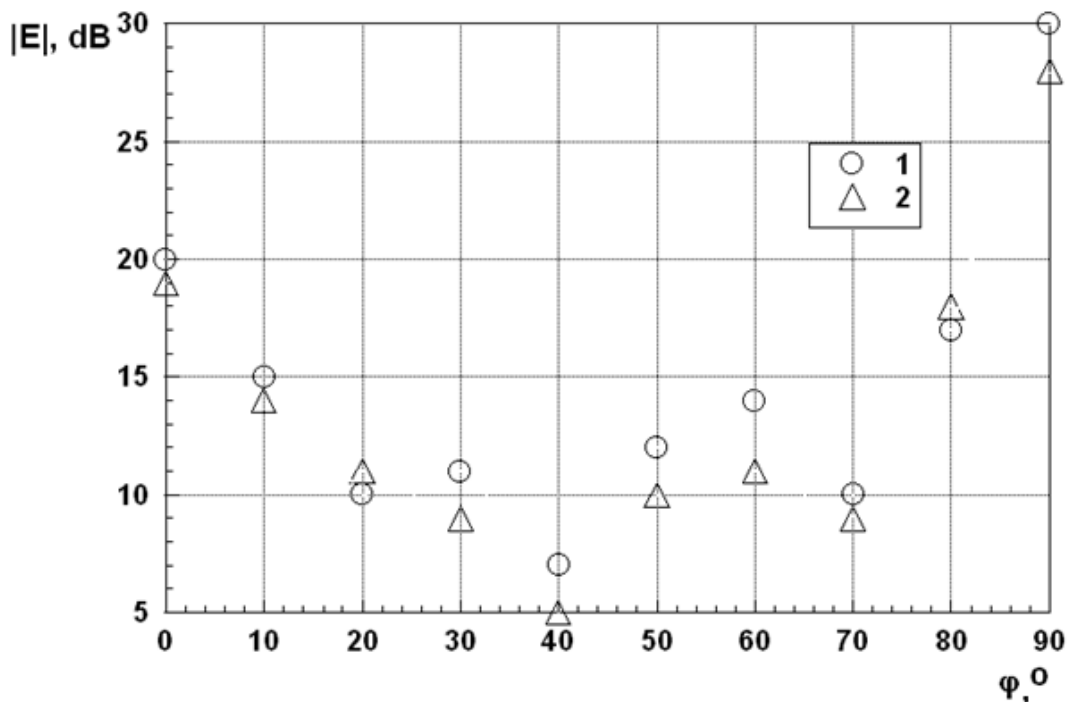


Рисунок 2: Зависимость относительной амплитуды поля от угла:

1 – для ближней зоны,

2 – для дальней зоны.

Мы будем считать, что антенна перемещается вокруг объекта случайным образом, поэтому для того, чтобы решить задачу, требуется найти усредненные по всем углам наблюдения характеристики рассеянного поля. Пусть антенна движется по прямой линии к анализируемому объекту с постоянным значением радиальной скорости V . Значение величины r позволяет определить сечение случайного процесса по входу приемной антенны для момента времени t . Проведя расчет параметров закона распределения случайной величины от сечения к сечению, мы можем сделать вывод о том, каким образом изменяется процесс во времени.

Параметры закона распределения выбранной случайной величины могут быть найдены на основе накопления определенного объема экспериментальных данных и в дальнейшем мы их обрабатываем в рамках методов математической статистики.

Проведено построение гистограмм распределений амплитуд и фаз рассеянного поля. Например, на рис. 4 приведены гистограммы, которые сформированы на основе данных расчетов в ближней зоне объекта.

Было проведено разбиение всего диапазона изменения значений случайных величин на количество интервалов $n=200$. Амплитуды и фазы откладываются по оси абсцисс, относительные частоты того, что попадаем в интервалы: – по амплитудам и – фазам, соответственно по оси ординат. Решаем задачу выравнивания статистических рядов. То есть требуется определить такую гладкую функцию, на основе которой мы можем наилучшим образом сделать описание данного статистического распределения.

Задача, связанная с выравниванием статистического ряда будет представлена как задача, связанная с тем, чтобы определить такие значения параметров, для которых будет наилучшее соответствие среди статистических и теоретических распределений. После проведения анализа рис. 4 мы определяем, что распределение мгновенных значений амплитуд рассеянного поля объектом описывается законом Рэлея.

