

УДК 621.396.96+621.452.32

ЧАСТОТНЫЕ СПЕКТРЫ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ САМОЛЕТОВ С ТУРБОРЕАКТИВНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

СЛЮСАРЬ Н. М.

*Военная академия Республики Беларусь
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Рассматриваются частотные спектры и спектрально-временные структуры радиолокационных сигналов сантиметрового диапазона волн, отраженных от самолетов с турбореактивными двигателями.

Abstract. Frequency spectra and spectral-temporal structures are considered radar signals of the centimeter range of waves reflected from aircraft with turbojet engines.

Доплеровские сигнатуры и в целом динамические радиолокационные характеристики (ДРЛХ) воздушных объектов представляют интерес для теории и практики радиолокации с точки зрения решения задач радиолокационного обнаружения, сопровождения, распознавания целей, наведения управляемого оружия, а также снижения их радиолокационной заметности [1 – 6].

В докладе рассматриваются частотные спектры и спектрально-временные структуры радиолокационных сигналов сантиметрового диапазона волн, отраженных от самолетов с турбореактивными двигателями (ТРД).

Результаты получены в ходе натуральных экспериментов в полигонных условиях при полетах самолетов с существенными изменениями режимов работы двигателей. Рис. 1 иллюстрирует спектрально-временную структуру квадратурной составляющей комплексной огибающей реального радиолокационного сигнала с выхода приемного устройства РЛС 5Н62В при наблюдении самолета МиГ-21 на этапе его выхода из режима пикирования. Рабочие колеса первой и второй ступеней компрессора находятся на одной оси, имеют числа лопаток $N_1 = 24$, $N_2 = 53$ и вращаются с изменяющейся частотой $F_B(t)$.

Сопровождение цели осуществляется по «основной» («планерной») спектральной составляющей отраженного сигнала. Спектр сигнала преобразован на «нулевую» промежуточную частоту, так что «планерная» составляющая находится в начале оси частот и затем подавляется за счет спада АЧХ устройства преобразования сигнала в области частот ниже 50 Гц. Приведенный на рис. 1 фрагмент спектрограммы хорошо согласуется с ожидаемой структурой спектра и ее динамикой. Отчетливо видно, что структура спектра соответствует геометрическим параметрам ротора компрессора (числам лопаток первой ($N_1 = 24$) и второй ($N_2 = 53$) ступеней), а также кинематическому параметру – мгновенному (текущему) значению частоты вращения ротора $F_B(t)$. Наиболее интенсивная составляющая имеет частоту $N_1 F_B(t)$. Частотные траектории спектральных составляющих $F_K(t) = \kappa F_B(t)$, где $\kappa = 1, 2, 3, \dots$ – номер гармоники частоты вращения ротора, полностью отображают динамику этого ротора и режима работы двигателя сопровождаемой цели.

Частоты спектральных составляющих кратны частоте вращения ротора двигателя $F_B(t)$. Интенсивные составляющие соответствуют частотам первой $N_1 F_B(t)$ и второй $2N_1 F_B(t)$ гармоник частоты следования лопаток первого рабочего колеса.

Комбинационные частоты представлены, прежде всего, 5-й ($\kappa = 5 = N_2 - 2N_1$), 10-й ($\kappa = 10 = 2N_2 - 4N_1$), 19-й ($\kappa = 19 = 3N_1 - N_2$), 29-й ($\kappa = 29 = N_2 - N_1$) гармониками частоты вращения ротора двигателя $F_B(t)$.

На рис.2 представлена спектрально-временная структура квадратурной составляющей комплексной огибающей радиолокационного сигнала в полосе частот до 10 кГц при наблюдении самолета Як-28.

В отличие от самолета МиГ-21 этот самолет имеет два двигателя аналогичной конструкции ($N_1 = 24$, $N_2 = 53$). Каждый из двигателей формирует независимые сигналы аналогичной спектрально-временной структуры в соответствии с числами лопаток роторов компрессоров и частотами их вращения $F_B^{(1)}$ и $F_B^{(2)}$, где верхний индекс означает условный номер двигателя. Двигатели работают

несинхронно, что позволяет наблюдать траектории частот составляющих отдельно для каждого двигателя.

Следует обратить внимание на то, что комбинации частот составляющих от различных двигателей отсутствуют (по крайней мере, не наблюдаются). Этот факт подтверждает принятую при формировании модели отраженного сигнала гипотезу о независимом формировании сигналов каждым из двигателей цели и представлении результирующего сигнала суперпозицией частных сигналов.

