

УДК 681.533.3: 519.8

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

© 2017 Н.А. Попов, О.Э. Чоракаев

Ульяновский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 29.09.2017

Статья посвящена исследованию структуры пространственного распределения уровня электромагнитного поля (ЭМП) при нелинейной радиолокации (НРЛ) и обоснованию причин, по которым НРЛ не указывает на излучающие нелинейные объекты.

Ключевые слова: радиолокация, электромагнитное поле, излучение, расчет напряженности поля.

Нелинейная радиолокация возникла в результате объединения радиолокации и поиска нелинейных элементов (НЭ), таких как различного типа закладки, подслушивающие и ТВ устройства, диктофоны и т.п. Принцип ее работы основан на том, что любое нелинейное устройство при облучении сильным ЭМП начинает переизлучать на высших гармониках: второй, третьей и т.д. Обнаружение НЭ ведется по принимаемому на высших гармониках излучению.

Реализация устройств НРЛ позволила получить ряд положительных эффектов, однако не достигнут главный эффект радиолокации: нелинейный локатор плохо «видит» НЭ. Отраженный от него сигнал принимается с различных направлений, а при перемещении оператора изменяется случайным образом.

На рис. 1 показана доработанная математическая модель исследования структуры ЭМП вблизи обнаруживаемого объекта [2].

Излучатель в направлении обнаруживаемого объекта (в дальнейшем – объекта) на частоте первой гармоники ω_1 зондирующего сигнала формирует сильное ЭМП. Облученный объект начинает переизлучать на высших гармониках $\omega_2, \omega_3, \dots$. Его представим эквивалентным передатчиком с мощностью, зависящей от степени облучения. Излучаемое поле оценивается приемником оператора. По изменениям его уровня при перемещениях определяется направление на излучающий объект.

Исследование процессов пространственного распределения уровня ЭМП при НРЛ рассмотрим в три этапа:

- в направлении на объект на частоте первой гармоники ω_1 зондирующего сигнала;
- в направлении от обнаруживаемого объекта в направлении на регистратор на второй

гармонике $\omega_2 = 2 \cdot \omega_1$ при постоянной мощности сигнала;

- в направлении от обнаруживаемого объекта в направлении на регистратор на второй гармонике ω_2 при случайной мощности сигнала от объекта, которая является функцией уровня ЭМП на частоте ω_1 .

Подстилающая поверхность модели представлена прямоугольником $X \times Y$ с шагом дискретизации dx и заданными диэлектрическими параметрами. Приемопередающая антенна излучателя и приемника располагается на уровне груди оператора на высоте h_1 в точке с начальными координатами i_o, j_o . Направление максимума диаграммы направленности антенны может быть выбрано произвольно, но на модели оно направлено по центру подстилающей поверхности (оси AF). Вид диаграммы направленности антенны облучателя в вертикальной и горизонтальной плоскостях показан на рис. 2.

В горизонтальной плоскости угол между максимумом диаграммы излучения антенны в горизонтальной плоскости и направлением на объект $\angle FAC = \alpha$.

Высота объекта h_2 может быть произвольной, на модели она расположена в плоскости $AOBC$ и образует угол $\angle BOE' = \beta$ между максимумом излучения антенны в вертикальной плоскости и направлением на объект.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМП ОТ ИЗЛУЧАТЕЛЯ В НАПРАВЛЕНИИ НА ОБНАРУЖИВАЕМЫЙ ОБЪЕКТ НА ЧАСТОТЕ ПЕРВОЙ ГАРМОНИКИ ω_1 СИГНАЛА

Исследование структуры ЭМП зондирующего сигнала проведено от «излучателя» в направлении обнаруживаемого объекта на частоте первой гармоники ω_1 сигнала.

Результирующее поле на объекте состоит из суммы полей прямой E_{np} и отраженной от подстилающей поверхности $E_{отр}$ волн [2]:

$$E = E_{np} + E_{отр}$$

Прямая волна E_{np} от излучателя до обнаружи-

Попов Николай Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение».

