УДК 621.396.96

А.К. Морозов

СИНТЕЗ ЭХО-СИГНАЛА ЦЕЛИ С ТРЕБУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТМЕТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ И ОЦЕНКИ ТАКТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

Морозов Андрей Константинович, окончил Тверской государственный университет, аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники» Тверского государственного технического университета. Область научных интересов: математическое моделирование и программирование. [e-mail: yerdnavorom@gmail.com].

Аннотация

Рассматривается задача моделирования радиолокационных отметок целей воспроизведением эхо-сигнала реальных целей для получения оценки тактических характеристик радиолокационных станций (РЛС). На определенном удалении от РЛС позиционируется программируемый векторный генератор с компьютером и приемником на заданных угловых координатах. Компьютер формирует цифровое представление формы сигнала, генератор излучает сигнал, по структуре соответствующий сигналу РЛС. Для обеспечения межпериодной синхронизации триггерный вход генератора получает сигнал начала периода от приёмника и компьютера. Приёмник принимает и обрабатывает импульсы РЛС, при превышении порога мощности принятого сигнала на генератор под управлением компьютера отправляется сигнал начала излучения подготовленного шаблона эхо-сигнала. В результате генератор с заданных координат излучает эхо-сигнал, соответствующий эхо-сигналу требуемой отметки цели. Рассмотрены условия формирования отметок целей для РЛС и характеристики моделируемых отметок целей на основе характеристик применяемого оборудования и испытываемой РЛС. Также приведен пример расчёта характеристик моделируемых отметок.

Ключевые слова: импульсная радиолокационная станция, отметка радиолокационной цели, радиолокационная цель, векторный генератор сигналов, параметры отметки радиолокационной цели.

doi: 10.35752/1991-2927-2020-3-61-31-38

SYNTHESIS OF THE TARGET ECHO SIGNAL WITH THE REQUIRED PARAMETERS TO MODEL RADAR BLIP AND ASSESS TACTICAL CHARACTERISTICS OF RADARS

Andrei Konstantinovich Morozov, graduated from Tver State University; Postgraduate Student at the Department of Computer Software of Tver State Technical University; the area of his scientific interests relates to the mathematical modeling and programming. e-mail: yerdnavorom@gmail.com.

Abstract

The article deals with the problem of modelling radar blips by reproducing an echo signal of true targets to assess tactical characteristics of radars. A software-defined vector generator with incorporated computer and receiver is placed at given angular coordinates and at some distance from radar. The computer generates a digital representation of the waveform; the generator emits a signal corresponding in structure to the radar one. Trigger input of the generator obtains a signal on the period start coming from receiver and computer to ensure inter-period synchronization. The receiver obtains and processes pulses coming from radar. When the strength threshold of received signal is exceeded, the computer-controlled generator receives a signal informing that emitting of prepared echo template has started. As a result, the generator emits an echo signal from the given coordinates, which corresponds to the echo signal of the desired radar blip. The article discusses conditions for generating these blips and characteristics of simulated blips based on characteristics of the equipment used and the radars tested. The author also gives an example of calculating the characteristics of simulated radar blips.

Key words: pulse radar, radar blip, radar target, vector signal generator, radar blip profile.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка характеристик радиолокационных станций (РЛС) на различных этапах их создания представляет сложную научно-техническую задачу [1]. Существует три основных метода оценки характеристик РЛС: расчётный (аналитический), натурных испытаний, опытно-теоретический. Расчётный метод заключается в аналитических расчётах характеристик РЛС с использованием общих соотношений и формульных зависимостей. Существенным недостатком этого метода является то, что, базируясь на строгих математических выкладках, он не позволяет учесть многообразие факторов, влияющих на характеристики РЛС в реальных условиях их функционирования. Поэтому он используется только на ранних этапах создания РЛС для получения приближённых оценок [2].

