

УДК 621.396.96

Г.С. Залевский, М.М. Бречка, В.А. Василец, О.И. Сухаревский

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРОВ ВИНТОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ВЕРТОЛЕТОВ

Рассматривается комбинированный электродинамический метод расчета характеристик рассеяния радиолокационных объектов сложной формы, содержащих элементы конструкции различных электрических размеров. Разработанный алгоритм основан на совместном применении высокочастотного метода для расчета характеристик рассеяния электрически больших элементов конструкции и метода интегральных уравнений для частей, соизмеримых с длиной волны, в том числе, электрически тонких. Демонстрируется применение предложенного комбинированного метода для расчета спектров винтовой модуляции вертолета в метровом диапазоне длин волн.

Ключевые слова: винтовая модуляция, вторичное излучение, высокочастотный метод расчета, интегральное уравнение.

Введение

Амплитудная модуляция сигналов, отраженных радиолокационными объектами (РЛО) с подвижными элементами конструкции (винты, лопасти турбин летательных аппаратов, колеса автомобильной и бронетанковой техники), несет в себе полезную информацию об объекте локации [1 – 10]. В частности параметры спектров амплитудной модуляции могут использоваться в качестве признаков распознавания. По указанным спектрам можно определить характер движения РЛО (обнаружить маневр). Кроме того параметры амплитудной модуляции спектров отраженных сигналов могут также применяться для анализа технического состояния авиационных двигателей. Механизмы возникновения рассматриваемой модуляции отраженных сигналов подробно описаны в работах [1, 2, 4, 10]. Применительно к воздушным РЛО модуляцию, обусловленную подвижными элементами конструкции, называют винтовой (пропеллерной, роторной) модуляцией.

Для изучения параметров винтовой модуляции используются результаты натурных измерений [2, 3, 10] и методы математического моделирования [1, 6-9]. Численные методы при минимальных материальных затратах позволяют моделировать всевозможные ситуации при локации воздушных РЛО, однако по по-

нятным причинам к достоверности получаемых результатов предъявляются жесткие требования, в частности касающиеся корректного учета сложной формы РЛО. В работах [1, 9] предложены высокочастотные методы, позволяющие рассчитывать характеристики рассеяния электрически больших РЛО сложной формы и учитывать модуляционные эффекты, обусловленные вращающимися элементами их конструкции. Метод, предложенный в статье [8], основан на решении интегральных уравнений (ИУ) и позволяет проводить расчет РЛО, в том числе и резонансных размеров. Однако вычисления с помощью предложенного в [8] алгоритма требуют использования больших объемов компьютерной памяти и значительного времени вычислений. В настоящей статье предложен электродинамический комбинированный метод расчета характеристик рассеяния РЛО сложной формы, конструкция которого может содержать как электрически большие элементы, так и резонансные (соизмеримые с длиной зондирующей волны). В частности к таким РЛО могут быть отнесены вертолеты при локации в метровом диапазоне длин волн (в этом случае фюзеляж вертолета рассматривается, как электрически большой объект, а его винты, как электрически тонкие объекты резонансной длины). Метод сочетает в себе вычислительные достоинства асимптотического высокочастотного метода [1, 9, 11-13] и метода ИУ [13, 14].

Целью работы является моделирование и анализ спектров винтовой модуляции сигналов, отраженных вертолетом, с помощью разработанного комбинированного метода.

1. Описание метода расчета

Предлагаемый комбинированный метод предназначен для расчета характеристик рассеяния РЛО сложной формы в случае, если объект можно представить в виде совокупности электрически больших рассеивателей и элементов резонансных размеров. В качестве такого объекта может быть рассмотрен вертолет при локации в верхней части метрового диапазона длин волн (длина волны $\lambda_0=1\dots 3$ м). Фюзеляж вертолета по размерам может быть отнесен к высокочастотной области, а лопасти его винтов представляют собой электрически тонкие рассеиватели резонансной длины. В этом случае согласно предлагаемого метода для вычисления электромагнитного поля (ЭМП), рассеянного электрически большим фюзеляжем, применяется разработанный авторами ранее [1, 9, 11-13] асимптотический высокочастотный метод расчета характеристик рассеяния воздушных РЛО сложной формы, в том числе с неидеально отражающей поверхностью (частично или полностью покрытых радиопоглощающим материалом (РПМ)). Поверхность исследуемого РЛО может иметь нерегулярности поверхности в виде изломов (также покрытых РПМ). Метод основан на раздельном оценивании вкладов гладких и кромочных участков поверхности объекта в общее рассеянное ЭМП. Применение данного высокочастотного метода к поверхностям лопастей винтов (которые нельзя отнести к электрически большим) не позволяет рассчитывать на получение точных результатов вычисления характеристик рассеяния РЛО. Поэтому к элементам конструкции резонансных размеров применяется метод ИУ. Для этого предусматривается вычисление рассеянного поля, основанное на решении ИУ магнитного поля (ИУ В. А. Фока, [15]) для плотности электрического тока на поверхности идеально проводящего объекта [13, 14].

