УДК 629.73.054:621.396(075.8)

В.Н. Пичугин

Измерение и исследование характеристик радиолокационной системы со щелевыми антеннами в многоволновом режиме

С целью построения моделей протяженных поверхностей в длинно- и коротковолновой частях волнового спектра весьма актуальным является знание параметров электромагнитной совместимости бортовых антенных систем со щелевыми излучателями, работающих в многоволновом режиме приема. Рассмотрено решение задачи распространения электромагнитных волн на бесконечно протяженном щелевом излучателе. Цель – измерение и исследование параметров электромагнитной совместимости бортовых антенных систем со щелевыми излучателями, работающих в многоволновом режиме приема. В результате исследований получено аналитическое и программное описание методов измерения характеристик бортовой антенной системы на гармониках основной частоты и частотах, превышающих основную, с учетом ширины щелей. Практическая значимость – результаты исследований использованы при разработке универсальной методики, используемой при проектировании и разработке радиолокационных антенных систем, способных адекватно работать в условиях рассматриваемой электромагнитной обстановки. Результаты работы позволят более полно описать электродинамическую картину распространения волны, что позволит развить направление по их более широкому производству и распространению.

Ключевые слова: радиолокационные системы со щелевыми антеннами, измерение и контроль характеристик, модовый состав, возбудители волн, нерабочие частоты.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-13-18

При радиолокационном исследовании земной поверхности существенное значение имеет количественное описание явлений, обусловленных неоднородностью ее структуры, и учет влияния свойств подстилающей поверхности на характеристики принимаемых сигналов [1]. Анализ характеристики рассеивания электромагнитных волн идеально проводимым ленточным экраном, расположенным на плоской границе проводящего диэлектрического полупространства, позволяет исследовать задачи, связанные с резким изменением электрофизических свойств земной поверхности и наличием расположенных на ней хорошо отражающих объектов [2].

Известны решения, которые для идеально проводящих диска и полосы позволяют получить разные оценки характеристик рассеивания волн [3]. Однако эти решения неприменимы при радиометрическом исследовании, т.к. параметры теплового излучения среды определяются активными потерями электромагнитных волн в среде, т.е. возможность радиометрического наблюдения объектов обусловлена различием их поглотительной способности. В ряде работ рассмотрена задача дифракции на бесконечно протяженной ленте в свободном пространстве. В [4] задача сведена к системе парных интегральных уравнений относительно спектральных функций для плотностей поверхностных токов, решаемых методом моментов. Подобные задачи как для импеданской ленты, так и для щели в импеданском экране могут быть решены также методом собственных функций [5].

Радиолокационная система с антеннами волново-щелевого типа (рис. 1) является многомодовой, поэтому в процессе излучения и приема необходимы сведения как в рабочей полосе частот, так и далеко за ее пределами, об интегральных характери-

стиках излучающих систем – коэффициенте усиления (КУ) и диаграмме направленности (ДН) при подобных режимах работы [6]. В нелинейных элементах на высоких частотах начинают распространяться несколько типов электромагнитных волн. Это требует учета особенностей характеристик электромагнитных волн при решении различных задач нелинейной радиолокации (НРЛ) [7]. К числу таких устройств относятся радиолокационные системы с антеннами из нелинейных щелевых излучателей. В нелинейной системе, состоящей из продольных щелевых излучателей, возникают особые изменения в характеристиках, которые можно использовать [8].

Рис. 1. Щелевые излучатели в антенне радиолокационной системы

Теоретическому расчету и конструктивному исследованию таких систем посвящен ряд работ, в которых предполагается использовать нестандартные аналитические методы электродинамического анализа, а именно решение интегральных и дифференциальных уравнений высокого порядка при помощи смены системы координат, решения граничной зада-

чи методом разделения переменной на основе разложения плоской электромагнитной волны в ряды по функции Маттье, функций Бесселя и Ханкеля [10].