Один из основных методов, с помощью которого можно получить наиболее достоверную информацию о функционировании РЛС и её характеристиках, является метод натурных испытаний [2]. Натурные испытания позволяют оценить характеристики станции в реальных условиях её эксплуатации, насколько осуществимы такие условия, и можно ли обеспечить необходимое число экспериментов. Успех натурных экспериментов во многом зависит от правильного планирования работ, а также учёта различных факторов (эксплуатационные характеристики создаваемой РЛС, квалификации специалистов, ограничения на затраты материальных средств, наличия средств обеспечения испытаний и т. д.). План экспериментальных работ должен предусматривать минимальные затраты времени и средств. Поэтому этот метод испытаний является наиболее информативным. На практике возможности проведения натурных экспериментов ограничены, а иногда невозможны. Кроме того, их проведение требует больших затрат времени и

средств из-за использования в качестве целей для РЛС реальной техники с измерительным оборудованием (самолёты-лаборатории и прочая реальная техника).

Поэтому в настоящее время при проектировании и испытаниях сложных систем широко применяют опытно-теоретический метод, основанный на использовании натурных испытаний, а также с применением имитационных средств и математического моделирования. Эта группа методов позволяет оценить характеристики РЛС с требуемой достоверностью во всех условиях её практического применения при минимальных затратах времени и средств [2].

Например, оценка может проводиться с использованием компьютерной модели РЛС, на вход которой подаётся модель сигнала цели, и анализируется результат обработки сигналов моделью РЛС [3]. Дополнительно возможен вариант оценки характеристик отдельных модулей РЛС или её упрощённой стендовой модели, на вход которой также подаются тестовые сигналы, соответствующие реальным целям, и анализируется результат работы модуля или стенда. [1, 4, 5] Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки. Например, метод натурных испытаний – достоверный, дорогой и организационно сложный. Метод с применением компьютерных или стендовых моделей РЛС проще с точки зрения организации, но требует значительных вычислительных мощностей и максимально точного соответствия модели и реальной РЛС.

Поэтому предлагается для оценки характеристик РЛС проводить её испытания на позиции (рис. 1 б), генерируя эхо-сигналы цели с помощью программируемого векторного генератора и приёмника (имитационное оборудование), расположенного на заданных координатах от РЛС.

Рис. 1. Функциональная схема: а) процессов при обнаружении цели РЛС, б) процессов при моделировании отметки цели для РЛС

Рис. 2. Состав и схема имитационного оборудования

Предлагается вместо реальной цели использовать имитационное оборудование (рис. 2) на носителе, задача которого – формирование и излучение эхо-сигнала цели в момент направления антенны РЛС на носитель.

Таким образом, в сравнении с рисунком 1 а вместо процесса отражения сигнала РЛС от цели появляются процессы приема, обработки и излучения эхо-сигнала имитационным оборудованием.

В результате вместо эхо-сигнала цели должен быть сформирован искусственный эхо-сигнал от имитационного оборудования.

Такой подход применяется, например, для срыва автосопровождения цели по дальности. На самолете устанавливаются специальный приёмник и излучатель. Приёмник принимает и обрабатывает сигнал от РЛС. В случае, если приёмник на борту принимает сигнал от РЛС выше определенного порога, т. е. РЛС захватила и сопровождает цель, тогда с генератора на борту излучается импульсная помеха большой мощности с плавно изменяющимся временем задержки. Система слежения РЛС начинает работать на сопровождение излучаемых импульсов. В результате происходит срыв сопровождения реальной цели [6].

Так как моделирование отметок происходит по полю, т. е. с участием среды, и сигнал, принимаемый РЛС от имитационного оборудования, проходит через все системы РЛС, то наблюдение отметки цели на индикаторе РЛС также косвенно проверяет работу всех систем РЛС с учётом среды и особенностей позиции расположения станции. Также для моделирования радиолокационной отметки цели не требуется наличия реальной цели, что также потенциально снижает стоимость проведения измерений и сложность их организации.

Поэтому достоинствами данного метода являются оценка характеристик реальной станции в реальных условиях с учётом влияния позиции; значительно меньшие организационные проблемы, так как реальная техника не используется. Также необходимо отметить, что результат моделирования зависит от степени схожести искусственного эхо-сигнала с эхо-сигналом цели.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Проведем оценку возможностей измерительного оборудования, если известны его характеристики и некоторые характеристики испытываемой РЛС.

