

ФЛУКТУАЦИИ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ПОЧВЫ С МАЛЫХ ВЫСОТ

Исследование спектральных характеристик сигналов, отраженных от поверхности суши имеет давнюю историю [1 – 3] и представляет значительный интерес для многих приложений. Однако опубликованные работы связаны, в первую очередь, с дистанционным зондированием поверхности суши с борта аэрокосмических носителей [2, 4], когда размеры неоднородностей существенно меньше расстояния до радара. В то же время, для ряда практических применений представляют интерес свойства отраженных сигналов при зондировании с предельно малых высот, которые соизмеримы с размерами неровностей почвы.

В частности, для повышения эффективности сельскохозяйственного транспорта, весьма актуально применение доплеровских измерителей скорости (ДИС) для определения абсолютной скорости движения [5]. В частности, комбинируя показания ДИС с данными традиционного спидометра, можно вычислить, так называемый, коэффициент проскальзывания за счет пробуксовки колёс, величина которого в значительной мере определяет потребление горючего. С другой стороны, за счет проседания колес в почве, контактные датчики не обеспечивают требуемую точность измерения скорости, которая требуется для повышения эффективности при проведении посевных и поливных работ [5].

При этом использование радиоволн миллиметрового диапазона особенно актуально, так как позволяет существенно уменьшить массогабаритные характеристики ДИС и увеличить точность измерения на малых скоростях движения агрегата (<5 км/ч).

Однако малая высота расположения ДИС (<1 м), которая часто соизмерима с размерами неоднородностей подстилающей поверхности, приводит к существенному расширению спектра отраженных сигналов, по сравнению с зондированием с борта аэрокосмических носителей. При этом сложный характер движения агрегата (рыскание по курсу, галопирование и др.) приводит к нестационарному характеру отраженных сигналов, в связи с чем, разработка алгоритмов их обработки для измерения продольной составляющей скорости движения представляет значительный практический интерес.

Поэтому использование ранее полученных данных о рассеянии сигналов миллиметрового диапазона подстилающей поверхностью [6 – 8], возможно далеко не всегда, в связи с чем, в настоящей работе проведены исследования особенностей доплеровского спектра сигналов 8-миллиметрового диапазона, отраженных от грунта при движении радара на высотах ≈ 1 м.

Измерительный доплеровский радар

Для проведения экспериментальных исследований разработан и изготовлен измерительный доплеровский радар, работающий в режиме непрерывного излучения, который собран по гомодинной схеме – рис. 1. Генератор на лавинно-пролетном диоде (ЛПД) формирует излучение 8-миллиметрового диапазона мощностью $\cong 12$ мВт, которые подаются на дуплексное устройство в виде ферритового циркулятора (ФЦ). К прямому плечу ФЦ подключена рупорная антенна, ширина диаграммы направленности (ДН) которой по уровню – 3 дБ равна 10° , а отраженные от исследуемого объекта сигналы подаются через боковое плечо ФЦ на вход смесителя СВЧ (СМ), в качестве которого используется диод с барьером Шоттки (ДБШ). Просачивающиеся в боковом плече ФЦ сигналы генератора на ЛПД используются в качестве опорного напряжения для смесителя СВЧ, а напряжение доплеровской частоты усиливается с помощью усилителя доплеровских частот (УДЧ).

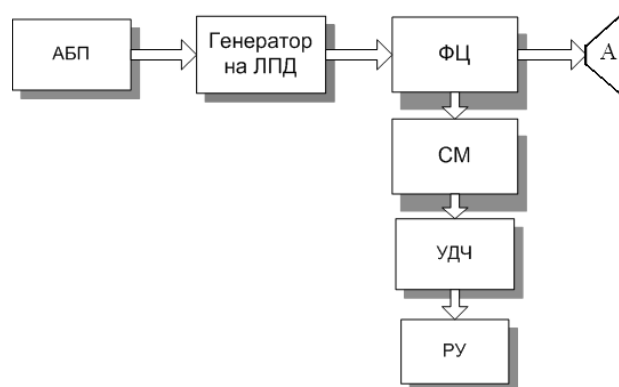


Рис. 1. Структурная схема приемопередатчика: ФЦ – ферритовый циркулятор, СМ – СВЧ смеситель, УДЧ – усилитель доплеровских частот, РУ – регистрирующее устройство, АБП – автономный блок питания, А – антенна

