

УДК 623.41

doi: 10.53816/20753608_2025_4_104

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
БОРТОВОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ДАТЧИКА ЦЕЛИ X-ДИАПАЗОНА
РАДИОВОЛН С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

**ESTIMATION OF EFFICIENCY OF ONBOARD X-BAND RADAR SENSOR
WITH LINEAR FREQUENCY MODULATION**

По представлению чл.-корр. РАРАН В.В. Зеленцова

В.В. Глазков, В.Б. Сучков, А.А. Кичигин, Ю.В. Каракулин

МГТУ им. Н.Э. Баумана

V.V. Glazkov, V.B. Suchkov, A.A. Kichigin, Y.V. Karakulin

Рассмотрена методика математического моделирования входного сигнала бортового радиолокационного датчика цели с линейной частотной модуляцией от сложной цели на основе ее многоточечной модели. Показана возможность оценки координаты срабатывания бортового радиолокационного датчика цели с линейной частотной модуляцией при заданных условиях встречи с целью. Приведены численные оценки вероятности срабатывания бортового радиолокационного датчика цели с линейной частотной модуляцией по истребителю F-22 Raptor.

Ключевые слова: бортовой радиолокационный датчик цели, линейная частотная модуляция, радиолокационная цель, многоточечная модель.

Method of mathematical modelling of input signal of onboard radar target sensor with linear frequency modulation from complex shape target on the basis of its multipoint model is considered. Possibility of estimation the operation coordinate of onboard radar sensor with linear frequency modulation at specified position of target is shown. Numerical estimates of the probability of operation an onboard radar sensor with linear frequency modulation for the F-22 Raptor fighter are given.

Keywords: onboard radar sensor, linear frequency modulation, radar target, multipoint model.

Значительное расширение условий применения современных средств поражения и боеприпасов в части зоны поражения (увеличивается диапазон условий встречи с целью как по скорости сближения, так и по углам встречи) и номенклатуры (самолеты, изготовленные по технологии Stealth, малоразмерные цели: противорадиолокационные ракеты, управляемые авиабомбы, управляемые ракеты, и др.) поражаемых целей приводит к необходимости уточнения

областей срабатывания бортового радиолокационного датчика цели (БРДЦ) для повышения эффективности средства поражения в целом. Соответственно актуальной остается проблема уточнения областей срабатывания БРДЦ по сложным аэродинамическим целям.

Общие вопросы работы БРДЦ с частотной модуляцией (ЧМ) хорошо освещены в [1, 2], однако в части определения координат срабатывания при работе по воздушным целям имеют свои

характерные особенности. Основной задачей большинства ЧМ систем является измерение параметров движения: высоты полета, скорости и т.д. [3–8]. В БРДЦ процесс измерения приобретает существенно дискретный характер, поэтому главной задачей становится фиксация факта достижения определенной дальности [9].

Известно [2], что в большинстве случаев измерения расстояния с помощью БРДЦ с ЧМ сигналов может производиться не непрерывно, а дискретно. Эта дискретность обуславливает постоянную погрешность, которая не зависит от дальности. Относительная величина этой постоянной погрешности при измерении больших расстояний незначительна, поэтому ее не учитывают. Однако с уменьшением дальности при измерении небольших расстояний с помощью ЧМ сигналов она может достигать десятков процентов. В условиях ближней локации дискретность интервалов измерения становится соизмеримой с самой дальностью между БРДЦ и целью. С учетом указанной специфики БРДЦ, возможна не только высокая погрешность измерения расстояния, но и возможен пропуск объекта на фиксируемом расстоянии. Эти особенности требуют особого подхода к выбору сигналов и их параметров, которые значительно влияют на принятие решения при срабатывании по воздушным целям.

Для анализа входных сигналов БРДЦ, возникает необходимость в определении взаимного расположения его антенны и аэродинамической цели на траектории ее движения [10].