Поскольку поверхность фюзеляжа и винты вертолета можно представить в виде отдельных несоприкасающихся конструкций, то для расчета суммарного рассеянного ЭМП можно применить следующую итерационную процедуру.

Для расчета ЭМП, рассеянного фюзеляжем, без учета винтов, применяется высокочастотный метод с использованием интегрального представления ЭМП [1, 9, 11-13], полученного из леммы Лоренца [15]. Применяв обобщение приближения физической оптики для поля на поверхности, охватывающей электрически большой фюзеляж, можно получить приближенное выражение для поля в любой точке пространства вне фюзеляжа. Далее, вычисляется плот-

ность тока на поверхности винтов, путем решения ИУ В.А. Фока. В этом уравнении правая часть является удвоенной суммой плотностей тока, порожденных первичной волной и вторичной, рассеянной фюзеляжем вертолета. После того, как найдены плотности тока на винтах, можно найти уточненное асимптотическое приближение поля на поверхности, охватывающей фюзеляж. Описанная процедура циклически повторяется до установления результатов.

В случае слабого электродинамического взаимодействия между рассмотренными элементами конструкции, ЭМП, рассеянное вертолетом, может быть найдено в виде суммы полей, рассеянных фюзеляжем и винтами, найденных раздельно. Такая ситуация наблюдается при моделировании рассеяния вертолета с вращающимися винтами. Далее демонстрируются результаты расчета характеристик рассеяния вертолета Ми-24П, полученные с помощью разработанного метода. При расчетах использовались модели поверхностей фюзеляжа, основного и хвостового винтов, представленные на рис. 1 и 2 соответственно. Технические характеристики вертолета представлены в табл. 1 ([16]).

Для моделирования спектров винтовой модуляции использовался следующий алгоритм, разработанный в работе [9].



Рис. 1. Модель фюзеляжа вертолета Ми-24П



Рис. 2. Модели главного и хвостового винтов вертолета Ми-24П

Таблица 1
Технические характеристики
вертолета Ми-24П ([16])

Характеристика	Значение
Диаметр главного винта, м	17,30
Скорость вращения главного винта, об/мин	240
Диаметр хвостового винта, м	3,908
Скорость вращения хвостового винта, об/мин	1124
Длина вертолета, м	17,51
Высота вертолета, м	3,90
Максимальная скорость, км/ч	320
Крейсерская скорость, км/ч	260
Практический потолок, м	4500

Задается траектория движения РЛЮ в виде набора точек, которым соответствует положение геометрического центра РЛЮ при движении. Каждому такому положению соответствует определенный ракурс (угол места ε и азимут β направления совмещенного облучения и приема). Ракурс изменяется в соответствии с направлением, скоростью полета и интервалом дискретизации по времени Δt . Вращение винта моделируется путем задания изменения положения его лопастей относительно направления облучения (приема) в те же моменты времени с шагом Δt . Если вращающихся элементов несколько (главный и хвостовой винт вертолета), положение их лопастей изменяется в соответствии с частотами их вращения. Тем самым ЭМП, рассеянные фюзеляжем и винтами, вычисляются синхронно в одинаковые моменты времени. Далее, при заданных скоростях вращения винтов осуществляется переход от зависимости комплексных амплитуд рассеянного поля от угла места и азимута к временной зависимости рассеянного поля. Спектр винтовой модуляции рассчитывается путем применения дискретного преобразования Фурье к полученной временной функции.