Выход усилителя соединен с регистрирующим устройством (РУ), которое обеспечивает запись сигналов с выхода радара в цифровом виде с частотой дискретизации 32 КГц. Приемопередатчик выполнен в виде отдельного блока – рис. 2, соединенного кабелем с блоком питания +24 В (потребляемый ток 0,2 А).

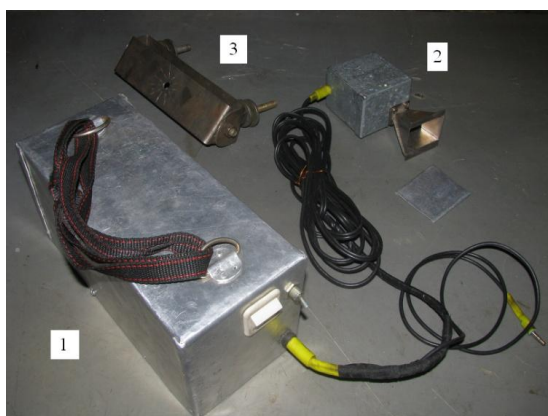
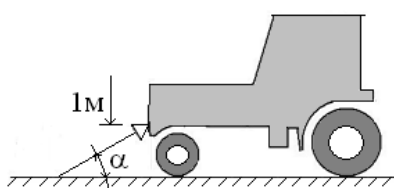


Рис. 2. Общий вид измерительного радара с устройством крепления:
1 –БП радара, 2- приемопередатчик, 3- крепежное устройство

При работе радар крепится в носовой части тракторного агрегата типа ЮМЗ на высоте $\cong 1$ м помощью специального устройства – рис. 3, а, угол наклона антенны отсчитывается от горизонтали и может принимать значения $\alpha=30^\circ$, 45° и 60° , причем ориентация плоскости поляризации рупорной антенны может устанавливаться вертикально или горизонтально, а расположение радара на тракторе при проведении измерений показано на рис. 3, б.



а



б

Рис. 3. Ориентация луча антенны – а; расположение радара на тракторе ЮМЗ – б

Обработка отраженных сигналов

Алгоритм обработки отраженных сигналов ДИС обычно основан на вычислении текущего среднего доплеровской частоты

$$\bar{f}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t dt' f(t'), \quad (1)$$

где T – время усреднения. В силу сложного характера движения агрегата, особенно при движении по пересеченной местности, амплитуда и частота отраженных сигналов модулированы по случайному закону. Так как характер движения, как показывают эксперименты, имеет нестационарный характер, то время усреднения не должно превышать интервал стационарности $T < T_c$. В рассматриваемом случае интервал стационарности определяется крупными неровностями почвы с характерным масштабом $\cong 10$ м, то при скорости движения 3 – 5 м/с время усреднения должно быть не более 2 – 3 с.

С другой стороны, если время усреднения существенно превышает интервал корреляции случайного процесса $T \gg \tau_k$ и корреляционная функция не является знакопеременной, то дисперсия оценки текущего среднего [9] имеет простой вид $D(\bar{f}) = 2D_0 \frac{1}{2\pi T \Delta f}$, где D_0 – дисперсия случайного процесса, а Δf – ширина спектра процесса на интервале локальной стационарности T_c . В этой связи исследование спектральных характеристик отраженных сигналов представляет значительный интерес, так как позволяет оценить статистические характеристики измеряемых величин.

Как показали результаты экспериментов, отраженные сигналы представляют собой широкополосный случайный процесс, временная структура которого – рис. 4, а и спектр на интервале усреднения – рис. 4, б имеют достаточно сложную структуру.