Рассмотрим поэтапно процессы на рисунке 1 б и их отличие от рисунка 1 а.

1. Излучение. Здесь отличия в том, что реальная цель находится в диапазоне действия РЛС (от минимальной дальности обнаружения до максимальной), а носитель

находится на таком расстоянии, на котором возможно моделирование отметки имеющимся оборудованием (будет рассмотрено далее).

2. Приём, обработка и излучение. Эта группа процессов заменяет этап отражения сигнала целью. Рассмотрим каждый из них отдельно.

2 а. Приём. Для возможности приёма импульсов РЛС расстояние и чувствительность приёмника должны быть такими, чтобы мощности импульсов было достаточно для их обнаружения приёмником на носителе [7], т. е. должно выполняться условие:

$$P_{np} = \frac{G_{рлс} P_{рлс}}{4\pi R_{иц}^2} \frac{G_{np} \lambda^2}{4\pi}, \quad (1)$$

$$P_{np} > P_{пор}, \quad (2)$$

где P_{np} – мощность принимаемого сигнала, Вт; G_{np} – коэффициент направленного действия антенны приёмника; $P_{рлс}$ – мощность сигнала, излучаемого РЛС, Вт; $G_{рлс}$ – коэффициент направленного действия антенны РЛС; $R_{иц}$ – расстояние между приёмником (имитационным оборудованием) и антенной РЛС, м; λ – длина волны для сигнала РЛС, м; $P_{пор}$ – мощность порогового сигнала для приёмника, Вт.

Также для возможности осуществления приёма сигнала от РЛС приёмник должен находиться на таком расстоянии, на котором диаграмма направленности антенны РЛС сформирована, т. е. должно выполняться условие:

$$R_{иц} \geq \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (3)$$

где D – величина раскрытия антенны, м.

Результат выполнения процесса – сигнал начала взаимодействия компьютера с генератором.

2 б. Обработка. Этап обработки включает в себя операции, связанные с формированием параметров сигнала, соответствующих требуемым параметрам отметки цели, а именно: время задержки для сигнала или дальность для отметки, частота Доплера для сигнала или радиальная скорость для отметки, мощность для сигнала или эффективная площадь рассеяния (ЭПР) для отметки.

Рассмотрим, как необходимо формировать время задержки, чтобы отметка имела требуемое значение дальности. Для моделирования величины наклонной дальности цели необходимо формировать время задержки для радиоимпульсов [8]:

$$\frac{ct_3}{2} = R_{мц} \approx R_{ц}, \quad (4)$$

где c – скорость света, м/с; t_3 – время задержки (запаздывание) принятых импульсов, относительно излученных, с; $R_{мц}$ – наклонная дальность моделируемой цели, м; $R_{ц}$ – наклонная дальность цели, м.

Графическое представление величины времени задержки представлено на рисунке 3.

Для реальной цели время задержки формируется в зависимости от расстояния. При моделировании отметки цели время задержки формируется искусственно добавлением паузы в сигнал между импульсами, в соответствии с диаграммой на рисунке 4. Однако так как носитель с измерительным оборудованием находится на некотором удалении от РЛС и измерительное оборудование имеет некоторое время реакции, минимально возможное расстояние для моделируемой отметки можно представить в виде:

$$R_{мц \min t} = \frac{t_{устр}c}{2} + R_{иц}, \quad (5)$$

где $R_{мц \min t}$ – минимальная дальность моделируемой цели в соответствии с временем задержки, м; $t_{устр}$ – величина, характеризующая быстродействие имитационного оборудования (или имитатор целей), с; $R_{иц}$ – расстояние между имитатором целей (имитационным оборудованием) и антенной РЛС, м.