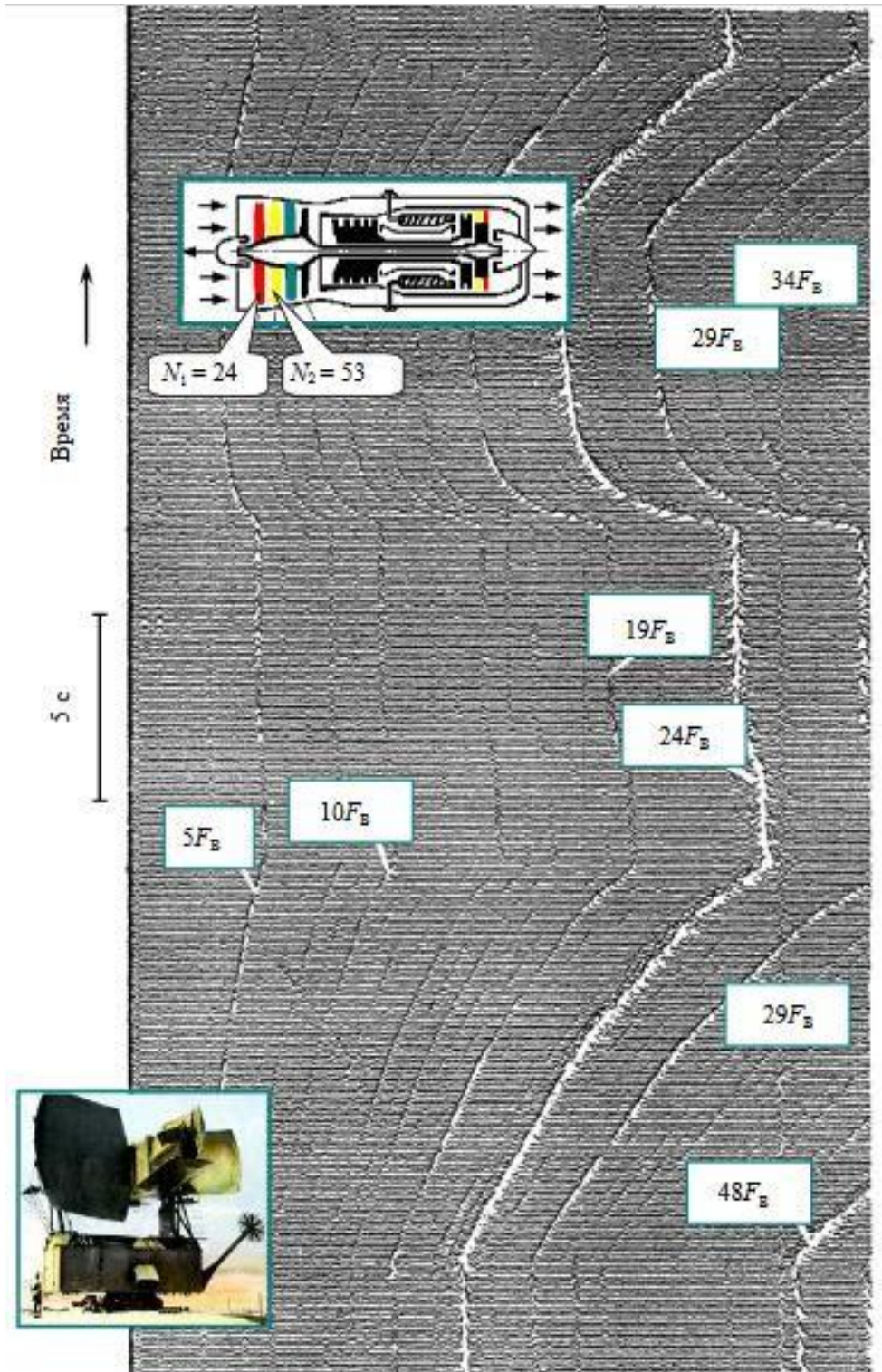


Рис. 1. Динамика спектра отраженного сигнала при выходе самолета МиГ-21 из пикирования