E-mail: Popov-kaf11@yandex.ru

Чоракаев Олег Эдуардович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение».

E-mail: olegchorakaev@yandex.ru

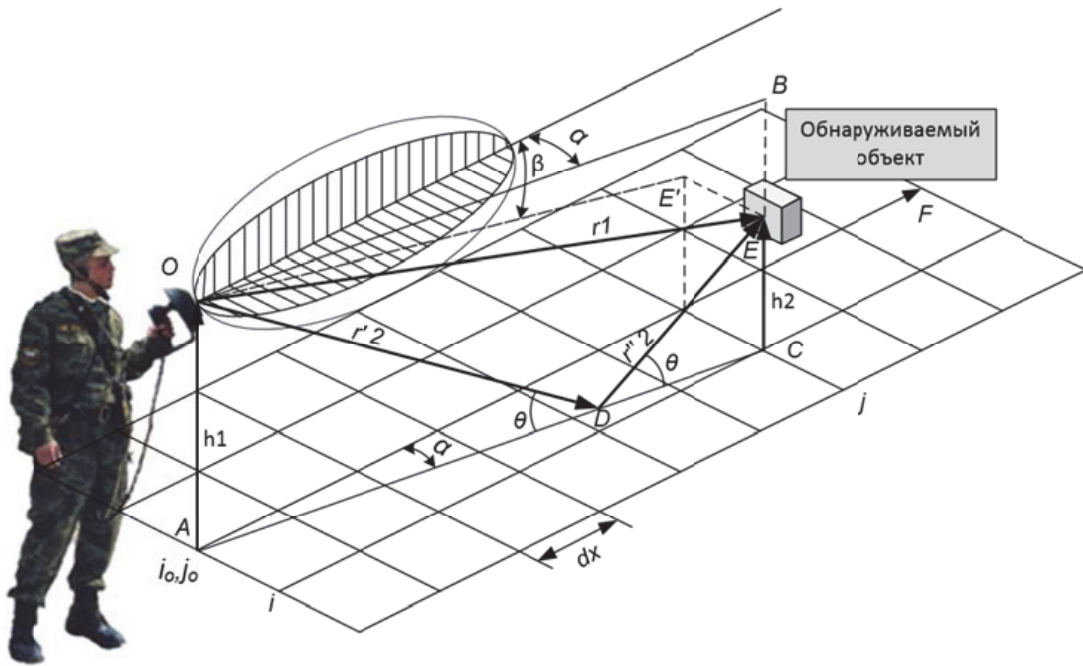


Рис. 1. Математическая модель исследования структуры ЭМП на плоской подстилающей

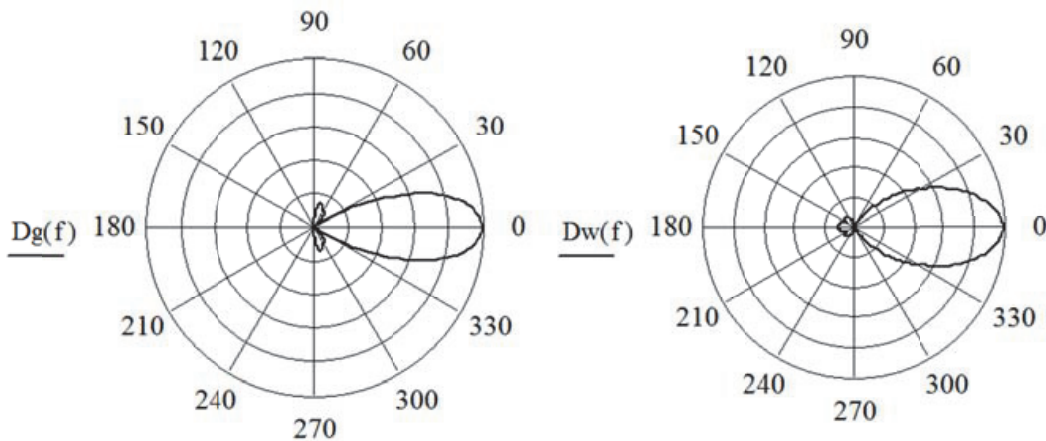


Рис. 2. Диаграмма направленности антенны облучателя в вертикальной и горизонтальной плоскостях