Схема взаимного расположения БРДЦ и аэродинамической цели [10] представлена на рис. 1. Условия встречи БРДЦ и цели задаются в относительной системе координат (ОСК), которая привязывается к треугольнику скоростей [10]. Траектория относительного движения в общем случае образуется из совокупности отдельных дискретных кадров, каждый из которых характеризуется координатами условной точки цели в ОСК. В ОСК носитель БРДЦ считается неподвижным, а воздушная цель находится в движении относительно БРДЦ.

Для оценки входного сигнала БРДЦ разработана многоточечная модель воздушной цели [11], адаптированная к расчету входного сигнала БРДЦ ЧМ. При этом использована методика создания многоточечной модели радиолокационной цели в ближней зоне локации на основе методов физической теории дифракции. Для этого используется представление многоточечной модели цели в виде набора локальных точек P_m , $m = 1 \dots N_m$. На этапе формирования многоточечной модели для каждой локальной точки цели вычисляется пространственная диаграмма эффективной площади рассеяния (ЭПР) в сферической

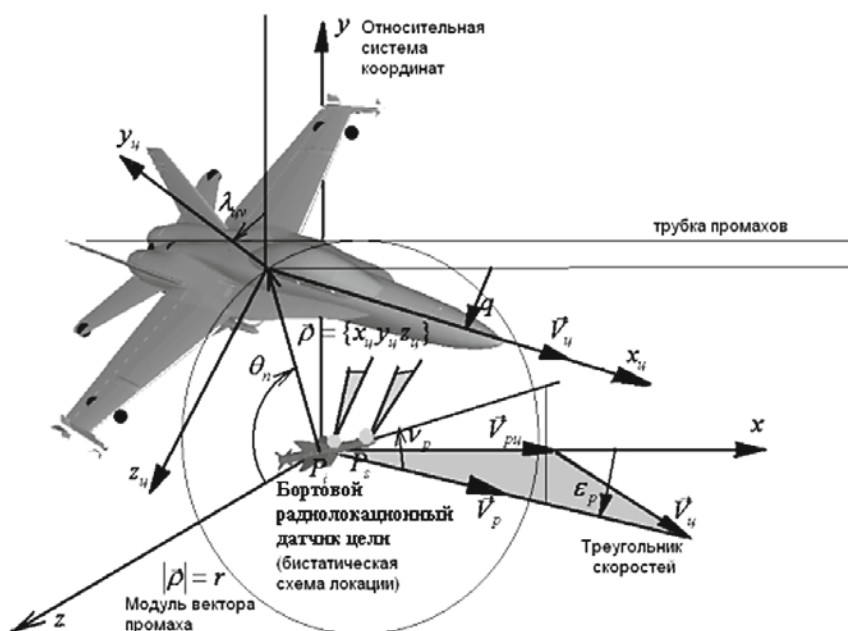


Рис. 1. Схема взаимного расположения БРДЦ и цели в относительной системе координат

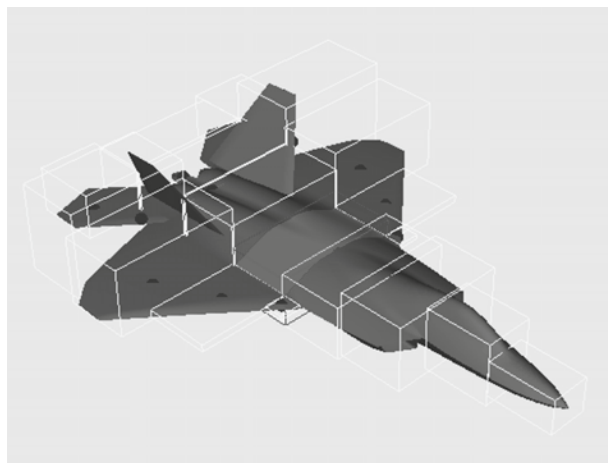


Рис. 2. Многоточечная модель истребителя F-22 Raptor

системе координат локального отражателя (X_m, Y_m, Z_m) .