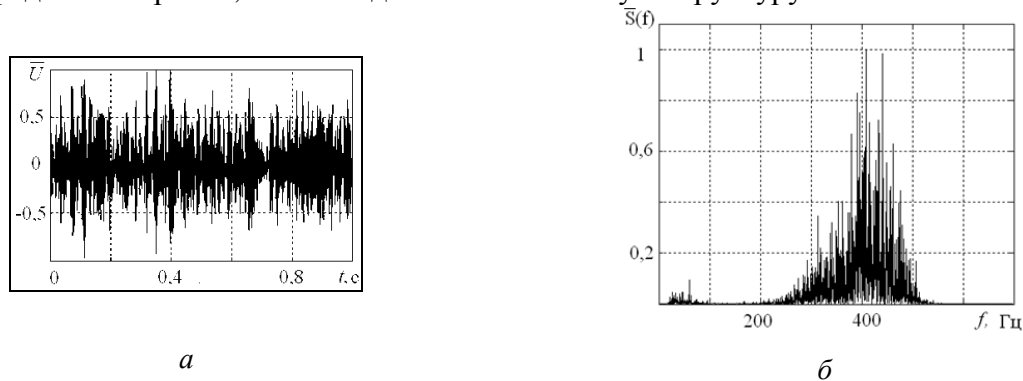


Рис. 4. Временная структура – а и спектр – б сигналов, отраженных от почвы

Поэтому для оценки дисперсии оценки частоты в работе используется, так называемый, 3D-спектр [10], который представляет собой последовательность кратковременных энергетических спектров, вычисленных в моменты времени t_n на малом интервале $t \in [t_n, t_n + \tau]$

$$S(\omega, t_n) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} dt W(t_n, t) U(t) e^{-j\omega t} \right|^2, \quad (2)$$

где $W(t_n, t)$ – функция временного “окна”, локализирующая энергию сигнала в окрестности точки $t = t_n$

$$W(t_n, t_n + \tau) = \begin{cases} W(t) & t \in t_n + \tau \\ 0 & t \notin t_n + \tau \end{cases} \quad (3)$$

Подобное представление отражает распределение энергии отраженного сигнала в плоскости “частота-время” (ω - t плоскость) в ячейках разрешения размером $\Delta\omega \cdot \tau$ – рис. 5, *a*, которое впервые предложено Д. Габором для распознавания речевых сигналов [11].

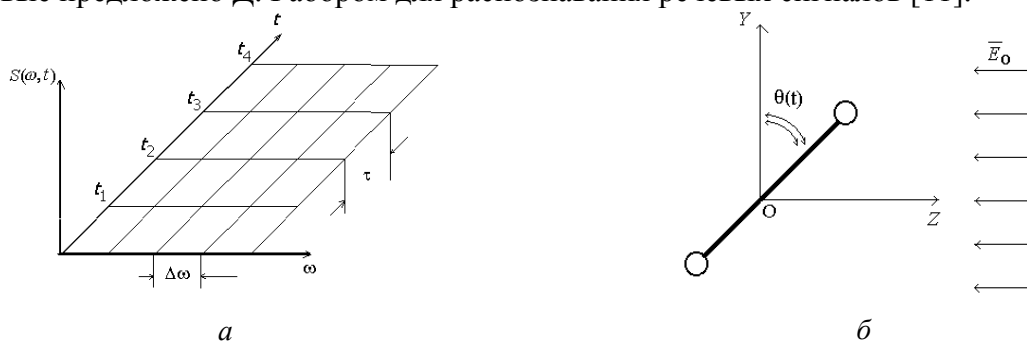


Рис. 5 Частотно-временная плоскость Габора – *a*, модель качающейся гантели – *б*

При вычислении 3D-спектра (2) полная реализация сигнала длительностью T разбивается на сумму $N = \text{Int}\left(\frac{T}{\tau}\right)$ псевдореализаций, каждая длительностью τ для смежных интервалов разбиения (алгоритм Уэлча).