ваемого объекта распространяется по прямой OE на расстояние r_1 . Она рассчитывается по формуле

$$E_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{30 \cdot P_a \cdot G_1 \cdot f_{\Gamma}(\alpha) \cdot f_{\text{B}}(\beta_1)}}{r_1} \cdot e^{-ikr_1},$$

где: P_a и G_1 – мощность передатчика излучателя и КПД его фидера;

$f_{\Gamma}(\alpha)$ и $f_{\text{B}}(\beta_1)$ – ХДН антенны излучателя в двух плоскостях;

r_1 и k – расстояние до объекта и фазовый коэффициент.

Отраженная от подстилающей поверхности волна $E_{\text{отр}}$ лежит в той же плоскости и распространяется по прямым OD и DE на r_2 , причем $r_2 = r'_2 + r''_2$. Угол ее падения θ .

Расстояние r_2 и углы от максимума диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости в направлении объекта β_2 определяются в соответствии с выбранной моделью.

Напряженность поля отраженной волны $E_{\text{отр}}$ рассчитывается с учетом коэффициента отражения $R_{\text{вр}}$ по формуле

$$E_{\text{отр}} = R_{\text{вр}} \cdot \frac{\sqrt{30 \cdot P_a \cdot G_1 \cdot f_{\Gamma}(\alpha) \cdot f_{\text{B}}(\beta_2)}}{r_2} \cdot e^{-ikr_2}.$$

Расчет модуля коэффициента отражения вертикально поляризованной волны $|R_{\text{вр}}|$ проведен для наклонного падения плоской волны на границу раздела двух сред (воздух – среда с потерями) по [1]. Пространственное значение $|R_{\text{вр}}|$ зависит от диэлектрических параметров подстилающей поверхности и угла падения волны θ . Для влажной почвы с параметрами $\epsilon' = 10$ и $\sigma = 0,01 \text{ см/м}$ он представлен на рис. 3. Модуль коэффициента отражения $|R_{\text{вр}}|$ вблизи излучателя принимает минимальные значения, но на расстоянии 10...15 длин волн λ имеет практически постоянное значение.