Наиболее современные разработки представлены авторами И.Я. Иммореевым, А.Г. Лошиловым, в патентах и исследованиях Э.В. Семенова и В.П. Лихачева. Использование способности некоторых объектов не только рассеивать падающие на них радиоволны, но и преобразовывать их спектр позволяет рассматривать широкий круг задач, решение которых традиционными методами, в том числе с использованием современного программного обеспечения, невозможно либо малопродуктивно.

Измерение характеристик радиолокационной системы со щелевыми антеннами

Схема измерения уровней восприимчивости радиолокационной системы (номинальной мощности сигнала, при которой напряжение (мощность) сигнала на выходе приемника превышает напряжение (мощность) помех в заданное число раз) по побочным каналам представлена на рис. 2. На рисунке следующие обозначения: Г – генератор; НО – направленный ответвитель; СН – согласованная нагрузка; W_1 – измеритель мощности; В – возбудитель типа волн; ВА – исследуемая антенна; W_2 – измеритель мощности.

В качестве измерителя многомодовой мощности можно использовать многоволновые болометрические измерители мощности оконечного типа или проходные измерители мощности на базе многомодовых ответвителей, нагруженных на многоволновую согласованную нагрузку [2].

Рис. 2. Структурная схема установки для измерений коэффициентов передачи и уровней восприимчивости

В качестве возбудителей типов волн обычно используют два вида устройств. К первому следует отнести классические возбудители, представляющие собой волноводные переходы с плавно меняющейся геометрией поперечного сечения часто довольно сложной формы или волноводно-коаксиально-волноводные переходы. Первые, как правило, используются для возбуждения волн типа H (примером могут служить плавные переходы возбудителей волн H_{10} или H_{01}), вторые – для возбуждения волн типа E . На неосновных частотах для большинства антенных систем характерно большое значение коэффициента отражения со стороны волноводного входа. В многоволновом режиме это отражение сопровождается, как правило, преобразованием волн из одного типа в другой. В результате волна, отраженная от исследуемого устройства в сторону воз-

будителя, будет содержать типы волн, отличные от заданного. Эти типы волн будут, в свою очередь, полностью отражаться от возбудителя.

Таким образом, в установившемся режиме из-за переотражений со стороны исследуемой системы и возбудителя в сторону исследуемой антенны будет распространяться волна, модовый состав которой значительно отличается от предполагаемого. При соответствующих фазовых соотношениях различных типов волн в объеме, заключенном между выходом возбудителя и неоднородностями исследуемого устройства, возможен продольный резонанс на одном из паразитных (для данного возбудителя) типов волн. При возникновении такого резонанса мощность, переносимая электромагнитной волной в сторону исследуемого устройства, будет существенно отличаться от мощности, регистрируемой измерителями.

Неопределенность модового состава и мощности сигнала, поступающего на вход исследуемого устройства, приведет к неопределенности результата. Влияние указанных эффектов на результаты измерений характеристик можно наблюдать, изменяя длину участка регулярного волновода между выходом возбудителя и входом исследуемого устройства, изменяя тем самым фазовые соотношения между волнами различных типов. Порядок измерений характеристик в многоволновом режиме в рабочих диапазонах частот возбудителей и ответвителей типов волн точно такой же, как и при измерении этих характеристик в одноволновом режиме.

В этом случае коэффициент преобразования

$$p = W_2 / W_1, \quad (1)$$

где W_1 , W_2 – мощности сигналов на входе и выходе возбудителей.

При отсутствии измерителей многоволновой мощности калибровку коэффициента преобразования можно осуществить методом встречного соединения двух идентичных возбудителей

$$p_1 = p_2 = \sqrt{W_1 / W_2} = \sqrt{l_{12}}, \quad (2)$$

где p_1, p_2 – коэффициенты преобразования возбудителей; $l_{12} = W_2 / W_1$ – коэффициент передачи встречно соединенных возбудителей; W_1 , W_2 – мощности сигналов, определяемые с помощью измерителей W_1 и W_2 соответственно.