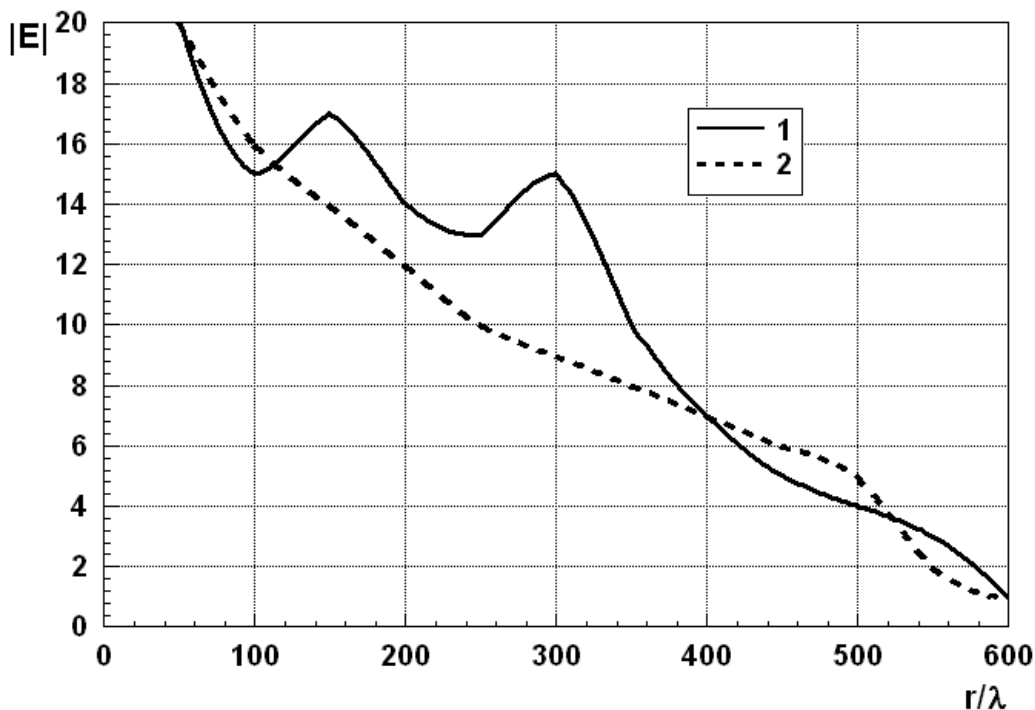
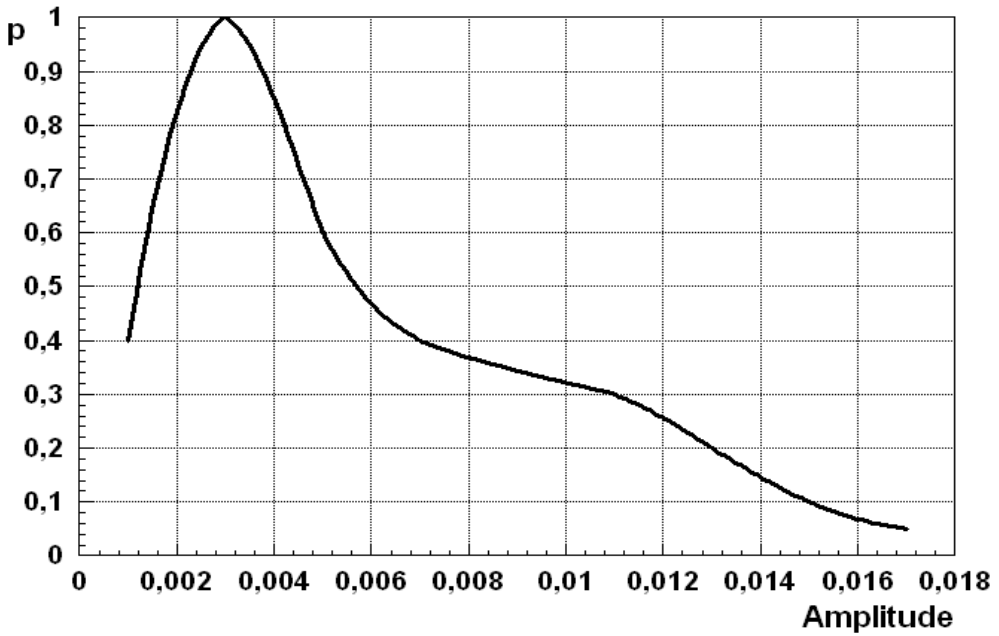


Рисунок 3: Зависимость амплитуды рассеянного поля от расстояния до объекта: 1 – объект, 2 – пластина.