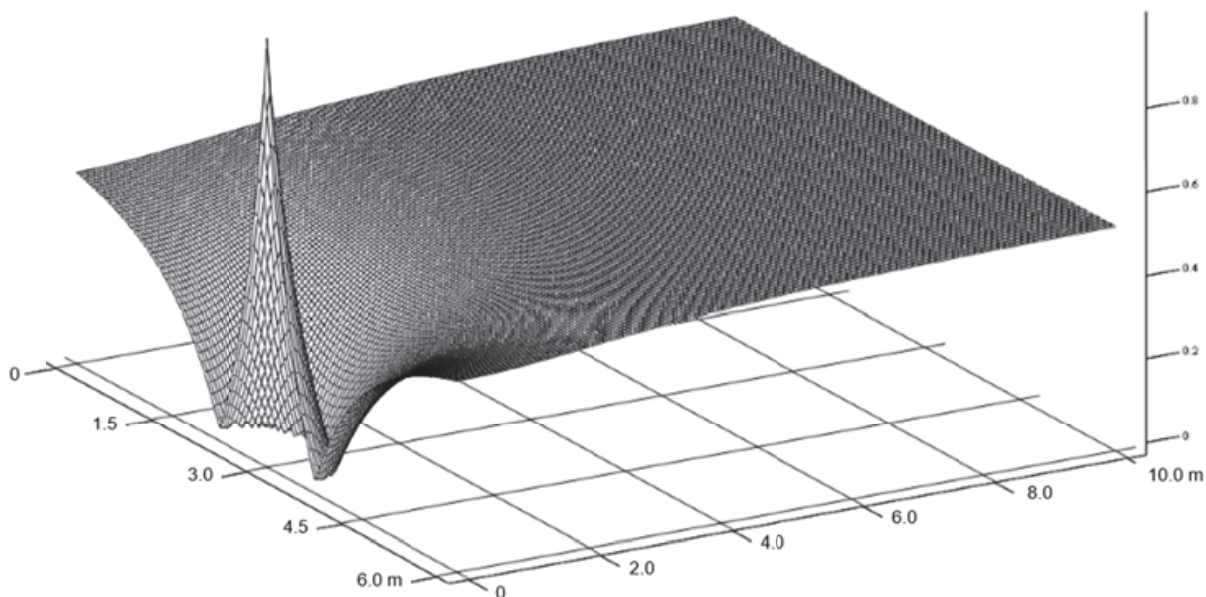


Рис. 3. Пространственное значение модуля коэффициента отражения $|R_{oz}|$ при вертикальной поляризации волн

В нелинейной радиолокации целесообразно использовать вертикально поляризованные волны, т.к. в силу большего ослабления отраженной волны уменьшается ее вредное воздействие на структуру общего поля.

В работе приведены результаты расчета напряженности поля для поверхности размерами $X \times Y = 6 \times 10$ м, при шаге дискретизации $dx = 0,05$ м, по модели рисунка 1, для частоты излучения $f = 2,4$ ГГц. Излучатель «размещен» на высоте $h_1 = 1,2$ м в точке с координатами $i_0 = 6$ м, $j_0 = 0$ м; ось излучателя направлена по горизонту по оси AF ; расчеты выполнены для влажной почвы равнинной и слабопересеченной местности с параметрами $\varepsilon' = 10$ и $\sigma = 0,01$ см/м.

Расчеты проводились для ряда высот размещения объекта от $h_2 = 0$ до $2,4$ м, однако на рис. 4 представлен график распределения уровня ЭМП зондирующего сигнала при высоте расположения объекта на высоте $h_2 = 1,2$ м;

Анализ графиков пространственного распределения при различных высотах размещения объекта h_2 показывает, что:

- пространственные распределения уровня напряженности поля имеют форму аperiодических «холмов» с разновысокими вершинами и гладкими боковыми скатами, определяемыми диаграммой направленности антенны излучателя. Глубина интерференционных максимумов и минимумов зависит от подстилающей поверхности;

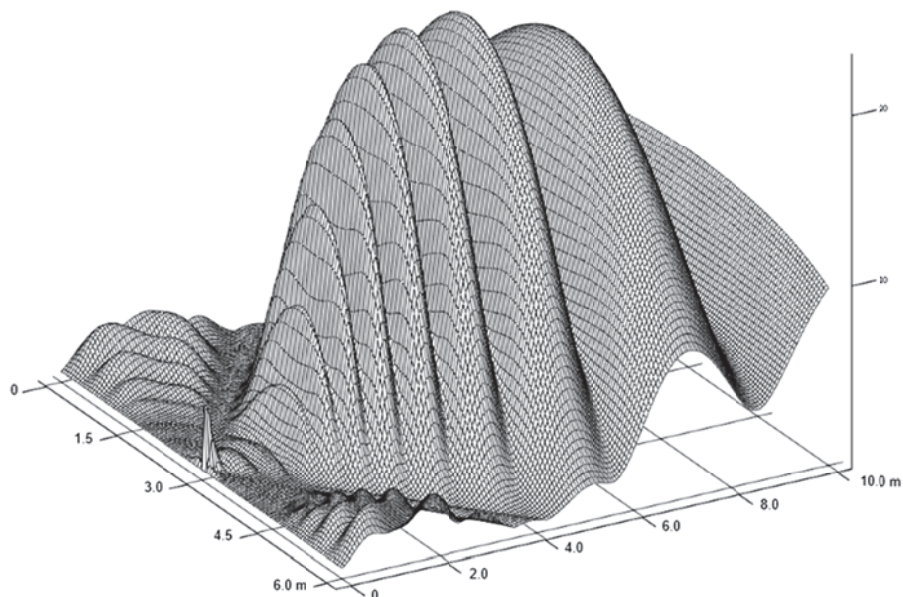


Рис. 4. Пространственная картина распределения уровня ЭМП зондирующего сигнала на объекте при $h_1 = h_2 = 1,2$ м; $f = 2,4$ ГГц, $dx = 0,05$ м