Если технологические разбросы сильно влияют на коэффициенты преобразования идентично изготовленных возбудителей, то калибровку необходимо проводить при последовательном встречном включении трех экземпляров возбудителей:

$$p_1 = \sqrt{l_{12} l_{13} / l_{23}}, p_2 = \sqrt{l_{12} l_{23} / l_{13}}, p_3 = \sqrt{l_{13} l_{23} / l_{12}}, \quad (3)$$

где p_1, p_2, p_3 – коэффициенты преобразования соответствующих экземпляров возбудителей; l_{ik} – коэффициент передачи встречного соединения возбудителей с номерами i и k .

Коэффициент развязки возбуждителей, предназначенных для возбуждения различных типов волн, можно определить при встречном соединении

$$R_{ij} = l_{ij} / \sqrt{p_i p_j}, \quad (4)$$

где R_{ij} – коэффициент развязки возбуждителей с номерами i, j ; l_{ij} – коэффициент передачи встречного соединения двух возбуждителей; p_i, p_j – коэффициенты преобразования соответствующих возбуждителей.

Требования к численным значениям коэффициентов развязки можно определить, если рассматривать их как меру корреляции результатов измерений парциальных характеристик. Нормированную корреляционную функцию двух характеристик можно определить, используя совместные плотности вероятностей характеристик, так как вероятностное описание наиболее подходит для описания электродинамической картины в многомодовом режиме:

$$R_0 = 1/(N-1), \quad (5)$$

где R_0 – модуль нормированной корреляционной функции двух характеристик, измеренных идеальными возбуждителями ($R_{ij} = 0$), N – число типов волн, которые могут распространяться во входном волноводе радиолокационной системы.

Исходя из этого, вполне естественно определить следующие требования к коэффициентам развязки возбуждителей:

$$R_{ij} \leq R_0 = 1/(N-1). \quad (6)$$

Диапазон частот, в котором измеряются коэффициенты передачи элементов фидерных трактов и уровни восприимчивости, определяется различными документами. Максимальная погрешность в децибелах за счет неидеальности согласованной нагрузки

$$\Delta_{\gamma_l} = 5 \lg[(l_{12})_{\max} / (l_{12})_{\min}], \quad (7)$$

где $(l_{12})_{\max}, (l_{12})_{\min}$ – максимальное и минимальное значения коэффициента передачи встречного соединения ответвителей, зарегистрированные при изменении длины раздвижного волновода.

После калибровки элементов измерительной установки можно приступить к измерению характеристик. На основании полученных данных при измерениях можно оценить среднее значение коэффициентов передачи или величин, обратных уровням восприимчивости радиолокационной системы, на множестве возможных модовых составов входных сигналов [9]. При этом требуется определить объем необходимых измерений характеристик, для чего следует руководствоваться каким-то критерием. Таким критерием может быть интервал погрешности оценки математических ожиданий за счет ограниченного числа измерений парциальных характеристик ($\Delta_{\text{оц}}$), который должен быть не больше интервала инструментальной погрешности ($\Delta_{\text{ин}}$)

при одинаковых значениях доверительной вероятности, т.е.

$$\Delta_{\text{оц}}(P) \leq \Delta_{\text{ин}}(P). \quad (8)$$

Требуется определить число измерений уровней восприимчивости радиолокационной системы, необходимых для оценки математического ожидания величины, обратной уровню восприимчивости, с погрешностью, удовлетворяющей условию (8) при $P=0,9$, на частоте, на которой во входном волноводе системы возможно распространение 20 типов волн [10].

Контроль требований к характеристикам радиолокационных систем с антеннами щелевого типа

Важным элементом комплекса технических мероприятий является контроль выполнения требований различных нормативных документов на параметры системы, в частности, на допустимые уровни восприимчивости по побочным каналам приема, блокированию и перекрестным искажениям [11]. Измерения парциальных характеристик производится по схеме, представленной на рис. 2. Решение о выполнении требований к уровню восприимчивости принимается при условии

$$\Delta P(1/V) \leq 1/V_{\text{нор}}, \quad (9)$$

где $V_{\text{нор}}$ – численное значение требований к уровню восприимчивости; ΔP – поправочный коэффициент.