В результате формирования многоточечной модели для каждого локального отражателя формируется двумерный массив значений ЭПР в локальной системе координат $\sigma_{i,j} = \sigma(\alpha, \beta)$. Каждый из массивов ЭПР сохраняется в текстовых файлах, которые являются исходными данными для многоточечной модели цели.

На рис. 2, 3 приведена многоточечная модель истребителя F-22 Raptor в X-диапазоне радиоволн с изображением пространственной диаграммы ЭПР одной из точек.

Стандартная структурная БРДЦ с частотно-модулированным (ЧМ) сигналом приведена на рис. 4. Модуляционное напряжение u_m поступает на вход генератора управляемым напряжением (ГУН).

На выходе ГУН формируется высокочастотный (ВЧ) сигнал, частота которого изменяется пропорционально модуляционному напряжению. ВЧ сигнал излучается в пространство с помощью передающей антенны $A_{\text{пер}}$. При этом часть сигнала, через направленный ответвитель, поступает на вход смесителя приемной части. Излученный ВЧ отражается от цели и попадает в приемную антенну $A_{\text{пр}}$. Далее отраженный сигнал усиливается в малошумящем усилителе (МШУ) и поступает на смеситель.

В результате воздействия на смеситель двух напряжений опорного и отраженного, закон изменения частоты которого сдвинут на время запаздывания τ , формируется сигнал разностной

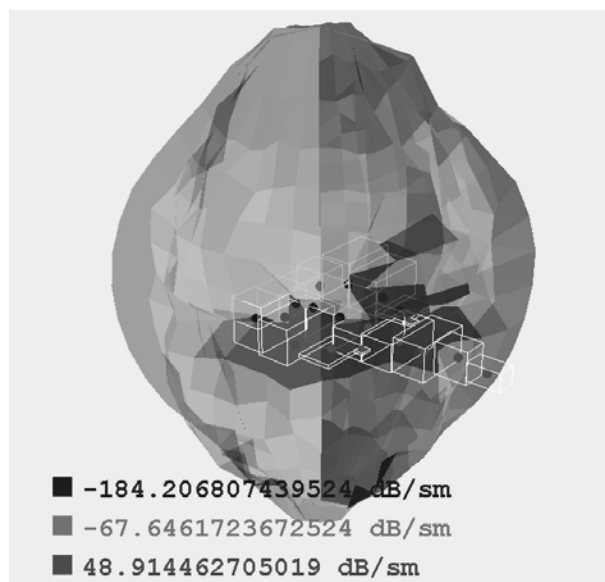


Рис. 3. Пространственная диаграмма ЭПР одной из точек многоточечной модели истребителя F-22 Raptor в X-диапазоне

частоты, который содержит информацию о цели, в том числе и о расстоянии до нее.

При периодическом модуляционном напряжении, сигнал разностной частоты на выходе смесителя будет состоять только из гармоник кратных частоте модуляции F_m смещенных на частоту Доплера F_d :

$$e(t) = E_c \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos[2\pi(mF_m + F_d)t + \Phi_m],$$

где E_c — амплитуда сигнала; A_m и Φ_m — амплитуды и начальные фазы гармоник с частотами

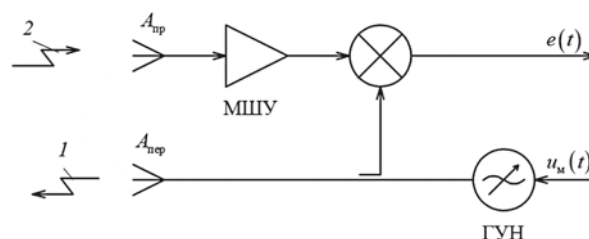


Рис. 4. Структура СВЧ модуля БРДЦ:
1 — полезный сигнал; 2 — паразитный сигнал просачивания; $u_m(t)$ — модулирующее напряжение; $e(t)$ — сигнал разностной частоты; МШУ — малошумящий усилитель; ГУН — генератор управляемый напряжением

$mF_m + F_d$ соответственно; F_m — модуляционная частота; F_d — частота Доплера.