Для оценки максимальной дальности моделируемой отметки цели можно использовать:

$$R_{мц \max t} = \frac{t_{змц \max}c}{2} = \frac{(T_{имп} - \tau_{имп})c}{2}. \quad (6)$$

С учётом, что

$$R_{мц \min t} < R_{мц \max t}, \quad (7)$$

где $R_{мц \max t}$ – максимальная дальность моделируемой цели в соответствии с временем задержки, м; $t_{змц \max}$ – максимальное время задержки моделируемой цели, с; $T_{имп}$ – период следования импульсов для сигнала РЛС, с; $\tau_{имп}$ – длительность импульса для сигнала РЛС, с.

Рассмотрим, как формируется частота Доплера или радиальная скорость для отметки. Для формирования импульсов предлагается использовать программируемый векторный генератор сигналов. Векторные генераторы могут формировать сигнал с произвольной формой по закону:

$$S(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \sin(2\pi f_0 t), \quad (8)$$

где $I(t)$, $Q(t)$ – квадратуры, модулирующие сигналы; $\cos(2\pi f_0 t)$, $\sin(2\pi f_0 t)$ – высокочастотный сигнал; $S(t)$ – модулированный высокочастотный сигнал.

Частота сигнала $S(t)$ изменяется квадратурами $I(t)$, $Q(t)$, отсчёты которых могут быть сформированы в пределах полосы частот f . Поэтому при использовании

Рис. 3. Графическое представление времени задержки сигнала цели

Время наблюдения
сигналов (t)

$$\begin{aligned} t &= \tau_{имп} \\ t &= \tau_{имп} + R_{иц}/c \\ t &= \tau_{имп} + R_{ц}/c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= \tau_{имп} + R_{ц}/c \\ t &= (2R_{ц} - R_{иц})/c \\ t &= 2R_{ц}/c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= (2R_{мц} - R_{иц})/c + \tau_{имп}/2 \\ t &= 2R_{мц}/c \end{aligned}$$

Шкала расстояния до РЛС

Рис. 4. Диаграмма распространения сигналов относительно времени начала излучения РЛС (расшифровка всех обозначений на рисунке 4 приводится далее по тексту)

квадратурной модуляции частота модулированного высокочастотного сигнала может изменяться в пределах $f_0 \pm f$ [9]. Тогда величина максимальной радиальной скорости ограничена:

$$v_{мц \max} = \frac{f_{\text{допл max}} \lambda}{2} = \frac{f \lambda}{2}, \quad (9)$$

где $v_{мц \max}$ – максимальная радиальная скорость цели, м/с; $f_{\text{допл max}}$ – максимальная частота Доплера, Гц; f – полоса частот для генератора, Гц.

Обычно полоса частот имеет значение порядка МГц, а для изменения радиальной скорости цели достаточно смещения нескольких десятков герц, поэтому максимальное значение радиальной скорости будет огромным.

Для оценки возможностей генератора по заданию радиальной скорости цели большее значение имеет шаг установки частоты. Зная шаг установки частоты, можно оценить шаг изменения скорости цели:

$$\Delta v_{мц} = \frac{\Delta f \lambda}{2}, \quad (10)$$

где $\Delta v_{мц}$ – шаг изменения скорости цели, м/с; Δf – шаг установки частоты генератором, Гц.

Дополнительно, векторный генератор имеет характеристику – время дискретизации. Это время, за которое формируется каждый отсчёт квадратур $I(t)$ и $Q(t)$. И импульсы, и время задержки формируются с использованием квадратур. Поэтому время дискретизации также является и дискретой, формирующей время задержки:

$$\Delta t_3 = t_{\text{д}}, \quad (11)$$

где Δt_3 – шаг формирования времени задержки, с; $t_{\text{д}}$ – время дискретизации векторного генератора, с.

Соответственно шаг изменения наклонной дальности моделируемой цели:

$$\Delta R_{мц} = \frac{\Delta t_3 c}{2} = \frac{t_{\text{д}} c}{2}, \quad (12)$$

где $\Delta R_{мц}$ – шаг изменения наклонной дальности моделируемой цели, м.

Результат выполнения процесса – цифровые отсчёты квадратур, сохранённые в файл на ЭВМ, соответствующие требуемым параметрам сигнала для отметки цели.