Такое представление использовано для нормировки. На графиках (рис. 3, 4) сплошные линии – зависимость коэффициентов передачи от изменений длины регулярного участка волновода на рабочих частотах, пунктирные линии – по побочным каналам приема.

Рис. 3. Зависимость парциальных коэффициентов передачи волноводно-коаксиального перехода от изменений длины регулярного участка волновода, измеренных с помощью возбуждителей

Для практической оценки достоверности контроля используются такие параметры оперативной

характеристики, как браковочное и приемочное значения показателей качества [12–15]. Браковочным называют такое значение показателя качества q_2 контролируемого изделия, при котором вероятность приемки изделия достаточно мала (меньше заданного значения риска потребителя β).

Рис. 4. Зависимость уровней восприимчивости по побочным каналам приема от изменений длины регулярного участка волновода, измеренных с помощью возбуждителей

Приемочным называют такое значение показателя качества q_1 , при котором вероятность браковки изделия достаточно мала (меньше заданного значения риска изготовителя α). Для наиболее широко применяемых на практике значений рисков $\alpha = \beta = 0,05$ получим: $q_1 = -4,1$; $q_2 = 4,1$, т.е. при средней квадратической инструментальной погрешности измерения уровня восприимчивости, равной 2,5 дБ, уверенная браковка будет производиться в том случае, если уровень восприимчивости хуже требований на 4,1 дБ, а уверенная приемка его — если уровень восприимчивости лучше требований на 4,1 дБ.

Расчеты параметров плана контроля для различных значений N и $P = 0,95$, $\alpha = \beta = 0,05$, $||q_1| \approx |q_2| \leq 3,5$ приведены в таблице.

Расчет параметров плана контроля

N	2	3	4...7	≥ 8	2
m	2	2	3	4	2
$\Delta_{кр}$, дБ	0	2,5	2,5	2,5	0

Задавая вероятностью P , получаем

$$\frac{1}{V_p} = M \left[\frac{1}{V(A)} \right] N \left[1 - (1-P)^{1/(N-1)} \right] = M \left[1/V(A) \right] \Delta P, \quad (10)$$

где

$$\Delta P = N \left[1 - (1-P)^{1/(N-1)} \right]. \quad (11)$$

На рис. 5 значения поправочного коэффициента ΔP мало меняются при изменении числа типов волн, которые могут распространяться в антенне радиолокационной системы, поэтому для всех случаев можно использовать предельные значения поправочного множителя (при $N \rightarrow \infty$), равные 0,11; 0,052 и 0,020 соответственно для вероятности 0,9; 0,95 и 0,98.

Рис. 5. Зависимость поправочного коэффициента от числа типов волн в антенне радиолокационной системы

При выводе данных соотношений, кроме предположений о линейности характеристик радиолокационных систем, использовалось, по существу, ещё одно предположение об отсутствии модовой структуры тока на элементах. В диапазонах УВЧ и СВЧ это предположение выполняется достаточно строго, поэтому полученные соотношения справедливы для широкого класса радиолокационных систем.

Заключение

Основной результат исследования можно сформулировать как разработку аналитических и экспериментальных методов измерения характеристик радиолокационных систем с антеннами из нелинейных щелевых излучателей в многоволновом режиме приема с учётом неоднородности электромагнитных полей в данных условиях. В рамках главного направления исследования решены следующие задачи:

1. Разработана математическая модель измерения характеристик радиолокационной системы с антеннами щелевого типа в многоволновом режиме. Математическая модель определена соотношениями (1)–(8) и позволяет вычислить уровень восприимчивости к испытательным сигналам при возбуждении антенны радиолокационной системы разными типами электромагнитной волны. Реальные входные цепи радиолокационной системы (особенно при измерениях по фидеру) содержат различные неоднородности в виде согласующих трансформаторов, фильтров СВЧ, изогнутых секций волноводов, переключателей и т.д. Наличие неоднородностей в многоволновом режиме приводит к трансформации типов волн.