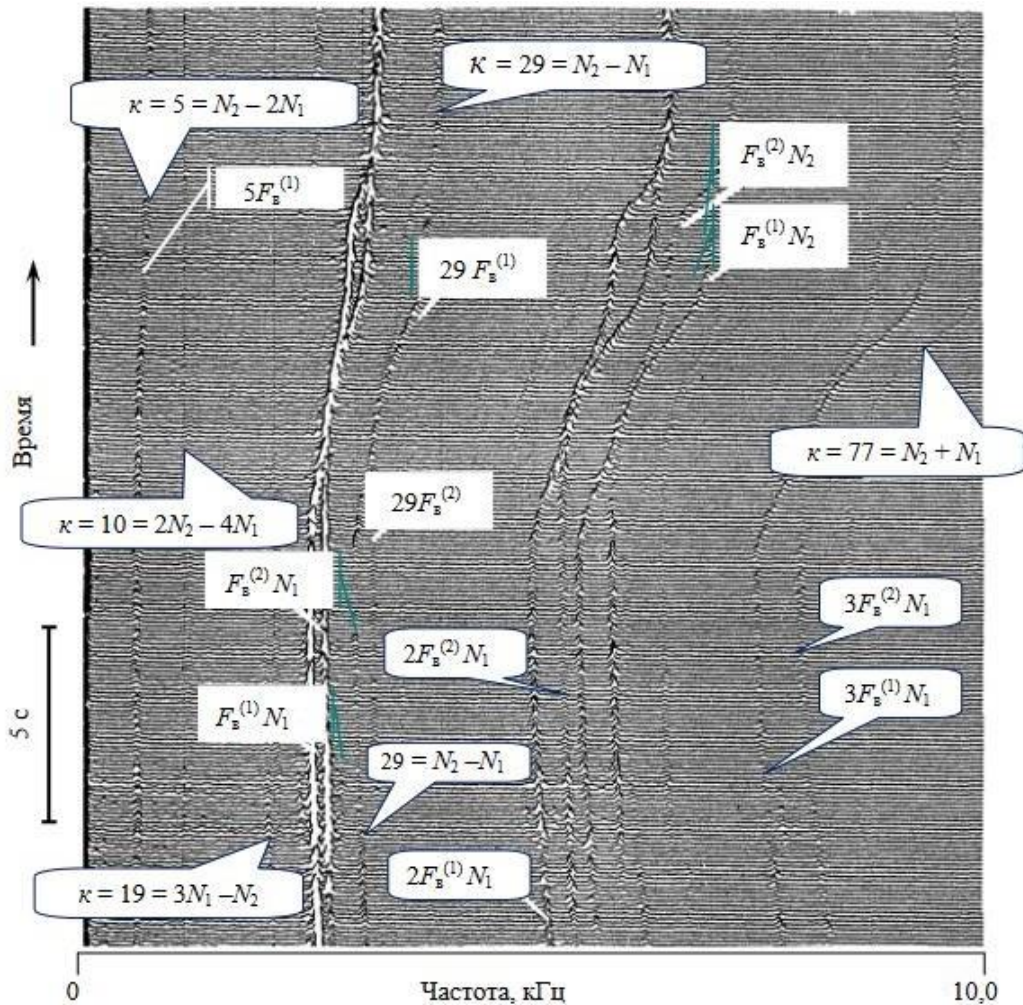


Рис. 2. Динамика спектра сигнала, отраженного от самолета Як-28

Кроме того, следует учесть, что каналы воздухозаборников двигателей на этих самолетах принципиально различны и по форме, и по длине, но это не сказалось на основных принципах формирования структуры спектров частот отраженных сигналов.

Напомним, что здесь представлены результаты спектрального анализа квадратурной составляющей комплексной огибающей отраженного сигнала. Спектр частот $f_k(t)$ отраженного сигнала от самолета в полете определяется частотой зондирующего сигнала f_0 , доплеровским сдвигом частоты $F_{дс}(t)$ и частотой вращения ротора двигателя $F_B(t)$:

$$f_k(t) = f_0 + F_{дс}(t) + \kappa F_B(t) ,$$

где

$$F_{дс}(t) = -\frac{2V_r(t)f_0}{c} = -\frac{2V_r(t)}{\lambda}$$

$\kappa = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ – номер гармоники частоты вращения ротора двигателя;

$V_r(t)$ – радиальная составляющая скорости самолета;

λ – длина волны зондирующего сигнала.

Значению $\kappa = 0$ соответствует сигнал, отраженный от планера (фюзеляжа) самолета.

В обобщенном виде спектральная структура отраженного от самолета с ТРД сигнала и ее основные закономерности представлены на рис. 3.

Спектральная структура принятых сигналов на промежуточной частоте, которая больше ширины спектра отраженного сигнала, аналогична структуре отраженного сигнала. В этом случае спектр принятого сигнала в полосе обзора (с учетом разрешающей способности по частоте)

отличается от спектра отраженного сигнала лишь смещением на промежуточную частоту без наложения боковых полос.