2 в. Излучение искусственного эхо-сигнала. На этом этапе ЭВМ взаимодействует с генератором (передаёт файл с заранее вычисленными отсчётами квадратур и отправляет команды на генератор) для преобразования цифрового представления сигнала в аналоговое.

Для приближения условий моделирования к реальным можно также изменять мощность импульса, моделирующего цель в зависимости от наклонной дальности цели и её площади эффективной отражающей поверхности (ЭПР).

Для этого необходимо, чтобы поток мощности, создаваемый генератором в направлении антенны РЛС, был таким же, как поток мощности, отражаемый целью с заданной ЭПР [10]:

$$P_{изл \text{ ц}} = P_{ген}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} P_{изл \text{ рлс}} G_{изл \text{ рлс}} \frac{1}{4\pi R_{ц}^2} \sigma \frac{1}{4\pi R_{ц}^2} &= \\ &= P_{ген} G_{ген} \frac{1}{4\pi R_{изл}^2}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$R_{ц} = \sqrt[4]{\frac{R_{изл}^2 P_{изл \text{ рлс}} G_{изл \text{ рлс}}}{P_{ген} G_{ген} 4\pi} \sigma_{ц}}, \quad (15)$$

где $P_{изл \text{ ц}}$ – плотность потока мощности, отражаемой целью, Вт/м²; $P_{ген}$ – плотность потока мощности, излучаемой генератором (имитационным оборудованием), Вт/м²; $P_{ген}$ – мощность, излучаемая генератором, Вт; $P_{изл \text{ рлс}}$ – мощность, излучаемая РЛС, Вт; $G_{ген}$ – коэффициент усиления антенны генератора; $G_{изл \text{ рлс}}$ – коэффициент усиления антенны РЛС; $\sigma_{ц}$ – ЭПР цели, м²; $R_{ц}$ – наклонная дальность между целью и антенной РЛС, м;

При моделировании сигнала цели также предполагается, что:

$$R_{ц} = R_{мц}, \quad (16)$$

$$\sigma_{ц} = \sigma_{мц}, \quad (17)$$

где $R_{мц}$ – наклонная дальность между моделируемой целью и антенной РЛС, м; $\sigma_{мц}$ – ЭПР моделируемой цели, м².

Результат выполнения процесса – излученный искусственный эхо-сигнал.

3. Распространение. На этом этапе отличие от этапа распространения (рис. 1 а) в точке начала распространения. Во втором случае это от положения носителя (рис. 1 б). В первом случае с расстояния расположения цели (1 а), что должно учитываться при формировании времени задержки для отметки цели. Исходя из (5), можно получить расстояние проведения измерений:

$$R_{изл} = R_{мц \min t} - \frac{t_{\text{усмп}} c}{2}. \quad (18)$$

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦЕЛЕЙ

Теперь проведем оценку возможностей моделирования целей для следующего оборудования:

– Приёмник для преобразования импульсов от РЛС в сигнал запуска для генератора:

• Время формирования сигнала запуска для генератора по импульсам РЛС: 5 мкс;

• Минимальная принимаемая мощность: 1 нВт;

• Максимальная принимаемая мощность: 100 мВт;

• Коэффициент направленного действия антенны: 3;

– Векторный генератор:

• Уровень минимума излучения: 1 нВт;

• Уровень максимума излучения: 100 мВт;

• Коэффициент направленного действия антенны: 3;

• Шаг установки частоты: 1 Гц;

- Время дискретизации: 6,25 нс;
- Ширина полосы частот: 160 МГц;
- РЛС со следующими характеристиками:
- Выходная импульсная мощность: 10 кВт;
- Коэффициент направленного действия антенны:

794;

- Максимальная дальность обнаружения (при $P_{обн} = 0,8$, $P_{лт} = 10^{-6}$, ЭПР цели = 5 м²): 160 км;
- Минимальная дальность обнаружения: 3 км;
- Рабочая частота: 1215 МГц;
- Длительность импульсов: 6 мкс;
- Период следования импульсов: 1,2 мс;
- Величина раскрытия антенны: 5 м.