Ключевым параметром БРДЦ с ЧМ является девиация частоты Δf . Она зависит от крутизны характеристики ГУН и размаха модуляционного напряжения. Девиация частоты определяет разрешающую способность ЧМ БРДЦ по дальности:

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta f},$$

где c — скорость света.

Амплитуды гармоник A_m зависят от расстояния до цели, девиации частоты и характера модуляционного напряжения. При использовании в качестве модуляционного напряжения несимметричного пилообразного сигнала зависимость амплитуд гармоник от расстояния до цели R выглядит следующим образом:

$$A_m = \frac{\sin[\pi(R/\Delta R - m)]}{\pi(R/\Delta R - m)}.$$

Мощность m -й гармоники достигает максимума на расстоянии $R_m = m\Delta R = m_c/(2\Delta f)$.

Зависимость мощности гармоники от расстояния обладает признаками функции селекции по дальности, и выделяя с помощью фильтра одну или нескольких гармоник сигнала разностной частоты можно сформировать функцию селекции по дальности с высокой крутизной.

При использовании в работе ЧМ БРДЦ двух гармоник, функция селекции представляет собой отношение мощности гармоники с номером $m + 1$ к мощности гармоники с номером m :

$$S = \frac{P_{m+1}}{P_m} = \frac{\left\{ \frac{\sin[\pi(R/\Delta R - (m+1))]}{\pi(R/\Delta R - (m+1))} \right\}^2}{\left\{ \frac{\sin[\pi(R/\Delta R - m)]}{\pi(R/\Delta R - m)} \right\}^2}.$$

Расстояние срабатывания определяется точкой равенства мощностей гармоник, то есть равенством единице функции селекции:

$$R_{cp} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\Delta R = \left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{c}{2\Delta f}.$$

Для выработки команды срабатывания БРДЦ с ЧМ можно воспользоваться следующим алгоритмом:

- из сигнала разностной частоты с помощью двух узкополосных фильтров выделяются две гармоники с номером m и $m + 1$;
- оценивается их мощность P_m и P_{m+1} ;
- отношение мощностей P_{m+1} и P_m сравнивается с порогом $P_{пор}$: $S = P_{m+1}/P_m > P_{пор}$;
- при выполнении неравенства устанавливается флаг предварительного срабатывания;
- после установления флага предварительного срабатывания отношение мощностей P_{m+1} и P_m сравнивается с единицей: $S = P_{m+1}/P_m < 1$;
- при выполнении неравенства и установленном флаге предварительного срабатывания вырабатывается команда срабатывания.

В случае если цель представляет собой протяженный объект, для расчета и моделирования входных сигналов БРДЦ, цель рассматривается как совокупность элементарных отражателей (ЭО). Каждый ЭО обладает своими пространственными координатами и значением ЭПР. При этом каждый ЭО независимо формирует отраженный сигнал, а затем, в приемнике отраженные от ЭО сигналы суммируются.

Рассмотрим применение алгоритма срабатывания для БРДЦ с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) на примере многоточечной модели самолета F-22 при его пролете относительно БРДЦ при встречном курсе на промахе $r = 3$ м.

Диапазон координаты центра цели задавался в пределах значений $X = \{20 \dots -5\}$ м. При расчетах предполагалось, что БРДЦ должен срабатывать на расстоянии $R_{cp} = 5$ м при работе по двум гармоникам. В качестве рабочих гармоник были выбраны значения $m = 3$ и $m + 1 = 4$. Для обеспечения срабатывания на расстоянии $R_{cp} = 5$ м девиация частоты вычислялась по формуле:

$$\Delta f = c(m + 0,5)/2R_{cp} = 105 \text{ МГц},$$

где $m = 3$, c — скорость света.

Тогда разрешающая способность БНДЦ с ЛЧМ составляет: $\Delta R = c/2\Delta f = 1,4$ м.