- количество аperiodических максимумов напряженности поля, вызванных явлением двухлучевого распространения увеличивается, если объект расположен выше уровня излучателя, т.е. $h_2 > h_1$ и уменьшается до одного при $h_2 = 0$;
- уровень напряженности поля на объекте меняется при перемещении излучателя в его направлении;
- малые значения напряженности поля вблизи излучателя обусловлены значениями ХДН антенны в вертикальной плоскости и коэффициентом отражения $|R_{a2}|$.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМП
ОТ ОБНАРУЖИВАЕМОГО ОБЪЕКТА
В НАПРАВЛЕНИИ НА РЕГИСТРАТОР
НА ЧАСТОТЕ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ
 $2\omega_1$ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Второй этап работы посвящен исследованию пространственного распределения ЭМП на

второй гармонике $2\omega_1$ в направлении от объекта к оператору (в обратную сторону).

Нелинейный элемент при облучении мощным ЭМП с частотой ω_1 переизлучает на частотах гармоник ω_2, ω_3 и т.д. Его можно представить в виде эквивалентного передатчика с мощностью, нелинейно-пропорциональной уровню ЭМП на объекте.

Эквивалентный передатчик гармоник расположен в плоскости $AOBC$, на высоте h_2 , в точке i, j . Структура его излучения может быть аппроксимирована антенной «симметричный диполь». Типовая диаграмма направленности антенны эквивалентного передатчика (переизлучающего объекта) в вертикальной и горизонтальной плоскостях показана на рис. 5.

Расчеты пространственного распределения ЭМП от эквивалентного передатчика выполнены аналогичным методом, для высот размещения объекта от $h_2 = 0$ до $2,4$ м, однако на рис. 6 представлено распределение уровня ЭМП при высоте излучателя $h_2 = 1.2$ м;

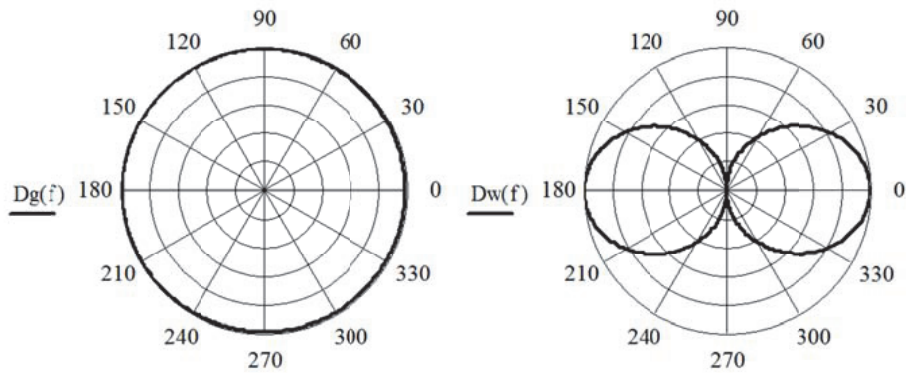


Рис. 5. Диаграмма направленности антенны эквивалентного передатчика (переизлучающего объекта) в вертикальной и горизонтальной плоскостях