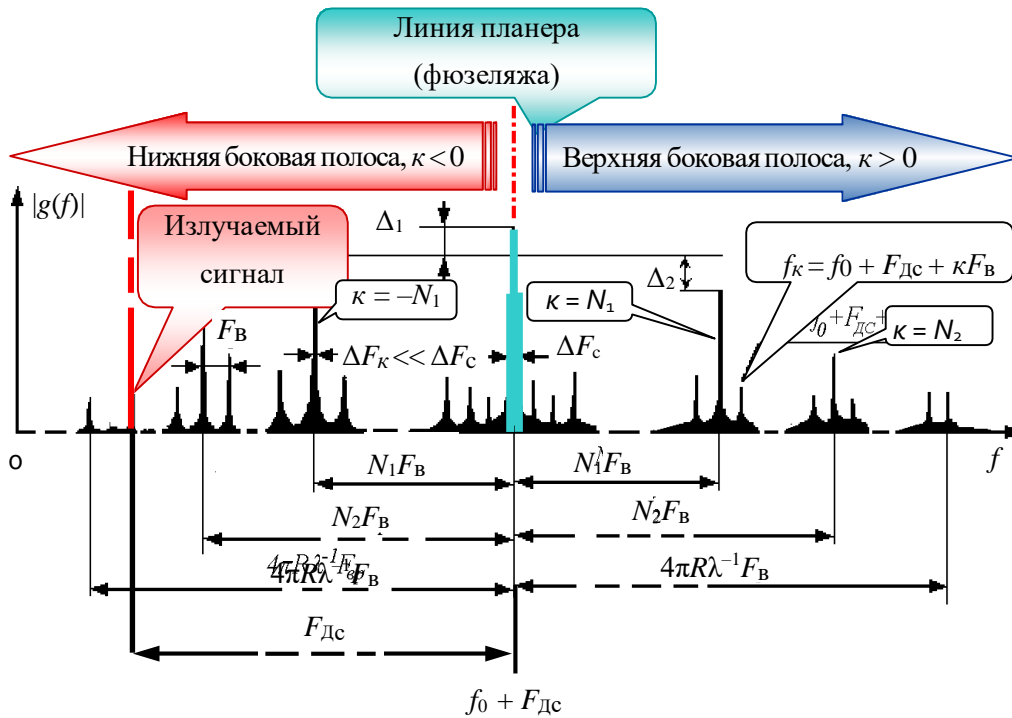


Рис. 3. Спектральная структура сигнала, отраженного от самолета с ТРД

В качестве иллюстрации на рис. 4 представлен амплитудно-частотный спектр принятого от приближающегося самолета Ту-16 сигнала на промежуточной частоте. Однако здесь эквивалентное значение частоты опорного сигнала (гетеродина)

$$f_{оп}(t) = f_0 + F_{дс}(t) - F_{пч}$$

лежит в области нижней боковой полосы частот несколько ниже частоты зондирующего сигнала, так что значение $F_{пч}$ несколько превышает доплеровское смещение частоты $F_{дс}$ и имеется частичное (с учетом предварительной полосовой фильтрации) наложение в нижней боковой полосе частот.

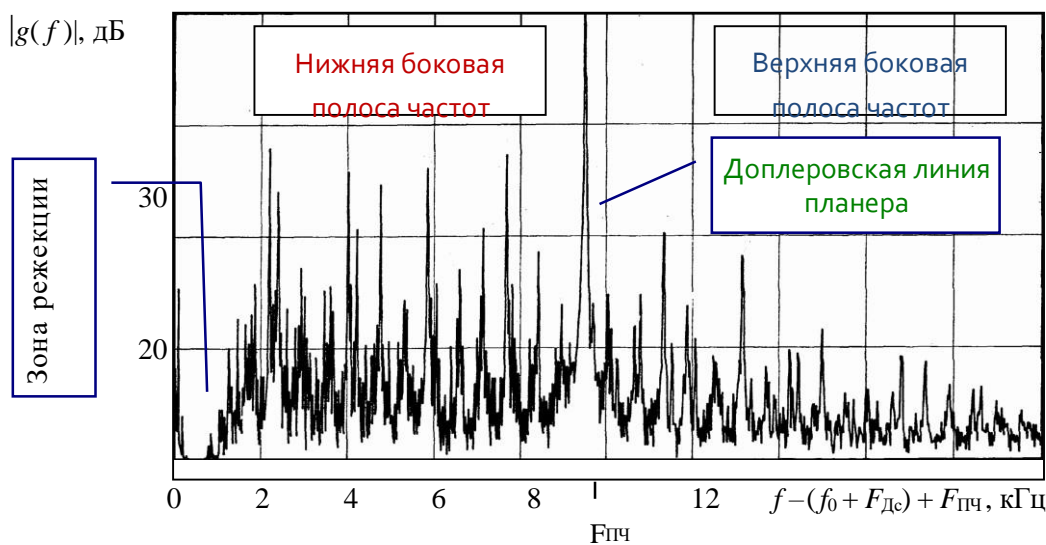


Рис. 4. Амплитудно-частотный спектр принятого от самолета Ту-16 сигнала на промежуточной частоте