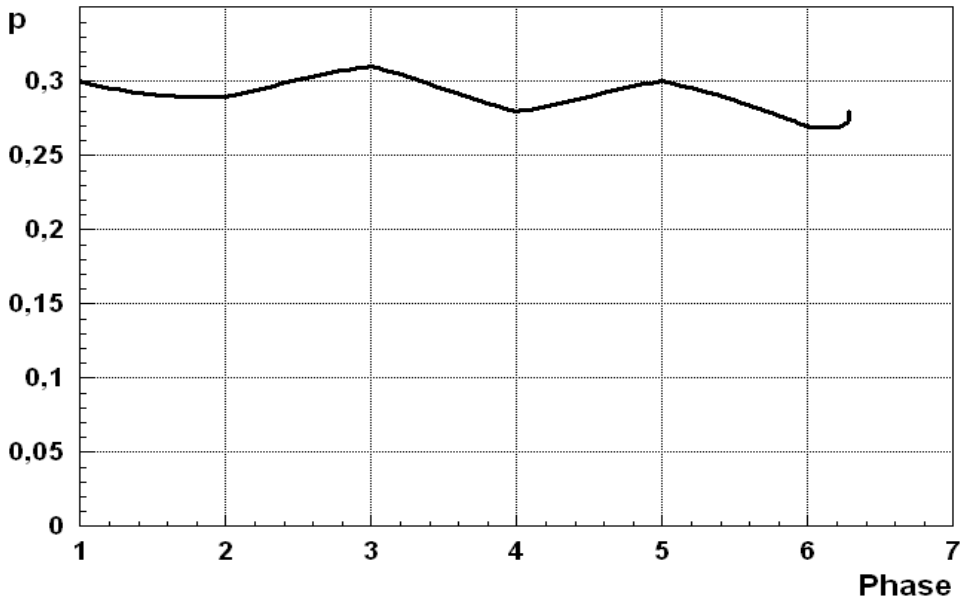
Параметр этого распределения определяем на основе численного метода (в нашем примере 0,00156).

Если рассматривать распределение мгновенных значений фаз рассеянного поля, то форма гистограммы близка по форме к гистограмме равномерного закона. Значение относительных частот попадания значений фаз в выбранные интервалы приблизительно равно 0,235. Это говорит о том, что число элементов в выборке является достаточным для того, чтобы считать, что она состоятельна.

Проведенный анализ результатов дает возможность утверждать то, что закономерности распределения значений по амплитудам и фазам рассеянного поля, относящимся к дальней и ближней зонам будет одинаковым.



a)



б)

Рисунок 4: Гистограммы распределений амплитуд (а) и фаз (б) сложного объекта

Кроме того, по мере уменьшения расстояния до объекта идет увеличение среднеквадратического отклонения (СКО) значений мгновенных амплитуд. Это можно объяснить тем, что возрастает влияние кривизны поверхности объекта на механизм формирования рассеянного поля. Функцией регрессии, которая приближает множество исходных точек при наименьшей среднеквадратичной погрешности, будет прямая линия, уравнение ее параметром является угловой размер объекта.

Значение коэффициента корреляции среди точек полученной зависимости и регрессионной прямой будет равен 0,951. В результате, было установлено, что существует линейная зависимость СКО значений амплитуд поля от углового размера поля как для дальней, так и для ближней зоны.

■ Выводы

Появление флуктуаций интенсивности поля мгновенного центра отражения, когда происходит сближение антенны и объекта в беспроводных сенсорных системах связи, связано с двумя причинами: антенна движется через неоднородную структуру рассеянного поля и объект может тоже двигаться. Проводя анализ величины дисперсии (СКО) сигнала, есть возможности определения закономерностей распределений мгновенных значений амплитуд и фаз рассеянных полей в ближней зоне объекта, что позволяет уточнить его координаты.

Анализ результатов дает возможность утверждать, что закономерности распределения значений по амплитудам и фазам рассеянного поля, относящиеся к дальней и ближней зонам, будет одинаковым. Функцией регрессии, которая приближает множество исходных точек при наименьшей среднеквадратичной погрешности, будет прямая линия, ее параметром является угловой размер объекта, координаты которого определяются. Результаты работы будут полезны для повышения точности определения координат объектов в беспроводных сенсорных сетях.