2. Результаты расчетов спектров винтовой модуляции вертолета Ми-24П

Моделирование проводилось для случая совмещенного облучения и приема с использованием в качестве зондирующего монохроматического сигнала с длиной волны $\lambda_0=1,667$ м (несущая частота $f_0=180$ МГц). Вычисления проводились для двух ортогональных поляризаций зондирующего сигнала – горизонтальной (вектор напряженности электрического поля \vec{E} ориентирован в азимутальной плоскости) и вертикальной (\vec{E} ориентирован в плоскости, проходящей через вектор направления облучения и перпендикулярной азимутальной плоскости). Угол места вертолета во всех рассмотренных случаях составлял $\varepsilon=3$ град. (зондирование из нижней полусферы).

Суммарное ЭМП, рассеянное вертолетом, вычислялось как сумма (с учетом фазы) полей, рассеянных фюзеляжем, главным и хвостовым винтом, без учета

их электродинамического взаимодействия. Для выяснения отражающих свойств исследуемых элементов конструкции вертолета и удобства анализа спектров винтовой модуляции в дальнейшем на рис. 3 и 4 представлены их характеристики рассеяния: диаграмма обратного вторичного рассеяния (ДОВИ) фюзеляжа – зависимость его эффективной поверхности рассеяния ЭПР σ от азимутального направления облучения β при фиксированном угле места; ДОВИ винтов – зависимость их ЭПР от угла поворота винта α_v относительно собственной оси при фиксированном направлении облучения. ДОВИ, представленные на рис. 3 и 4, получены с шагом изменения угла $\Delta\beta=\alpha_v=0,02$ град. При определении поляризации и направления облучения ориентация винтов в пространстве была такой же, как их расположение на вертолете. Перейдем к анализу полученных результатов.

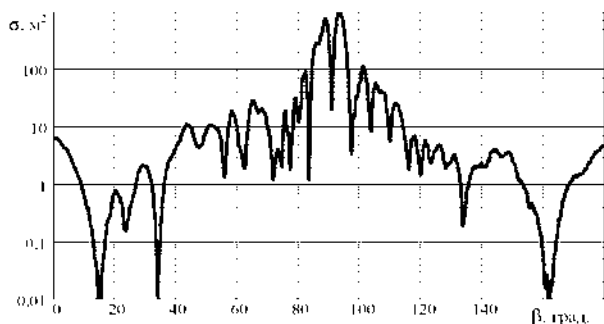


Рис. 3. ДОВИ фюзеляжа вертолета Ми-24П (поляризация горизонтальная)

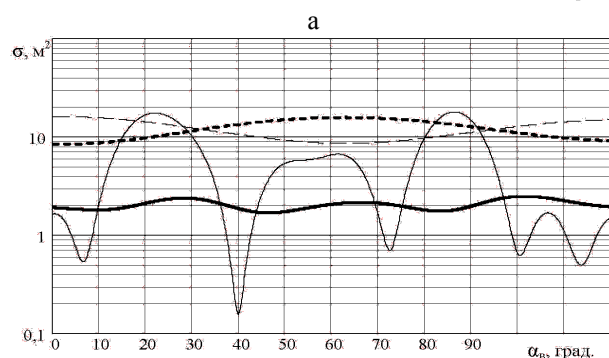
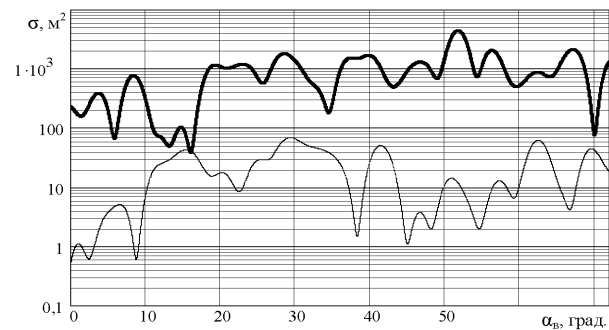


Рис. 4. ДОВИ винтов вертолета Ми-24П:
а – главный винт, б – хвостовой винт
(серые жирные линии – горизонтальная поляризация, черные тонкие – вертикальная; сплошные линии – носовой ракурс вертолета, $\beta=0$, штриховые – боковой ракурс, $\beta=90$ град.)