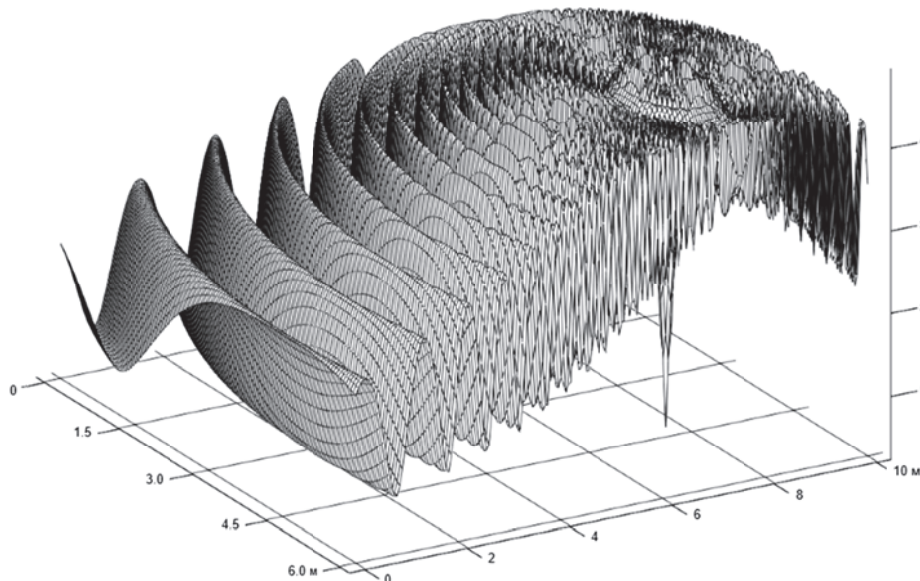


Рис. 6. График пространственного распределения ЭМП при высоте излучателя и объекта на высоте $h_1 = h_2 = 1.2$ м; на второй гармонике излучения $f = 4.8$ ГГц

Анализ графиков пространственного распределения ЭМП при различных высотах размещения объекта h_2 показывает, что:

- пространственное распределение уровня электромагнитного поля, распространяющегося на высших гармониках в обратном направлении, носит характер радиально расходящихся аperiодических максимумов и минимумов относительно точки размещения объекта;
- количество аperiодических максимумов и минимумов увеличивается, если объект расположен выше уровня излучателя, т.е. $h_2 > h_1$ и уменьшается до одного при $h_2 = 0$;
- глубина интерференционных максимумов и минимумов зависит от подстилающей поверхности;
- при перемещении регистратора в сторону объекта уровень напряженности поля на его входе изменяется случайным образом.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ НА ЧАСТОТЕ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ВБЛИЗИ РЕГИСТРАТОРА ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОБЪЕКТА

График пространственного распределения ЭМП от объекта в направлении к оператору (рис. 6) выполнен в предположении, что мощность эквивалентного (переизлучающего) передатчика постоянна. Реально это условие не выполняется.

При перемещении оператора в сторону объекта картина уровня ЭМП зондирующего сигнала (рис. 4) как бы «наезжает» на объект. В результате объект оказывается в точке, где случайным образом изменяется уровень зондирующего сигнала. Интенсивность его излучения (рис. 6) становится случайной величиной, пропорцио-

нальной уровню зондирующего сигнала. Получается, что поле зондирующего сигнала на ω_1 как бы модулирует поле, распространяющимся от объекта к приемнику на частоте ω_2 . Эти зависимости носят нелинейно-попроциональный характер и структуру результирующего поля на частоте ω_2 , можно представить только для каждой конкретной точки размещения оператора.

Для обоснования причин сложности в пеленгации нелинейного объекта наибольший интерес представляет структура поля вблизи оператора: увеличение уровня сигнала свидетельствует о перемещении оператора в правильном направлении; уменьшение уровня – в ошибочном. Но на практике это получается далеко не всегда. Для исследования причин ошибочной пеленгации рассмотрим структуру ЭМП от объекта к регистратору для трех ситуаций:

- в исходном положении оператора;
- при перемещении его на 1 метр;
- при перемещении оператора на 2 метра.

Для этих ситуаций положения оператора провели три расчета результирующих пространственных картин ЭМП (по уровню зондирующего сигнала на объекте рассчитывалась картина интенсивности его переизлучения). На них выделили сегменты площадью 1 м^2 вблизи точки размещения оператора, затем совместили их на одном графике. На рис. 7 показаны сегменты структуры поля вблизи оператора в исходном положении, при перемещении на 1 и 2 м. Расчет проведены при высотах излучателя и объекта $h_1 = h_2 = 1.2\text{ м}$ и частоте сигнала 4,8 ГГц.

