

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА
АВТОНОМНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА****Введение**

В современных научно-технических приложениях радиолокации важное место занимают доплеровские устройства и системы автономной навигации [1], обеспечивающие измерение путевой скорости и угла сноса летательного аппарата (ЛА).

Достижение потенциальных возможностей по точности измерения путевой скорости ЛА автономными доплеровскими измерителями скорости (ДИС) связано прежде всего с выбором и обоснованием статистических моделей доплеровского сигнала, моделей помех, а также критериев качества функционирования ДИС [2].

Специфика функционирования реальных ДИС, устанавливаемых на ЛА предопределяет радиофизическое описание модели доплеровского сигнала в виде суммы сигналов, отражаемых элементами ограниченной по геометрическим размерам площади подстилающей поверхности [3]. При этом ограниченный участок поверхности можно интерпретировать в виде протяженной радиолокационной цели, а отражающие элементы – светящимися точками, порождающими статистически независимые элементарные сигналы.

Наблюдаемый на входе приемного устройства ДИС доплеровский сигнал в большинстве случаев представляется в виде модели узкополосного случайного процесса. Для анализа основных параметров таких сигналов применяется известный аппарат Гильберта [4]. Однако аналитические выражения для огибающей, полной фазы и мгновенной частоты, получаемые в соответствии с [4], оказываются сложными для выполнения различных теоретических расчетов и их использования при синтезе оптимальных и квазиоптимальных устройств измерения доплеровской частоты.

Целью выполненных в работе исследований является синтез статистической модели доплеровского сигнала, отражаемого ограниченным участком подстилающей поверхности, пригодной для создания оптимальных и квазиоптимальных устройств измерения частоты в ДИС на основе применения математического аппарата статистической теории обработки сигналов.

Изложение основного материала

Дадим геометрическую интерпретацию многоточечной модели доплеровского сигнала, порождаемого совокупностью светящихся точек, расположенных на ограниченном участке протяженной поверхности, облучаемой источником непрерывных гармонических колебаний, находящимся на борту ЛА, движущегося равномерно и прямолинейно с постоянной путевой скоростью W_7 . Полагаем известными размеры и форму облучаемой площадки, угол наклона диаграммы излучения зондирующего сигнала и ее угловые параметры. Рис.1 поясняет геометрическую структуру многоточечной протяженной радиолокационной цели, которой является ограниченный участок отражающей поверхности.

Здесь S – участок облучаемой поверхности; ГЦ – геометрический центр участка; СЦО – статистический центр отражения; β_0 – угол облучения в вертикальной плоскости; θ – угол облучения в горизонтальной плоскости; L – линейное смещение СЦО относительно ГЦ; α – ширина диаграммы направленности; H – высота полета.

При наличии множества светящихся точек (рис.1, б) возникает статистический центр отражения СЦО, смещенный относительно геометрического центра (ГЦ) площадки на расстояние L [3].

Координатное положение СЦО относительно центра площадки S зависит от соотношения амплитуд и фаз сигналов, порождаемых светящимися точками.