Сравнение ДОВИ фюзеляжа и винтов, приведенных на рис. 3 и 4, показывает, что ЭПР главного винта на горизонтальной поляризации может превышать ЭПР фюзеляжа (серые жирные линии на рис. 3 и 4, а). Данный факт можно пояснить тем, что лопасти главного винта представляют собой вытянутые электрически тонкие рассеиватели с достаточно острыми краями, ориентированные в данном случае параллельно вектору \vec{E} падающей волны. На вертикальной поляризации (тонкая черная линия, рис. 4а) ЭПР главного винта ниже примерно на один порядок. При ориентации винтов, соответствующей носовому ракурсу вертолета, на горизонтальной поляризации ЭПР хвостового винта, ориентированного вертикально, существенно меньше ЭПР главного винта (сплошные серые жирные линии, рис. 4, а и б). Поэтому следует ожидать, что основной вклад в амплитудную модуляцию, обусловленную вращением винтов, в данном случае будет давать главный винт. На вертикальной поляризации (сплошные тонкие черные линии), когда хвостовой винт параллелен вектору \vec{E} , а главный расположен в перпендикулярной плоскости, интенсивность их обратного рассеяния соизмерима и амплитудная модуляция будет представлять собой интерференцию полей, рассеянных двумя винтами.

Изменение ЭПР хвостового винта при направлении облучения, соответствующего боковому ракурсу вертолета (штриховые линии, рис. 4, б) имеет гармонический характер. В среднем интенсивность обратного рассеяния хвостового винта при таком ракурсе больше, чем в случае облучения, соответствующего носовому ракурсу вертолета.

Далее на рис. 5 – 8 представлены спектры винтовой модуляции сигналов, отраженных вертолетом, обусловленной вращением винтов.

Спектры получены для прямолинейного равномерного полета вертолета на постоянной высоте 2 км (угол места $\varepsilon=3$ град., дальность $D=38,2$ км) с крейсерской скоростью 260 км/ч, в радиальном направлении на локатор ($\beta=0$, рис. 5 и 6) и по касательной ($\beta \approx 90$ град., рис. 7 и 8). Интервал дискретизации по времени составлял $\Delta t=13,89$ мкс. За это время главный винт поворачивается на $\Delta\alpha_v=0,02$ град., а хвостовой винт на $\Delta\alpha_h=0,094$ град. Время наблюдения выбрано 0,25 с, что соответствует одному полному обороту главного винта. При расчетах считалось, что с учетом скорости движения вертолета за время 0,25 с ракурс фюзеляжа изменяется незначительно.

Для сравнения на рис. 5 – 8 показаны спектры модуляции отдельно винтов (рис. а и б) при их неподвижном центре. Как видно из приведенных рисунков, спектры винтовой модуляции имеют линейчатую структуру и несимметричны относительно центра. Данная несимметричность поясняется формой поперечного сечения лопастей. При вращении

лопасти обращены к локатору попеременно передней (гладкой) или задней (более острой стороной). В результате интенсивность отражения от набегающей и уходящей лопастей отличается [4, 5, 9].

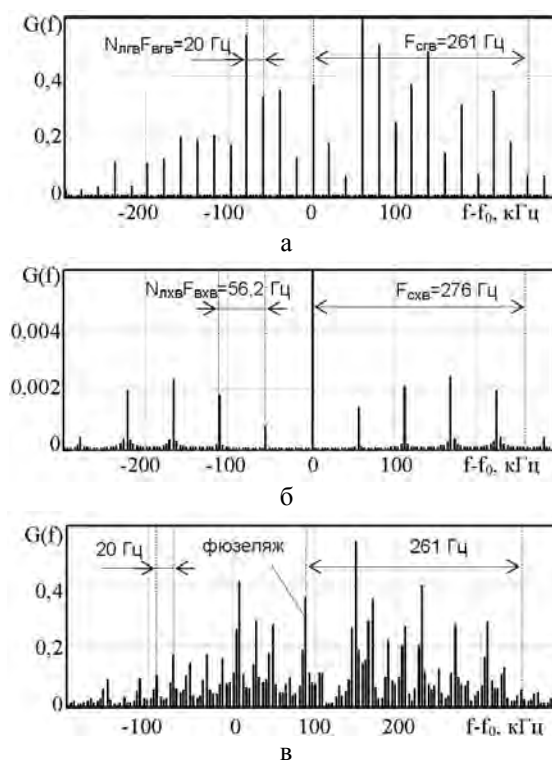


Рис. 5. Спектр винтовой модуляции вертолета Ми-24П на горизонтальной поляризации; носовой ракурс, $\beta=0$ (а – главный винт, б – хвостовой винт, в – полная модель)