■ Литература

- [1] NEWELL A.C., GREGSON S.F. 2014. Estimating the Effect of Higher Order Azi-muthal Modes in Spherical Near-Field Probe Correction. In: The 8th European Confer-ence on Antennas and Propagation (EuCAP 2014), 6-11 April 2014.
- [2] NEWELL A.C., GREGSON S.F. 2013. Estimating the Effect of Higher Order Modes in Spherical Near-Field Probe Correction. In: Antenna Measurement Techniques Associ-ation (AMTA) 35th Annual Meeting & Symposium, Colum-bus, Ohio, 2013, October 6-11.
- [3] HANSON J.E 1988. Spherical Near-Field Antenna Measurements. In: IEEE Electro-magnetic Waves Series 26, 1988, Peter Peregrinus Ltd, London, UK, ISBN 0 86341 110 X, pp. 149.

- [4] WEDGE, S.W. and RUTLEDGE, D.B. 1992. Wave techniques for noise modeling and measurement. In: IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 40, 1992, no. 11, pp. 2004-2012.
- [5] AN, H., NAUWELAERS, B., VAN DE CAPELLE, A. 1993. Measurement technique for active microstrip antennas. In: Electronic Letters, Vol. 29, 1993, No. 18, pp. 1646 - 1647.
- [6] МИЛОШЕНКО, О.В. 2012. Методы оценки характеристик распространения радиоволн в системах подвижной радиосвязи. In: Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 60-62.
- [7] МИШИН Я.А. 2013. О системах автоматизированного проектирования в беспроводных сетях. In: Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 153-156.
- [8] ГОЛОВИНОВ С.О., ХРОМЫХ А.А. 2012. Проблемы управления системами мобильной связи. In: Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
- [9] SCHMIDT R.O. 1986. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation. In: IEEE Trans. On Antennas and Propagation, vol. AP-34, 1986, no. 3, pp. 276-280.
- [10] WALLS F.L. 1993. Reducing errors, complexity, and measurement time for PM noise measurements. In: Proc. 1993 Frequency Control Symp., 1993, pp.81-86.
- [11] ISKANDER M.F. and YUN Z. 2002. Propagation prediction models for wireless communication systems. In: IEEE Trans. Microw. Theory Techniques, vol. 50, 2002, № 3, pp.662-673.
- [12] LEE S.W., DESCHAMPS G.A. 1976. A uniform asymptotic theory of electromagnetic diffraction by a curved wedge. In: IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-24, 1976, pp.25-34.
- [13] KNOTT E.F., SENIOR T.B.A., USLENGHI P.L.E. 1971. High frequency backscattering from a metallic disk. In: Proc. Inst. Elec. Eng., Vol. 118, 1971, No. 12, pp.1736-1742.
- [14] ПРЕОБРАЗHENСКИЙ А.П. 2005. Estimation of possibilities of combined procedure for calculation of scattering cross section of two-dimensional perfectly conductive cavities. In: Telecommunications and Radio Engineering. 2005. T. 63. № 3. С. 269-274.
- [15] LVOVICH I.Y., LVOVICH Y.E., ПРЕОБРАЗHENСКИЙ А.П., ЧОПОРОВ О.Н. 2016. Optimization of electromagnetic scattering characteristics on the objects of complex shape based on the "ant" algorithm. In: Research Journal of Pharmaceutical, Bio-logical and Chemical Sciences. 2016. T. 7. № 5. С. 990-998.
- [16] ПРЕОБРАЗHENСКИЙ А.П., ЧОПОРОВ О.Н. 2017. Оптимизация характеристик сигналов, рассеянных сложным объектом, на основе комбинированного алгоритма. In: International Journal of Advanced Studies. 2017. T. 7. № 1-2. С. 55-59.

- [17] ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ А.П., ЧОПОРОВ О.Н. 2017. Ускорение вычислений электродинамических характеристик составного объекта. In: International Journal of Advanced Studies. 2017. Т. 7. № 1-2. С. 65-69.
- [18] PAPA R.J., LENNON J.L., TAYLOR R.L. 1986. The variation of bistatic rough surface scattering cross section for a physical optics model. In: IEEE Trans. Antennas Propag. AP-34, 1986, pp.1229-1236.
-

Andrey Preobrazhenskiy

Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor,
Voronezh Institute of High Technologies
e-mail: app@vivt.ru

Prof. Yakov Lvovich

Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
Voronezh Institute of High Technologies
e-mail: ya-e-lvovich@vivt.ru

Juraj Štefanovič

Doctor of Sciences (Engineering),
Pan-European University, Bratislava, Slovakia
e-mail: juraj.stefanovic@paneurouni.com