Вначале необходимо определить расстояние проведения измерений (18):

$$R_{из} = R_{из \min t} - \frac{t_{усп} c}{2} =$$

$$= 3\,000\text{ м} - \frac{5 \cdot 10^{-6} \text{ с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{2} = 2\,250\text{ м};$$

$$R_{из} = 2\,250\text{ м} > \frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \cdot (5\text{ м})^2}{0,25\text{ м}} = 200\text{ м}.$$

Таким образом, расстояние проведения измерений 2250 м, а минимальная наклонная дальность отметки по времени задержки – 3000 м.

Оценка максимального расстояния по максимальному времени задержки. Длительность импульсов, излучаемых РЛС, ($\tau_{имп}$) 88 мкс; период следования импульсов ($T_{имп}$) 1,2 мс, тогда

$$R_{из \max t} = \frac{(T_{имп} - \tau_{имп}) c}{2} =$$

$$= \frac{(1,2 \cdot 10^{-3} \text{ с} - 8,8 \cdot 10^{-5} \text{ с}) \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{2} =$$

$$= 179\,100\text{ м}.$$

Диапазон дальностей для моделирования отметки цели по времени задержки: от 3000 м до 179 100 м.

Оценка диапазона дальностей для отметок целей с различной ЭПР. Для оценки возьмём ЭПР цели: 5, 15, 25, 35.

Так как по мере удаления цели от РЛС мощность принятого сигнала уменьшается, то для отметки цели с одной и той же ЭПР большая принятая мощность соответствует цели, находящейся ближе к РЛС, а меньше – дальше от РЛС. По формулам (16, 17, 18) получаем минимальное ($R_{из \min \sigma}$) и максимальное ($R_{из \max \sigma}$) расстояние моделируемой цели по максимальной ($P_{ген \max}$) и минимальной ($P_{ген \min}$) мощности генератора и ЭПР (σ_c) цели:

$$R_{из \min \sigma} = \sqrt[4]{R_{из}^2 \frac{P_{изл \text{ рлс}} G_{изл \text{ рлс}}}{P_{ген \max} G_{ген \max} 4\pi} \sigma} =$$

$$= \sqrt[4]{(2\,250\text{ м})^2 \cdot \frac{10 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot 794}{0,1 \text{ Вт} \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3,14} \cdot 5\text{ м}^2} =$$

$$= 2\,702\text{ м},$$

$$R_{из \max \sigma} = \sqrt[4]{R_{из}^2 \frac{P_{изл \text{ рлс}} G_{изл \text{ рлс}}}{P_{ген \min} G_{ген \min} 4\pi} \sigma} =$$

$$= \sqrt[4]{(2\,250\text{ м})^2 \cdot \frac{10 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot 794}{10^{-11} \text{ Вт} \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3,14} \cdot 5\text{ м}^2} =$$

$$= 270\,200\text{ м}.$$

График на рисунке 5 показывает, что мощности генератора достаточно для излучения сигнала с расстояния 2250 м. Мощность данного сигнала соответствует мощности эхо-сигнала цели с заданной ЭПР, находящейся на заданном расстоянии. Результаты диапазона моделируемых дальностей целей, скорректированные с учётом диапазона возможного времени задержки, приведены в таблице.

Оценка разрешения по дальности. Шаг изменения наклонной дальности моделируемой цели по времени задержки:

$$\Delta R_{из} = \frac{t_{\partial} c}{2} = \frac{6,25 \cdot 10^{-9} \text{ с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{2} =$$

$$= 0,9375\text{ м} \approx 1\text{ м}.$$

Таблица

Дальность моделируемых отметок для целей с различной ЭПР

ЭПР цели (σ)	Минимальная дальность для отметки цели ($R_{из \min \sigma}$), м	Максимальная дальность для отметки цели ($R_{из \max \sigma}$), м	Минимальная дальность с учётом времени задержки, м	Максимальная дальность с учётом времени задержки, м
5	2 702	270 200	3 000	179 100
15	3 556	355 600	3 556	179 100
25	4 040	404 000	4 040	179 100
35	4 395	439 500	4 395	179 100