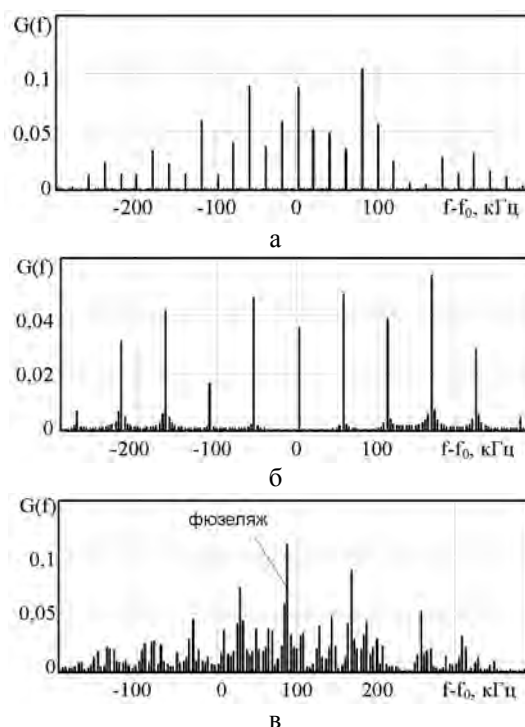


Рис. 6. Спектр винтовой модуляции вертолета Ми-24П на вертикальной поляризации; носовой ракурс, $\beta=0$ (а – главный винт, б – хвостовой винт, в – полная модель)

Интервал между спектральными линиями, на которых сосредоточена энергия сигнала, равен ([4, 5, 9]) произведению количества лопастей N_l на скорость вращения винта F_v и составляет $N_{лв} F_{вв} = 20$ Гц для главного винта, $N_{лхв} F_{вхв} = 56,2$ Гц для хвостового (рис. 5).

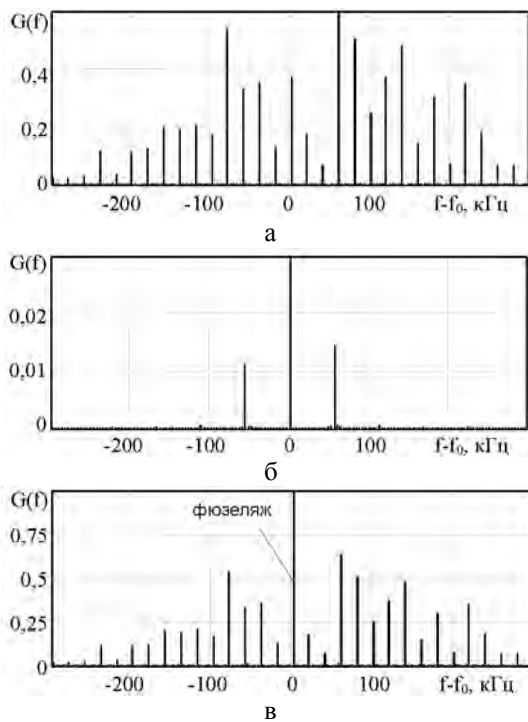


Рис. 7. Спектр винтовой модуляции вертолета Ми-24П на горизонтальной поляризации; боковой ракурс, $\beta=90$ град. (а – главный винт, б – хвостовой винт, в – полная модель)

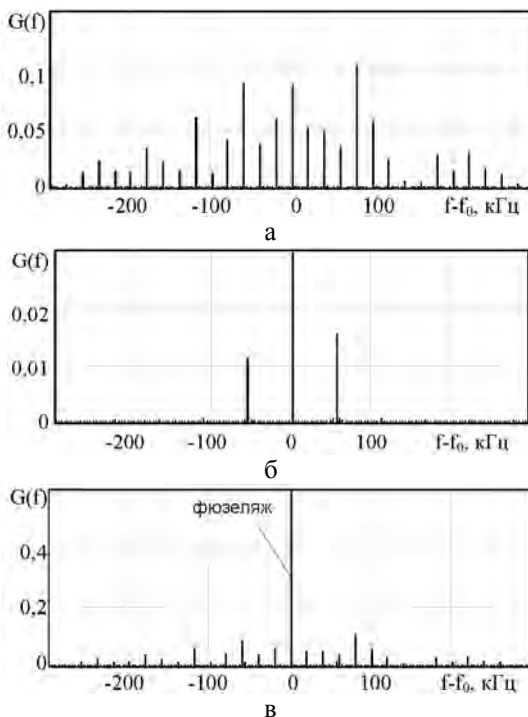


Рис. 8. Спектр винтовой модуляции вертолета Ми-24П на вертикальной поляризации; боковой ракурс, $\beta=90$ град. (а – главный винт, б – хвостовой винт, в – полная модель)