Результирующий коэффициент рассеяния объекта от воздействия многоточечной цели в ближней зоне локации, определяется следующим образом:

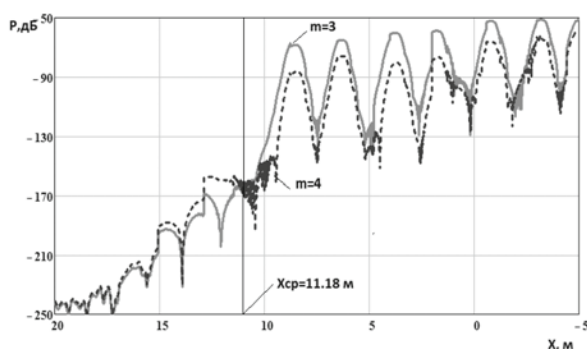


Рис. 5. Зависимость мощности входного сигнала БРДЦ от самолета F-22 на промахе $r = 3$ м
сплошная кривая — $m=3$;
штриховая кривая — $m = 4$

$$\dot{\Sigma}_i^s(m) = \sum_{j=0}^{N_s-1} F_{ij} F_{sj} \dot{\rho}_{sj} \frac{\exp(ikR_{ij})}{R_{ij} \cdot R_{sj}} \times \frac{\sin(\pi(R_{sj} / \Delta R - m))}{\pi(R_{sj} / \Delta R - m)},$$

$\dot{\rho}_{sj}$ — комплексный коэффициент отражения j -го отражателя (точки).

Тогда мощность входного сигнала БРДЦ с ЛЧМ с учетом функции селекции будет вычисляться на основе следующего соотношения:

$$P(m) = \frac{P_i D_i D_s \lambda^2}{4\pi^2} |\dot{\Sigma}_i^s(m)|^2,$$

где m — номер рабочей гармоники.

Зависимости мощности входного сигнала БРДЦ в X-диапазоне частот на гармониках $m = 3$ и $m = 4$ с шагом по координате x равным $dx = \Delta R/20 = 0,071$ м для самолета F-22 приведены на рис. 5.

При определении координаты срабатывания использовался алгоритм с двумя гармониками ($m = 3$ и $m = 4$), когда пороговое значение было задано $P_{\text{пор}} = 2$. В соответствии с рис. 5 координата срабатывания БРДЦ при таком пороговом значении составила $X_{\text{ср}} = 11,18$ м. Схема взаимного расположения БРДЦ и самолета F-22 в момент срабатывания приведена на рис. 6.

К достоинствам разработанного алгоритма можно отнести отсутствие зависимости точки срабатывания от порога и принимаемой мощности, отсутствие зависимости порога сраба-

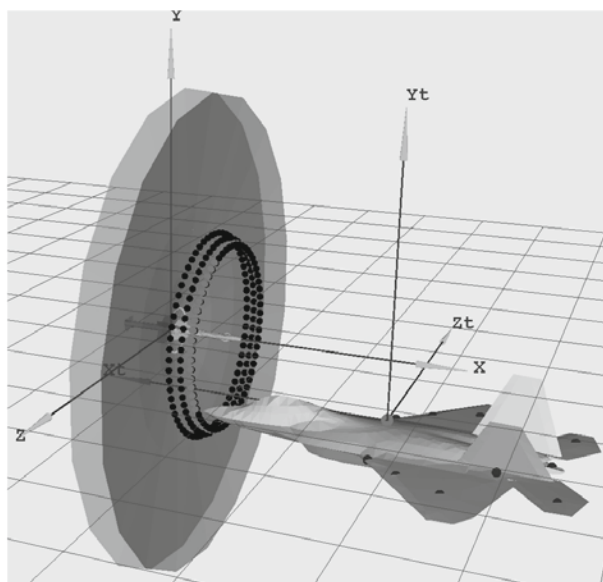


Рис. 6. Схема взаимного расположения БРДЦ и самолета F-22 в точке срабатывания БРДЦ при $X_{\text{ср}} = 11,18$ м

тывания от мощности принимаемого сигнала (порог в данном алгоритме выбирается в диапазон от 2 до 10 в зависимости от шума приемника), к недостаткам — более сложная аппаратная реализация по сравнению с одноканальной системой.