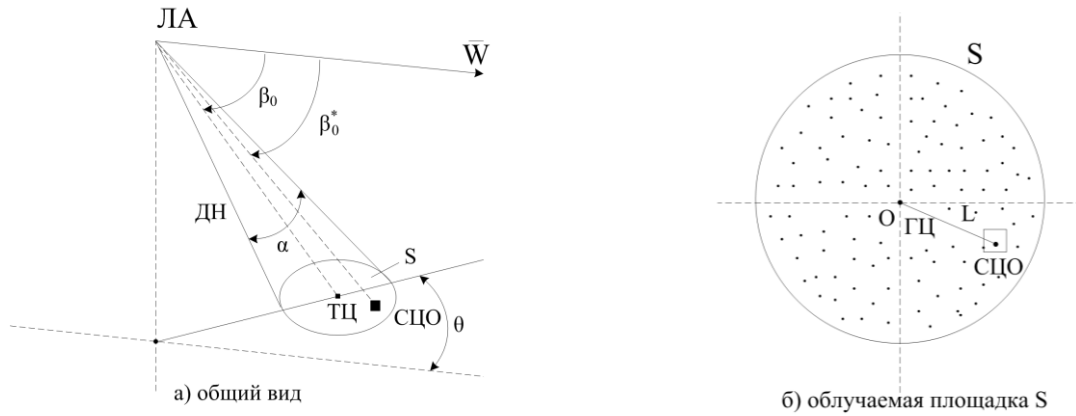


Рис. 1

При движении ЛА площадка S будет перемещаться по подстилающей поверхности также со скоростью \vec{W} . При этом будет меняться количество светящихся точек и дальности от каждой из них до ЛА случайным образом. В результате таких случайных изменений будет наблюдаться «блуждание» СЦО по освещаемой площадке S , вызывая флуктуации амплитуды и частоты суммарного сигнала, отражаемого освещенной площадкой. Эти флуктуации можно интерпретировать как сообщения $\lambda_a(t)$ и $\lambda_{\pm}(t)$, порождаемые источником, расположенным в точке СЦО, которые модулируют параметры источника – амплитуду и частоту, равную $f_0 + F_{\dot{A}}^*$.

При достаточно общих предположениях относительно статистических характеристик светящихся точек, отраженный сигнал и сообщения $\lambda_a(t)$ и $\lambda_{\pm}(t)$, все описанные выше радиофизические процессы можно представить в виде структурной схемы радиоканала передачи сообщений, как показано на рис. 2.

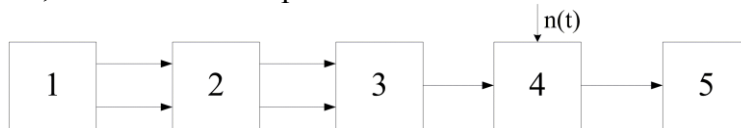


Рис. 2

Здесь 1 – источник сообщений $\lambda_a(t)$ и $\lambda_{\pm}(t)$; 2 – модулятор; 3 – сигнал переносчик $f_0 + F_{\dot{A}}^*$, f_0 – зондирующий сигнал, $F_{\dot{A}}^*$ – доплеровское смещение частоты зондирующего сигнала f_0 ; 4 – радиоканал; $n(t)$ – шум; 5 – приемник ДИС.

В основу последующего изложения материалов статьи положим, что объектом оптимальной обработки является аддитивная смесь сигнала – переносчика сообщения $S[\lambda(t), t]$ и помехи $n(t)$.

Тремя важными примерами сигналов при непрерывном наблюдении являются

$$S[\lambda(t), t] = \lambda(t), \quad (1)$$

$$S[t, \lambda_a(t)] = \sqrt{2}U_0 [1 + M_{\dot{A}} \lambda(t)] \sin \omega_u t, \quad (2)$$

$$S[t, \lambda_{\pm}(t)] = \sqrt{2}U_0 \sin \left\{ \omega_u t + M_{\dot{\pm}} \int \lambda(t) dt + \varphi(t) \right\}, \quad (3)$$

где $\sqrt{2}U_0$ и ω_u – амплитуда и частота сигнала; $M_{\dot{A}}$ – коэффициент глубины амплитудной модуляции; $M_{\dot{\pm}}$ – индекс частотной модуляции; $\varphi(t)$ – начальная фаза; $\omega_u = \omega_0 + F_{\dot{A}}^*$; ω_0 –

частота излучаемого сигнала; $F_{\ddot{A}}^*$ – среднее значение доплеровской частоты относительно углового направления β_0^* на СЦО;

$$F_{\ddot{A}}^* = \frac{2W}{\lambda} \cos \beta_0^*, \quad (4)$$

где λ – длина волны излучения

Полагая в формуле (4) скорость W (км/ч) и длину волны λ (см), получаем

$$F_{\ddot{A}}^* (\ddot{A}\ddot{o}) = 55,6 \frac{W}{\lambda} \cos \beta_0^*. \quad (5)$$

Ширину спектра доплеровского сигнала можно оценить по формуле

$$\Delta F_{\ddot{A}} \approx \frac{2W}{\lambda} \sin \beta_0 \Delta \beta_{0,5},$$

где $\Delta \beta_{0,5}$ – ширина двухсторонней (на передачу и прием) диаграммы направленности ДИС.