Ширина спектра винтовой модуляции зависит от частоты вращения винта F_v , его радиуса R_v , длины зондирующей волны: $F_c = 4\pi R_v F_v / \lambda_0$ [4, 5, 9]. Ширина спектра модуляции, обусловленной вращением главного и хвостового винта соизмеримы и составляют величины $F_{сгв} = 261$ Гц и $F_{схв} = 276$ Гц соответственно. Как видно из рис. 5 – 8, в, указанные параметры не зависят от ракурса и ввиду того, что скорость вращения винтов вертолетов постоянна, они могут использоваться в качестве признаков распознавания.

Анализ рис. 3 – 5 показывает, что при носовом ракурсе вертолета и горизонтальной поляризации зондирующей волны амплитудная модуляция отраженного сигнала определяется вращением главного винта (уровень отражения от хвостового винта на много меньше, чем от главного, рис. 4 а, б). При этом же ракурсе в случае вертикальной поляризации амплитудная модуляция обусловлена интерференцией сигналов, отраженных двумя винтами (интенсивность отражения винтов соизмерима). При боковом ракурсе вертолета на обеих поляризациях характер спектра, обусловленного отражением от хвостового винта, а также малые изменения положения фюзеляжа в радиальном направлении, приводят к тому, что спектр винтовой модуляции вертолета практически повторяет спектр главного винта.

Выводы

В работе рассмотрен электродинамический комбинированный метод расчета характеристик рассеяния РЛО сложной формы, конструкция которых содержит элементы конструкции как больших электрических, так и резонансных размеров. В качестве таких РЛО могут рассматриваться вертолеты при локации в метровом диапазоне длин волн. Метод основан на применении асимптотического высокочастотного метода для расчета ЭМП, рассеянного электрически большими элементами, и метода ИУ для расчета поля, рассеянного элементами резонансных размеров. Суммарное рассеянное поле может быть найденным как сумма полей, рассеянных электрически большими и резонансными элементами планера. Для уточнения может использоваться описанный итерационный процесс, позволяющий уточнять результат, поочередно учитывая в поле облучения элементы одного типа ЭМП, найденные с учетом рассеяния на элементе другого типа.

Описанный комбинированный метод применен для расчета спектров винтовой модуляции сигналов, отраженных вертолетом, обусловленной вращением винтов. Проанализированы основные закономерности спектров винтовой модуляции вертолета на длине волны $\lambda_0 = 1,667$ м. В целом параметры спектров винтовой (турбинной) модуляции могут использоваться в качестве признаков распознавания различ-

ных воздушных РЛО, для определения характера их движения (обнаружения маневра), а также при диагностике авиационных двигателей.

В дальнейшем целесообразно исследовать влияние на параметры винтовой модуляции вибраций корпуса летательного аппарата и вращающихся элементов конструкции, а также развить созданный метод для расчета спектров винтовой модуляции летательных аппаратов с различными типами двигателей и размерами вращающихся элементов.

Список литературы

1. Shirman Ya.D. et al. *Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering Recognition, Detection and Tracking*. Ya.D. Shirman (ed). – Norwood, M.A.: Artech House, 2002. – 382 p.
2. Слюсарь Н.М. Вторичная модуляция радиолокационных сигналов динамическими объектами / Н.М. Слюсарь. – Смоленск: ВА ВПВОВС РФ, 2006. – 173 с.
3. Слюсарь Н.М. Эффект вторичной модуляции радиолокационных сигналов. Мифы и реальность / Н.М. Слюсарь // Сборник научных трудов 4-го Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития", МРФ-2011. Конференция "Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии". X. 18-21 октября 2011. ХНУРЕ. Харьков. – 2011. – Т. 1, ч. 1. – С. 47-50.
4. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теории. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
5. Довідник з протиповітряної оборони / А. Я. Торопчин, І. О. Романенко, Ю. Г. Даник, Р. Е. Пауценко та ін. – К.: МО України, Х.: ХВУ, 2003. – 368 с.
6. Леценко С. П. К вопросу получения спектра вторичной модуляции и радиолокационного поперечного портрета быстровращающейся многолопастной структуры / С.П. Леценко // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ. – Вип. 14, 1997. – С. 75 - 84.
7. Кравцов С. В. Моделирование рассеяния электромагнитного поля на пропеллере аэродинамической цели / С.В. Кравцов, С.П. Леценко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1999. – №4. – С. 39-44.