Рис. 5. Зависимость шага изменения дальности от текущей дальности моделируемой отметки для целей с различной ЭПР. Горизонтальная ось графика 5 представлена в виде дБ для удобства восприятия (связь между дБ и Вт: $x \text{ дБ} = 10 \log_{10}(y \text{ Вт})$)

Оценка максимальной радиальной скорости. Частота работы РЛС 1215 МГц, что соответствует длине волны

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{1215 \cdot 10^6 \text{ Гц}} = 0,2469 \text{ м}.$$

Предположим, что максимальная скорость целей 1980 км/ч или 550 м/с. Требуемая максимальная ширина полосы для генератора:

$$f_{\text{допл max}} = \frac{2v_{\text{ц max}}}{\lambda} = \frac{f\lambda}{2} = \frac{2 \cdot 550 \text{ м/с}}{0,2469 \text{ м}} = 4\,455,25 \text{ Гц}.$$

Теперь оценим ошибку радиальной скорости для отметки цели, учитывая, что точность установки частоты (Δf) 1 Гц:

$$\Delta v_{\text{ц}} = \frac{\Delta f \lambda}{2} = \frac{1 \text{ Гц} \cdot 0,2469 \text{ м}}{2} = 0,1235 \text{ м/с}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате получены следующие оценки характеристик моделируемых целей:

- минимальная наклонная дальность моделируемой цели 3 000 м;
- максимальная наклонная дальность моделируемой цели 179 100 м;
- шаг изменения наклонной дальности моделируемой цели 1 м.

Это означает, что быстродействия имитационного оборудования достаточно для формирования отметки цели в диапазоне от 3 000 м до 179 100 м с шагом 1 м, а также возможность имитирования эхо сигнала целей

с эффективной площадью отражающей поверхности от 5 м² до 35 м², что соответствует большим и средним радиолокационным целям.

Мощности генератора достаточно для формирования плотности потока мощности, соответствующего средне- и крупнобаритным целям:

- минимальная радиальная скорость моделируемой цели 0 м/с;
- максимальная радиальная скорость моделируемой цели более 550 м/с;
- шаг изменения радиальной скорости моделируемой цели 0,1235 м/с.

Возможно моделирование отметки высокоскоростных, среднескоростных и малоскоростных целей с разрешением по скорости 0,1235 м/с.

В результате, имитационное оборудование для станции с указанными характеристиками способно имитировать наличие различных целей: от средних до крупнобаритных, от малоскоростных до высокоскоростных на всем диапазоне дальности обнаружения указанной РЛС. На основании этого можно сделать вывод, что возможно проведение оценок следующих тактических характеристик РЛС: минимальная и максимальная дальность обнаружения для целей с различной ЭПР; оценка разрешающей способности радиальной скорости, наклонной дальности и т. д. при наличии соответствующих методик проведения измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балуев А.Ф. Некоторые вопросы испытаний и допуска к эксплуатации средств первичной обработки радиолокационной информации // Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Информатика. Прикладная математика. 2005. № 92 (10). С. 158–161.
2. Леонов С.А. Испытания РЛС (оценка характеристик) / под ред. А.И. Леонова. М.: Радио и связь, 1990. 208 с.
3. Павлыгин Э.Д., Соснин П.И. Многоагентное моделирование и визуализация окружающей обстановки морского судна // Автоматизация процессов управления. 2010. № 2. С. 3–12.
4. Абдуллин Ф.Х., Пискорский Д.С., Вдовина Н.В. Исследование помехоустойчивости первичного канала аэродромных обзорных радиолокаторов на модели при воздействии активных шумоподобных помех // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. № 3. С. 65–71.
5. Аполлонов А.А., Баранов Э.В. Математическая модель генератора широкополосной помехи для имитации помеховой обстановки при решении навигационных задач с использованием аппаратуры потребителей

СНРС // Научный вестник МГТУ ГА. Сер. радиофизика и радиотехника. 2008. № 139. С. 119–123.