Относительная ширина доплеровского спектра при типовых значениях $\beta_0 = 70^\circ$ $\Delta \beta_{0,5} \approx 4 \div 5^\circ$ составит

$$\frac{\Delta F_{\ddot{A}}}{F_{\ddot{A}0}} = 0,1 \div 0,15,$$

т.е. доплеровский спектр узкополосен.

Задача синтеза для (1) соответствует фильтрации или оптимальной фильтрации. Для (2) и (3) соответствуют амплитудной и частотной модуляции.

Для случая совместной амплитудно-частотной обработки, когда амплитуда и частота радиосигнала модулируются случайными процессами $\lambda_a(t)$ и $\lambda_{\dot{a}}(t)$, коррелированными между собой, модель доплеровского сигнала может быть записана в аналитической форме:

$$S[(t, \lambda_a(t), \lambda_{\dot{a}}(t))] = \sqrt{2} U_0 [1 + M_a \lambda_a(t)] \sin[\omega_u t + M_{\dot{a}} \int_0^t \lambda_{\dot{a}}(\tau) d\tau + \varphi(t)]. \quad (6)$$

Конкретизируем математическое описание случайных процессов (сообщении) $\lambda_a(t)$ и $\lambda_{\dot{a}}(t)$, опираясь на статистические характеристики данных процессов, приведенные в [7]. В частности, при равномерном распределении флуктуаций фаз светящихся точек, амплитудное распределение суммарного сигнала подчиняется релеевскому закону, а распределение флуктуации фазы подчиняется равномерному закону. Тогда поведение $\lambda_a(t)$ и $\lambda_{\dot{a}}(t)$ удобно описать марковскими случайными процессами в виде стохастических дифференциальных уравнений:

$$\dot{\lambda}_a = -\alpha_1 \lambda_1 + \frac{N_{01}}{4\lambda_1} + n_{01}(t), \quad (7)$$

$$\dot{\lambda}_{\dot{a}} = -\alpha_2 \lambda_2 + n_{02}(t), \quad (8)$$

$$\dot{\psi} = M_{\dot{a}} \lambda_{\dot{a}} + \dot{\varphi}(t), \quad \psi(t) = M_{\dot{a}} \int_0^t \lambda_{\dot{a}}(\tau) d\tau + \varphi(t),$$

$$\dot{\varphi} = n_{\varphi}(t).$$

Здесь λ_1 и λ_2 – величины обратные интервалу корреляции амплитудных τ_a и частотных $\tau_{\dot{\varphi}}$ флуктуаций, $n_{01}(t)$ и $n_{02}(t)$ нормальные белые шумы с нулевым математическим ожиданием и дельта функцией корреляции; $N_{01}(t)$ и $N_{02}(t)$ спектральная плотность мощности.

Величина взаимной корреляции между $n_{01}(t)$ и $n_{02}(t)$ определяется соотношением

$$B_{n_{01}, n_{02}}(\tau) = k \frac{\sqrt{N_{01}N_{02}}}{2} \delta(\tau), \quad 0 \leq k \leq 1. \quad (9)$$

Имитационная модель доплеровского сигнала (6) представлена на рис.3.

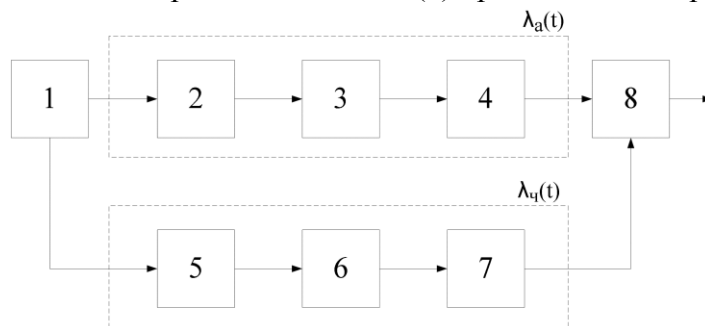


Рис. 3

В состав имитатора входят: 1 – генератор шума; 2 – резонансный контур; 3 – детектор огибающей; 4, 5 – фильтр нижних частот; 6 – частотно-модулированный генератор; 7 – резонансный фильтр; 8 – амплитудный модулятор.