8. Eibert T.F. *Some scattering results computed by surface-integral-equation and hybrid finite-element – boundary-integral techniques, accelerated by the multilevel fast multipole method* / T.F. Eibert // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. – 2007. – Vol. 49, No 2. – P. 61-69.

9. Метод чисельного моделювання спектрів гвинтової модуляції вертольотів / Г.С. Залевський, М.М. Бречка, В.О. Василюк та ін. // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2012. – Т. 2, № 3(101). – С. 13-17.

10. Wulf-Dieter Wirth. *Radar Techniques Using Array Antennas*. 2nd ed. / Wulf-Dieter Wirth. – Stevenage, United Kingdom : The Institution of Engineering and Technology, 2013. – 560 p.

11. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.В. Кукобко и др.; под ред. О.И. Сухаревского. – Х.: ХУ ВС, 2009. – 468 с.

12. Sukharevsky O.I, Gorelyshev S.A., Vasilets V.A. 2012. *UWB Pulse Backscattering from Objects Located near Uniform Half-Space*. In J.D. Taylor et al. *Ultrawideband Radar: Applications and Design*. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, pp. 253-284.

13. Залевский Г.С. Радиолокационные дальностные портреты крылатых ракет в различных диапазонах длин волн / Г.С. Залевский, В.А. Василец, О.И. Сухаревский // Прикладная радиоэлектроника. – 2014. – Т. 13, № 1. – С. 20-28.

14. Zalevsky G.S. *Secondary Emission Characteristics of Resonant Perfectly Conducting Objects of Simple Shape* / G.S. Zalevsky, O.I. Sukharevsky // *Proceedings of International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT'13, Odessa, Ukraine. 16-20 Sept. 2013. Ukrainepp. Odessa, Ukraine. – 2013. – P. 145-147.*

15. Васильев Е. Н. Возбуждение тел вращения / Е.Н. Васильев. – М.: Радио и связь, 1987. – 272 с.

16. Уголок неба. Авиационная энциклопедия. Ми-24П [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.airwar.ru/enc/ah/mi24p.html>.

Поступила в редколлегию 14.04.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Кобзев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗСІЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРІВ ГВИНТОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ ВЕРТОЛЬОТІВ

Г.С. Залевський, М.М. Бречка, В.О. Василюк, О.І. Сухаревський

Розглядається комбінований електродинамічний метод розрахунку характеристик розсіювання радіолокаційних об'єктів складної форми, що містять елементи конструкції різних електричних розмірів. Розроблений алгоритм заснований на сумісному використанні високочастотного методу для розрахунку характеристик розсіювання електрично великих елементів конструкції і методу інтегральних рівнянь для частин, співрозмірних із довжиною хвилі, у тому числі електрично тонких. Демонструється застосування запропонованого комбінованого методу для розрахунку спектрів гвинтової модуляції вертольоту у метровому діапазоні довжин хвиль.

Ключові слова: вторинне випромінювання, високочастотний метод розрахунку, гвинтова модуляція, інтегральне рівняння.

COMBINED METHOD FOR CALCULATION OF SCATTERING CHARACTERISTICS OF RADAR OBJECTS WITH COMPLEX SHAPE AND ITS APPLICATION FOR MODELING OF PROPELLER MODULATION SPECTRA OF HELICOPTERS

G.S. Zalevsky, M.M. Brechka, V.A. Vasilets, O.I. Sukharevsky

Combined electrodynamic method for calculation of scattering characteristics of radar objects with complex shape which contain structural components of different electric sizes is considered. Developed algorithm is based on joint use of high-frequency method for calculation of scattering characteristics of electrically large structural components, and integral equation method for parts commensurable to wavelength, including electrically thin elements. Application of proposed combined method for calculation of propeller modulation spectra of helicopter in VHF band is demonstrated.

Keywords: high-frequency numerical method, integral equation, propeller modulation, secondary radiation.