Анализ этого графика показывает, что уровень принимаемого сигнала при движении оператора в сторону объекта может изменяться и в большую, и в меньшую сторону. Вблизи от объекта он может оказаться ниже, чем при удалении

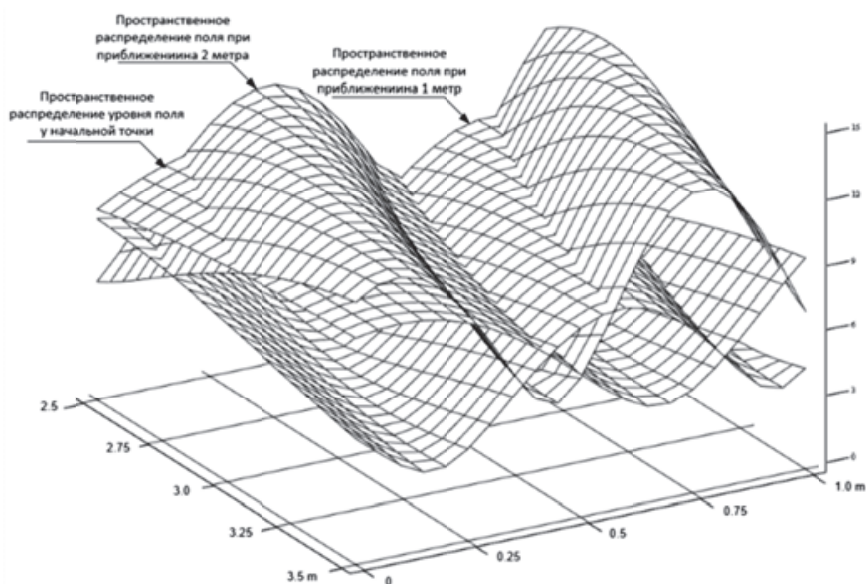


Рис. 7. Напряженность поля на площадках $1.0 \times 1.0\text{ м}$, высотах излучателя и объекта $h_1 = h_2 = 1.2\text{ м}$, частоте отраженного сигнала 4,8 ГГц, которую «видит» приемник регистратора в исходном положении, при перемещении на 1 и 2 м

от него. Возрастание уровня можно зафиксировать при движении в сторону от объекта. Определение направления на объект в этих условиях становится трудновыполнимой задачей. Вместе с тем, анализ выявленных закономерностей результирующего поля позволяет сформулировать некоторые алгоритмы ее решения.

В заключение работы можно отметить, что она:

- делает попытку теоретически обосновать причины, по которым нелинейный радио-локатор «плохо видит» обнаруживаемый объект и принимает сигнал с произвольных направлений;
- позволяют разработать научно-обоснованную методику применения приборов нелинейной радиолокации и наметить ряд мер по повышению качества обнаружения нелинейных элементов;

- обосновывает ряд предложений по совершенствованию аппаратуры нелинейной радиолокации и отработке методов пеленгации НЭ;

- может найти применение в области авиационной безопасности, производственных процессах других областях техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нарышкин Е.М., Серков В.П.* Волновая служба и антенные устройства. Часть 1. Теория электромагнитного поля и распространения радиоволн. М.: Воениздат, 1982. 288 с.
2. *Попов Н.А., Чоракаев О.Э., Трушников В.Е.* Разработка модели распределения электромагнитного поля при экологическом контроле. Горный информационно-аналитический бюллетень. №7. М.: ООО «Горная книга», 2016. С. 93-100.

REASEACH OF FIELD STRUCTURE IN NONLINEAR RADAR

© 2017 N.A. Popov, O.E. Chorakaev

Institute of Aviation Technologies and Management
of Ulyanovsk State Technical University

The article is devoted to the study of the structure of the spatial distribution of the electromagnetic field (EMF) level for nonlinear radar (NRL) and the justification of the reasons why the NRL does not indicate radiating nonlinear objects.

Keywords: radiolocation, electromagnetic field, radiation, calculation of field strength.

Nikolay Popov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Building Department.

E-mail: Popow-kaf11@yandex.ru

Oleg Chorakaev, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Construction Building.

E-mail: olegchorakaev@yandex.ru