Формирование сообщения $\lambda_a(t)$, соответствующее реллевскому распределению амплитуды осуществляется следующим образом. Шумовое напряжение с выхода 1 поступает на резонансный фильтр 2, далее осуществляется детектирование огибающей амплитудным детектором 3 и низкочастотная фильтрация 4. В результате формируется случайный процесс $\lambda_a(t)$, соответствующий стохастическому уравнению (7). Формирование сообщения $\lambda_2(t)$, соответствующее равномерному распределению фазы осуществляется следующим образом. Шумовое напряжение с выхода 1 поступает на фильтр низких частот 5, далее выходное напряжение 5 модулирует по частоте ЧМ-генератор 6 на выходе которого включен резонансный фильтр с заданной частотной характеристикой, например, прямоугольной, гауссовской или любой другой.

Результаты компьютерного моделирования

1. Задаем плотность вероятности распределений мгновенных значений амплитуды релеевским распределением

$$P(A) = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right), \quad \sigma^2 = \frac{N_0}{4\alpha_1},$$

где A – амплитуда; α_1 – затухание; N_0 – спектральная плотность мощности «белого» шума.

Исходные данные:

- генератор шума $N_0 = 10^{-9}, 10^{-12}$, $A = 1B$;
- параметры резонансного контура (рис. 3) $f_0 = 5$ кГц, $\alpha_1 = 0,01; 0,02$;
- полоса пропускания $\Delta f_{0,7} = 50 \text{ \AA}, 100 \text{ \AA}$;
- параметры ФНЧ1: частота среза $f_c = 100 \text{ \AA}, 200 \text{ \AA}$.

2. Формируем спектр доплеровского сигнала с частотной характеристикой, соответствующей гауссовской (аналогично реализованной в приборе ГЧ-53):

$$F^2(f) = A^2 e^{[-(f-f_0)^2/\Delta f^2]},$$

где f_0 – средняя частота контура, или ЧМ генератора; Δf – полоса пропускания или девиация частоты ЧМ генератора; A^2 – квадрат амплитуды.

Среднеквадратическая частота этого спектра

$$f_{CK}^2 = \int_0^{\infty} f^2 F^2(f) df / \int_0^{\infty} F^2(f) df .$$

Исходные данные:

- параметры ФНЧ2: Частота среза $f_c = 500 \text{ \AA} \ddot{o}, 1 \hat{e} \tilde{\text{A}} \ddot{o}$;
- средняя частота ЧМ генератора $f_0 = 5 \hat{e} \tilde{\text{A}} \ddot{o}$;
- девиация частоты $\beta = \frac{\Delta f}{f_0} = 0,1; 0,2$;
- резонансный фильтр $f_0 = 5 \hat{e} \tilde{\text{A}} \ddot{o}$;
- полоса $\Delta f = 500 \text{ \AA} \ddot{o}, 1 \hat{e} \tilde{\text{A}} \ddot{o}$;
- огибающая амплитудно-частотной характеристики $\sqrt{F^2(f)}$.

Графические зависимости результатов моделирования схемы 3 изображены на рис.4.