На экранах индикаторов доплеровских РЛС отображаются результаты спектрального анализа принятых сигналов на промежуточной частоте, которая больше ширины спектра отраженного сигнала, и наложение составляющих полностью отсутствует. Фотография экрана доплеровской РЛС представлена на рис. 5.

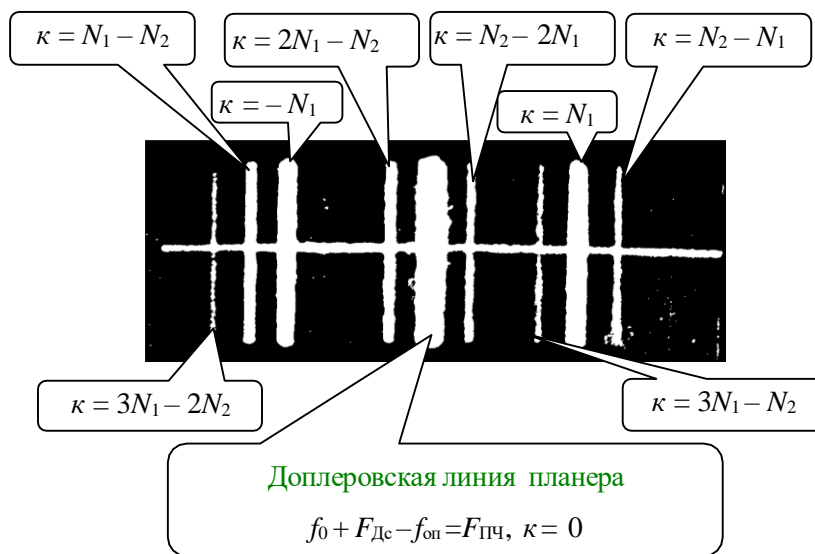


Рис. 5. Вид экрана доплеровской РЛС при сопровождении самолета МиГ-21

Горизонтальная развертка соответствует полосе доплеровских частот 18 кГц. (Частота возрастает слева направо, разрешающая способность по частоте равна 200 Гц.) Указаны номера гармоник частоты вращения. Середине развертки соответствует планерная составляющая доплеровского спектра ($\kappa = 0$).

Вращающиеся лопастные структуры ТРД, участвующие в формировании поля вторичного излучения, оказывают существенное влияние на отражательные свойства, динамические радиолокационные характеристики самолетов. Частотные спектры отраженных сигналов самолетов с ТРД в сантиметровом диапазоне волн определяются числами лопаток и частотами вращения рабочих колес компрессоров (при наблюдении с передней полусферы) и турбин (при наблюдении с задней полусферы) и несут информацию о технических, конструктивных характеристиках и текущих режимах работы ТРД.

Список использованных источников

1. Слюсарь Н. М. Радиолокационное распознавание, контроль действий и состояний целей с использованием эффекта вторичной модуляции: первые разработки и внедрения // Наука и военная безопасность. – 2004. – № 2. – С. 36 – 40.
2. Слюсарь Н. М. Вторичная модуляция радиолокационных сигналов динамическими объектами. – Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2006. – 173 с.
3. Слюсарь, Н. М. Рассеяние и вторичная модуляция радиолокационных сигналов динамическими объектами: моногр. / Н. М. Слюсарь. – Минск: ВА РБ, 2015. – 288 с.
4. Слюсарь Н. М. Эффект вторичной модуляции радиолокационных сигналов: теория и практика // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР (Минск, 18–19 марта 2014 года): материалы конф. В 2 ч. Ч. 1. – Минск: БГУИР, 2014. – С. 72–73.
5. Слюсарь Н. М. Эффект вторичной модуляции радиолокационных сигналов: мифы и реальность // 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2011. Сб. науч. трудов: материалы форума в 3-х томах. Том 1. Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». Ч. 1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2011. – С. 47–50.
6. Слюсарь Н. М. Динамические радиоволновые технологии в противовоздушной обороне и народном хозяйстве // Новости науки и технологий. – Минск: ГКНТ–ГУ «БелИСА». – 2005. – № 2(3). – С. 42–51.