6. Максимов М.В., Бобнев М.П. Защита от радиопомех. М. : Сов. Радио, 1976. 496 с.

7. Бакулев П.А. Радиолокационные системы : учеб. для вузов. М. : Радиотехника, 2004. 320 с.

8. Лившиц М.В. Разрешающая способность измерительных приборов // КВАНТ. 2002. № 3. С. 35–36

9. Гарин Е.Н. Радиолокационные системы / под ред. В.П. Бердышева. Красноярск : СФУ, 2011. 400 с.

10. Agilent Technologies. Измерения параметров радиолокационных станций. Заметки по применению. Номер публикации 5989-7575RU. URL: https://www.astena.ru/radar_0.html.

REFERENCES

1. Baluev A.F. Nekotorye voprosy ispytaniy i dopuska k ekspluatatsii sredstv pervichnoi obrabotki radiolokatsionnoi informatsii [Some Problems of Testing and Authorization of Means for Radar Data Primary Processing]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Ser. Informatika. Prikladnaya matematika* [Civil Aviation High Technologies Bull. of MSTU SA. Series Informatics and Applied Mathematics], 2005, no. 92 (10), pp. 158–161.

2. Leonov S.A. *Ispytaniya RLS (otsenka kharakteristik)*. Pod red. A.I. Leonova [Radar Testing (Performance Evaluation). Eds. A.I. Leonov]. Moscow, Radio i Sviaz Publ., 1990. 208 p.

3. Pavlygin E.D., Sosnin P.I. Mnogoagentnoe modelirovaniye i vizualizatsiya okruzhaiushchei obstanovki morskogo sudna [Multi-agent Modeling and Visualization of Environment for Seagoing Craft]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2010, no. 2, pp. 3–12.

4. Abdullin F.Kh., Piskorskii D.S., Vdovina N.V. Issledovanie pomekhustoichivosti pervichnogo kanala aerodromnykh obzornykh radiolokatorov na modeli pri

vozdeistvii aktivnykh shumopodobnykh pomekh [Research of the Noise Immunity of the Airport Surveillance Radar Primary Channel on Model at Influence of Active Noise-Like Interference]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Kompiuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bull. of the South Ural State University. Series Computer Technologies, Automatic Control, Radioelectronics], 2014, no. 3, pp. 65–71.

5. Apollonov A.A., Baranov E.V. Matematicheskaya model generatora shirokopolosnoi pomekhi dlia imitatsii pomekhovoi obstanovki pri reshenii navigatsionnykh zadach s ispolzovaniem apparatury potrebiteli SNRS [The Mathematical Model of a Broadband Jamming Generator for the Jamming Environment Simulation while Solving the Navigation Tasks Using the Equipment of the Global Positioning System Consumers]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Ser. radiofizika i radiotekhnika* [Civil Aviation High Technologies. Bull. of MSTU SA. Series Radiophysics and Radioengineering], 2008, no. 139, pp. 119–123.

6. Maksimov M.V., Bobnev M.P. *Zashchita ot radiopomekh* [Protection Against Radio Jamming]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1976. 496 p.

7. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnye sistemy*. Ucheb. dlia vuzov [Radar Systems. Study Guide for Universities]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p.

8. Livshits M.V. Razreshaiushchaya sposobnost izmeritelnykh priborov [Measurement Resolution]. *KVANT* [Kvant. Sci. Math. and Phys. Journal], 2002, no. 3, pp. 35–36.

9. Garin E.N. *Radiolokatsionnye sistemy*. Pod red. V.P. Berdysheva [Radar Systems. Eds. V.P. Berdyshev]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2011. 400 p.

10. Agilent Technologies. *Izmereniya parametrov radiolokatsionnykh stantsii. Zаметki po primeneniiu*. Nomer publikatsii 5989-7575RU [Measuring the Radar Unit Parameters. Application Notes. Article File no. 5989-7575RU]. Available at: https://www.astena.ru/radar_0.html.