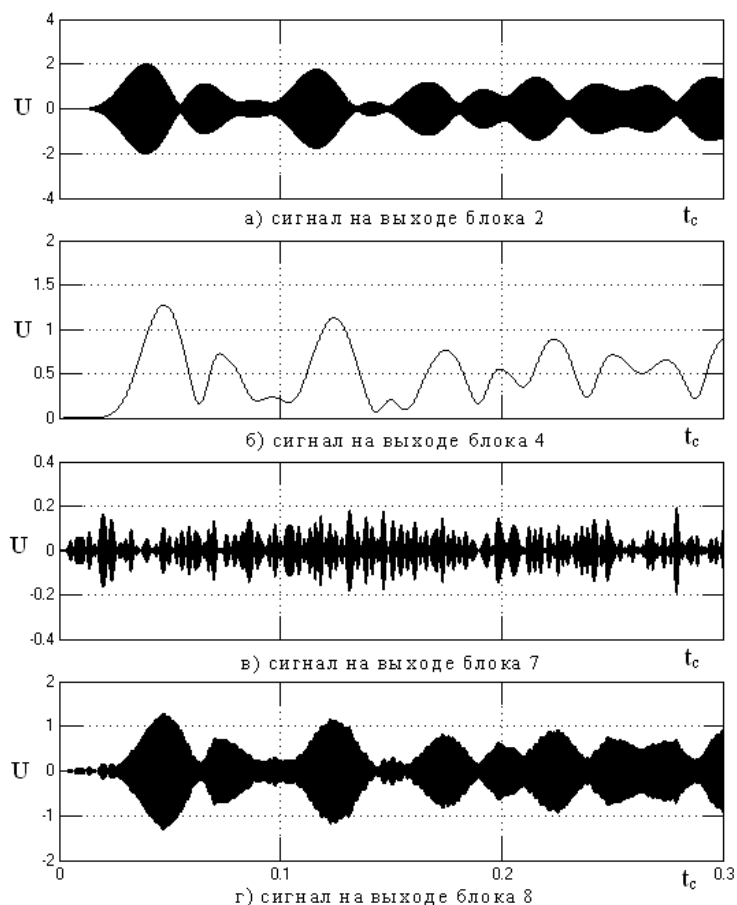


Рис. 4

На рис. 5 – 7 представлены частотная характеристика низкочастотного фильтра модели (фильтр Баттерворда), аналитический спектр выходного сигнала модели и аналитический

спектр на выходе амплитудного модулятора. Спектральный анализ проводился на основе быстрого преобразования Фурье.