В итоге волновой состав сигнала в различных сечениях тракта существенно отличается от его состава на входе тракта. Это затрудняет априорное определение состава испытательного сигнала на входе радиолокационной системы, при котором реализуется наименьший уровень восприимчивости.

2. Получены результаты измерения и исследования характеристик уровня восприимчивости радиолокационной системы со щелевыми антеннами в многоволновом режиме. Измерение уровня восприимчивости радиолокационной системы при любом фиксированном модовом составе входного испытательного сигнала удобно рассматривать как реализацию из ансамбля возможных значений. Класс входных цепей радиолокационных систем достаточно

широк. В этом случае для описания свойств множества значений уровней восприимчивости радиолокационной системы в многоволновом режиме его входных цепей целесообразно использовать статистический подход.

В работе определены два параметра, которые адекватно характеризуют свойства уровня восприимчивости. В итоге распределение тока в радиолокационной системе не зависит от модового состава испытательного сигнала (при измерениях) или сигнала помехи (в процессе эксплуатации) на входе. Изменение модового состава входного сигнала может сказаться только на изменении амплитуды и фазы тока в антенне радиолокационной системы. В этом случае при блокировании, перекрестных искажениях и прохождении сигнала по побочным каналам приема амплитуда тока однозначно определяет эффект воздействия испытательного сигнала (или сигнала помехи) на оконечное устройство радиолокационной системы вне зависимости от места возникновения нелинейного преобразования. В качестве меры эффекта можно использовать заданные значения коэффициентов блокирования, перекрестных искажений или уровень мешающего сигнала на выходе системы.

В исследовании обобщаются результаты, полученные автором. Они необходимы для анализа характеристик восприимчивости антенн радиолокационных систем. Предполагается использовать их для принятия решения о достаточности обеспечения электромагнитной совместимости. Анализ полученных данных позволяет принять заключение об отсутствии недопустимого воздействия сигнала помехи.

Приведенные результаты исследований могут быть использованы при конструировании и разработке подобных радиолокационных систем с антеннами щелевого типа, способных адекватно работать в условиях рассматриваемой электромагнитной обстановки. Результаты исследования могут быть основой разработки средств электромагнитной совместимости радиолокационных объектов.

Литература

1. Пичугин В.Н. Строгое решение дифракции электромагнитной волны на щелевом излучателе антенной решетки // XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых): Междунар. молодёжная научная конф.: матер. конф.: в 4 т. – Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2017. – С. 353–358.
2. Пичугин В.Н. Строгое решение дифракции электромагнитной волны на щелевом излучателе антенной решетки / В.Н. Пичугин, И.Г. Бугрова // Образование. Наука. Научные кадры. – М.: Юнити-Дана, 2013. – С. 134–144.
3. Пичугин В.Н. Разработка программного инструмента для готовности инфраструктуры энергетической службы к внедрению программного инструмента «Служба РЗА» / В.Н. Пичугин, М.А. Веряскина // Сб. науч. тр.: к 20-летию каф. радиотехники и радиотехнических систем. – Чебоксары: Чувашский гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 2014. – С. 97–103.

4. Иммоореев И.Я. Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности // Радиотехника и электроника. – М.: Наука, 2009. – С. 5–31.

5. Лощилов А.Г. Разработка устройств обработки сверхширокополосных импульсных сигналов для исследования нелинейных свойств объектов методом нелинейной рефлектометрии / А.Г. Лощилов, Э.В. Семенов, Н.Д. Малиутин, А.О. Мисюнас, А.А. Ильин // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2 (22), ч. 1. – С. 166–170.