В программе имитационного моделирования вероятность срабатывания БРДЦ с ЧМ определяется как отношение числа срабатываний $N_{\text{сраб}}$ БРДЦ к общему числу пролетов цели $N_{\text{тр}}$ относительно БРДЦ:

$$P_{\text{сраб}} = \frac{N_{\text{сраб}}}{N_{\text{тр}}}.$$

Предполагается, что величина промаха r распределена по рэлеевскому закону, который выражается в виде следующего соотношения:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right),$$

где σ_r — среднеквадратичное отклонение (СКО) промаха.

При заданных выше параметра ЧМ БРДЦ была проведена оценка вероятности срабатывания ЧМ БРДЦ, когда количество пролетов цели относительно ЧМ БРДЦ при значении $\sigma_r = 3$ м задавалось равным $N_{\text{тр}} = 100$. По результатам

имитационного моделирования по самолету F-22 вероятность срабатывания ЧМ БРДЦ при пороговом значении $P_{\text{пор}} = 2$ для алгоритма двух гармоник составила $P_{\text{сраб}} = 0,94$.

Таким образом, показана возможность определения входного сигнала БРДЦ с ЛЧМ на основе многоточечной модели цели и разработан алгоритм срабатывания БРДЦ с учетом функций селекции по дальности. Разработанная методика оценки вероятности срабатывания ЧМ БРДЦ позволит проводить оценку эффективности технических решений БРДЦ перспективных типов боеприпасов.

Список источников

1. Коган И.М. Ближняя радиолокация. М.: Сов. радио, 1973. 272 с.
2. Климашев Б.М., Петров И.П. Устройства ближней локации с непрерывными сигналами. Куйбышев: Куйбышевский политехнический институт им. В.В. Куйбышева, 1974. 52 с.
3. Айбатов Л.Р. Непрерывный рефлектометр с линейной частотной модуляцией интенсивности зондирующего излучения // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7, № 4. С. 32–40.
4. Карманов Ю.Т., Поваляев С.В. Характеристики радиолокационных дальномеров с ЛЧМ-зондирующими сигналами, синтезированными по цифровой технологии DDS // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. Т. 14, № 1. С. 14–22.
5. Голик А.М., Шишов Ю.А., Заседателев А.Н. и др. Измерительные системы на основе частотных радиолокаторов ближнего действия // Вестник метролога. 2021. № 2. С. 3–10.
6. Замуруев С.Н., Легкий Т.Н. Радиолокационные системы с частотно-модулированным сигналом // Естественные и технические науки. 2020. № 9 (147). С. 166–168.
7. Радиолокационное устройство фиксации дальности с частотной модуляцией: пат. № 2379701 Рос. Федерация. № 2008127674/09; заявл. 07.07.2008; опубл. 20.01.2010. Бюл. № 2. 7 с.
8. Радиовзрыватель с линейной частотной модуляцией сигнала: пат. № 2708765 Рос. Федерация. № 2019125627; заявл. 14.08.2019; опубл. 11.12.2019. Бюл. № 35. 7 с.
9. Кичигин А.А., Шахтарин Б.И. Алгоритм обработки сигнала в автономном устройстве фиксации высоты // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2016. № 3(108). С. 13–23.
10. Борзов А.Б., Лихоеденко К.П., Муратов И.В. и др. Определение области принятия решений бортового радиолокационного датчика цели // Журнал радиоэлектроники. 2009. № 10. С. 1–13.
11. Борзов А.Б. и др. Математическая модель входных сигналов импульсных радиовзрывателей на основе многоточечной модели цели // Оборонная техника. 2009. № 1–2. С. 27–36.