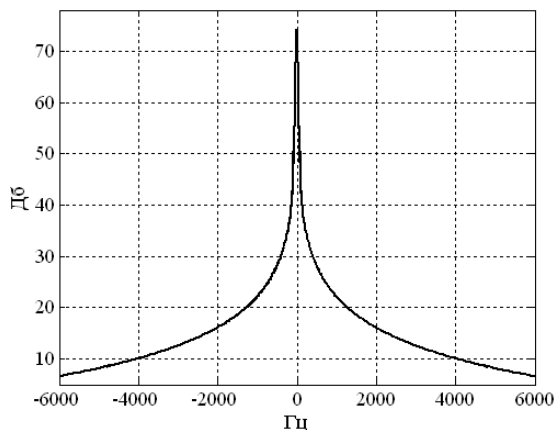


Рис. 5

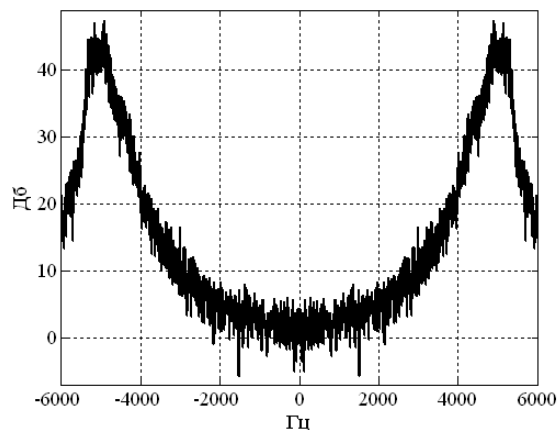


Рис. 6

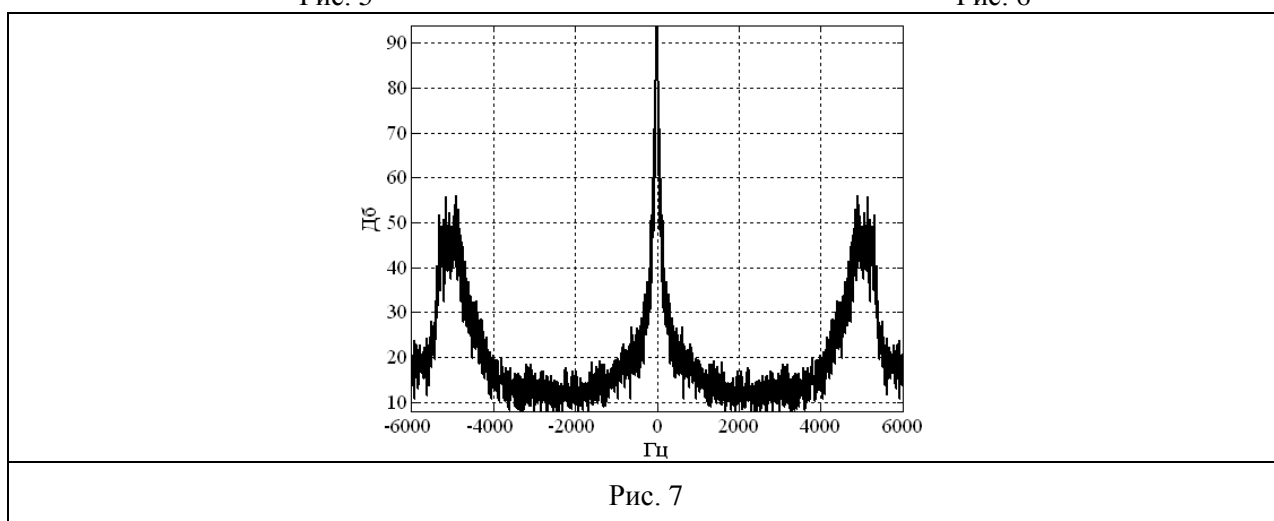


Рис. 7

Выводы

1. На базе радиофизического представления доплеровского сигнала создаваемого подстилающей поверхностью при ее зондировании с борта ЛА синтезирована математическая модель отраженного сигнала, которая представляет собой случайный процесс с амплитудной модуляцией огибающей и частотной модуляцией несущей.

2. Разработана имитационная модель синтезированного сигнала, в которой учтены статистические свойства огибающей в виде релейского сигнала и статистические свойства частотно-модулированного колебания соответствующего узкополосному процессу с равномерно распределенной фазой.

3. Выполнено компьютерное моделирование в соответствии с выбранными исходными данными и их статистическими характеристиками соответствующими п. 2.

4. Синтезированная модель зондирующего сигнала позволяет использовать методы оптимальной обработки хорошо разработанной статистической теории радиотехнических систем и на ее основе синтезировать оптимальную структуру обработки отраженного доплеровского сигнала.

5. Из компьютерного моделирования следует, что результирующий доплеровский сигнал модулирован по амплитуде, а спектр соответствует выбранным параметрам формируемого частотно-модулированного сигнала заданного параметрами его моделирования.

Список литературы: 1. *Колчинский, В.Е.* Доплеровские устройства и системы навигации / В.Е. Колчинский, И.А. Мандуровский, М.И. Константиновский. – М. : Сов. радио, 1975. – 432 с. 2. *Фалькович, С.Е.* Основы статистической теории радиотехнических систем / С.Е. Фалькович, П.Ю. Костенко : учеб. пособие. – Х. : ХАИ, 2005. – 390 с. 3. *Островитянов, Р.В.* Статистическая теория радиолокации протяженных целей / Р.В. Островитянов, Ф.А. Басалов. – М. : Радио и связь, 1982. – 232 с. 4. *Баскаков, С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. – М. : Высш. шк., 1988. – 448 с. 5. *Фомин, А.Ф.* Аналоговые и цифровые синхронно-фазовые измерители и демодуляторы / А.Ф. Фомин, А.И. Шелухин. – М. : Радио и связь, 1987. – 248 с. 6. *Кулемин, Г.П.* Статистические характеристики радиолокационных целей / Г.П. Кулемин, В.Б. Разсковский. 7. *Тихонов, В.И.* Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов / В.И. Тихонов, Н.К. Кульман. – М. : Сов. радио, 1975. – 704 с.

*Национальный аэрокосмический университет
имени Н.Е. Жуковского «ХАИ»,
Житомирский военный институт
Национального авиационного университета*

Поступила в редколлегию 13.04.2014