6. Semyonov E. Measurements of the Nonlinearity of the Ultra Wideband Signals Transformation / E. Semyonov, A. Loschilov // Ultra Wideband Communications: Novel Trends – System, Architecture and Implementation. – Rijeka, Croatia: InTech, 2011. – P. 3–16.

7. Lohner A. Application and characteristic of high resolution estimation techniques for range compression in SAR systems // EUSAR 2000: 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar, Munich. – Berlin: Offenbach, 2000. – P. 40.

8. Vignaud L. Target features extraction in SAR/ISAR images: high resolution bright points extraction and wide angle tracking techniques // EUSAR 2000: 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar, Munich. – Berlin: Offenbach, 2000. – P. 595–598.

9. Berizzi F. ISAR imaging of targets at low elevation angles // IEEE Trans. Aerosp. and Electron. – Syst., 2001. – Vol. 37(2), No. 2. – P. 419–435.

10. Koch W. Ground target tracking with STAR radar. / W. Koch, R. Klemm // IEE Proc. Radar, Sonar and Navig. (Quebec, Canada). – 2001. – Vol. 148, No. 3. – P. 173–185.

11. Davis Richard M. A maximum-likelihood beamspace processor for improved search and track / M. Davis Richard, L. Fante Ronald // IEEE Trans. Antennas and Propag. – Institute of Electrical and Electronics Engineers. – United States, 2001. – Vol. 49, No. 7. – P. 1043–1053.

12. Paine A.S. Optimal adaptive processing for domain factorised element-digitised array radar // IEEE Proc. Radar, Sonar and Navig. (Quebec, Canada). – 2001. – Vol. 148, no. 2. – P. 81–88.

13. Карпов А.В. Структура электромагнитного поля при нелинейной радиолокации / А.В. Карпов, О.М. Лепешкин, Н.А. Попов // Сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции (Воронеж): в 3 т. – 2017. – С. 1118.

14. Попов Н.А. Исследование структуры поля при нелинейной радиолокации / Н.А. Попов, О.Э. Чорокаев // Изв. Самар. Науч. центра Российской академии наук (Самара). – 2017. – Т. 19, № 4-2. – С. 262–267.

15. Бабанов Н.Ю. О применении ЛЧМ-зондирующих сигналов в нелинейной радиолокации / Н.Ю. Бабанов, В.В. Дмитриев, И.Н. Замятина // Изв. Нижегород. гос. инженерно-эконом. ин-та (Нижний Новгород). – 2018. – № 3. – С. 18–27.

Пичугин Владимир Николаевич

Канд. техн. наук, доцент каф. высшей математики и информационных технологий
Чувашского гос. ун-та им. И.Н. Ульянова (ЧувГУ)
Московский пр-т, д. 15, г. Чебоксары, Россия, 428015
Тел.: +7-927-848-75-94
Эл. почта: vladimir_iii@mail.ru

Pichugin V.N.

Measurement and study of the characteristics of the slit-type radar system in multi-wave mode

In order to construct models of extended surfaces in the long- and short-wave parts of the wave spectrum, it is very important to know the parameters of electromagnetic compatibility of on-Board antenna systems of slit emitters operating in the multi-wave reception mode. One of the effective methods of investigation is solving the problem of electromagnetic waves propagation on an infinitely extended left radiator. The aim is to measure and study the parameters of electromagnetic compatibility of on-Board antenna systems of slit emitters operating in multiwavelength reception mode. The main result of the research consists in analytical and software methods for measuring the characteristics of the onboard radar system on the harmonics of the fundamental frequency and frequencies exceeding the basic one, taking into account the width of the cracks. Practical use: the research results were used in the development of a universal technique used in the design and development of radar systems that can adequately work in the conditions of the electromagnetic environment. The results of the work will allow a more complete description of the electrodynamic pattern of wave propagation, and furthermore ensure their wider production and distribution.

Keywords: radar slit systems, measurement and control characteristics, modal composition, waves causative agents, non-operating frequency.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-13-18

References

1. Pichugin V.N. [Rigorous solution of electromagnetic wave diffraction on the slot radiator antenna array]. *XXIII Tupolev readings (school of young scientists) international youth scientific conference: Proceedings of the conference. A collection of papers: in 4 vol.*, 2017, pp. 353–358 (in Russ.).
2. Pichugin V.N., Bugrova I.G. [Strict solution of electromagnetic wave diffraction on a slit radiator of an antenna array]. *Education. Science. Scientific personnel*. Moscow: Unity-Dana, 2013, pp. 134–144. (in Russ.).
3. Pichugin V.N. [Development of a software tool for infrastructure and energy services to implement the software tool «Service relay»]. *Collection of scientific papers: the 20th anniversary of the Department of radio engineering and radio systems*, 2014, pp. 97–103 (in Russ.).
4. Immoreev I.Y. [Ultra-Wideband radars. Features and capabilitiesradio]. *Engineering and electronics*, 2009, vol. 54, pp. 5–31 (in Russ.).
5. Loshilov A.G., Semenov V.E., Malyutin N.D. Misyunas A.O., Ilyin A.A. [Development of devices of processing of UWB pulse signals to study the nonlinear properties of objects by the method of nonlinear reflectometer-RII]. *Proceedings of TUSUR University*, 2010, no. 2 (22), part 1, pp. 166–170 (in Russ.).

6. Semyonov E. Loschilov A. Measurements of the Non-linearity of the Ultra Wideband Signals Transformation *Ultra Wideband Communications: Novel Trends – System, Architecture and Implementation*. Rijeka, Croatia: InTech, 2011, pp. 3–16 (in Russ.).

7. Lohner A. Application and characteristic of high resolution estimation techniques for range compression in SAR systems. *EUSAR 2000: 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar, Munich. Berlin: Offenbach*, 2000, pp. 40.

8. Vignaud L. Target features extraction in SAR/ISAR images: high resolution bright points extraction and wide angle tracking techniques. *EUSAR 2000: 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar. Munich. Berlin: Offenbach*, 2000, pp. 595–598.

9. Berizzi F. ISAR imaging of targets at low elevation angles. *IEEE Trans. Aerosp. and Electron. Syst.*, 2001, vol. 37(2), no. 2, pp. 419–435.

10. Koch W., Klemm R. Ground target tracking with STAR radar. *IEE Proc. Radar, Sonar and Navig.* Quebec, Canada, 2001, vol. 148, no. 3, pp. 173–185.

11. Davis Richard M., Fante Ronald L. A maximum-likelihood beamspace processor for improved search and track. *IEEE Trans. Antennas and Propag.* United States, 2001, vol. 49, no. 7, pp. 1043–1053.

12. Paine A.S. Optimal adaptive processing for domain factorised element-digitised array radar. *IEEE Proc. Radar, Sonar and Navig.* Quebec, Canada, 2001, vol. 148, no. 2, pp. 81–88.

13. Karpov A.V., Lepeshkin O.M., Popov N.A. Electromagnetic field structure at nonlinear radiolocation. *Proceedings of the XXIII International scientific and technical conference*. In 3 vol., 2017, pp. 1118 (in Russ.).

14. Popov N.A. Cherkaev O.E. Study of the field structure with nonlinear radar. *Proceedings of the Samara scientific center, Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 19, no. 4-2, pp. 262–267 (in Russ.).

15. Babanov N.Y., Dmitriev V.V., Zamyatina I.N. On the use of LSM-sounding signals in nonlinear radar. *Proceedings of the Nizhny Novgorod state engineering and economic Institute*, 2018, no. 3, pp. 18–27 (in Russ.).

Vladimir N. Pichugin

Candidate of Engineering Sciences, Professor,
Department of Higher Mathematics
and Information Technology,
Chuvash State University named after I.N. Ulyanov
15, Moskovsky pr., Cheboksary, Russia, 428015
Phone: +7-927-848-75-94
Email: vladimir_iii@mail.ru