Для оценки среднего значения скорости движения агрегата на интервале τ , рассмотрим энергетический центр тяжести (ЭЦТ) кратковременного энергетического спектра в виде отношения первых двух моментов кратковременного спектра [12]

$$E(t_n) = \frac{\int_0^{\infty} d\omega \omega S(t_n, \omega)}{\int_0^{\infty} d\omega S(t_n, \omega)} \quad (4)$$

В этом случае зависимость ЭЦТ от времени описывает распределение энергии отраженного сигнала в частотно-временной плоскости ω - t , что позволяет оценивать тонкую структуру изменения доплеровской частоты. Чтобы правильно выбрать длительность временного окна τ , рассмотрим модель сигнала, отраженного от жесткой гантели в виде двух точечных рассеивателей – рис. 5, *б*, которые движутся поступательно в направлении радара со скоростью V и одновременно совершают колебания вокруг оси OY по закону $\mathcal{G}(t) = \mathcal{G}_m \sin(\Omega_0 t)$.

На рис. 6, *a* приведены результаты вычисления спектра сигнала, отраженного от гантели для реализации длительностью $T=3$ с, (средняя частота Доплера $f_d=200$ Гц, частота качания $0,5$ Гц, девиация частоты отраженного сигнала $\Delta f=25$ Гц). Как показывает анализ, отраженный сигнал характеризуется глубокой амплитудной модуляцией (АМ) за счет интерференции сигнала от отдельных отражателей, а двугорбость спектра отражает характер движения гантели, обусловленный ее покачиванием (скорость изменения частоты минимальна в моменты времени, соответствующие экстремумам спектра – рис. 6, *a*, а время нахождения сигнала в соответствующем фильтре – максимально).

В то же время, двумерная обработка сигнала в плоскости “частота-время” позволяет существенно увеличить информативность спектральных характеристик отраженного сигнала. При этом длительность временного окна можно оценить исходя из очевидных физических соображений

$\frac{1}{f_{\min}} \ll \tau \ll \frac{1}{F_k}$, где f_{\min} – минимальная частота спектра отраженных сигналов, F_k – частота качания гантели. Для выбранных параметров рассматриваемой модели этому условию удовлетворяет среднегеометрическое значение длительности временного ок-

на $\tau_{\text{н\ddot{a}}} = \sqrt{\frac{1}{f_{\text{min}} \cdot F_k}} \cong 100 \text{ мс}$, а на рис. 6, б приведен вид нормированного 3D-спектра для рассматриваемого объекта.

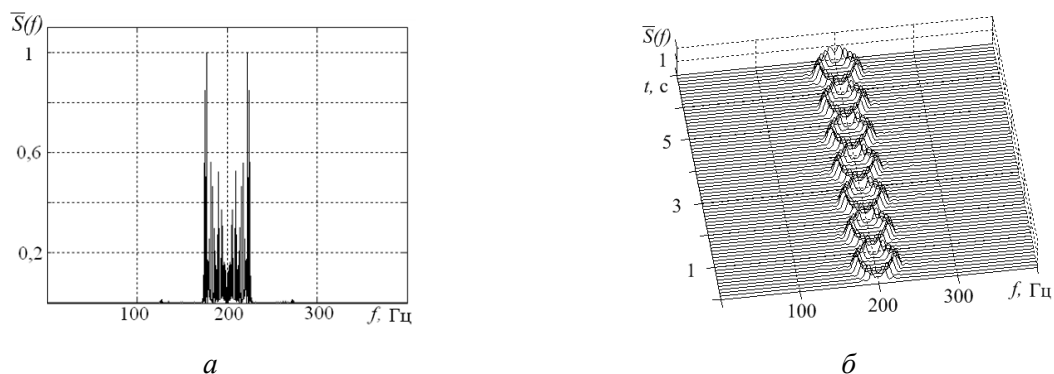


Рис. 6. Спектр сигналов, отраженных от гантели за время $T=3\text{с}$, – а; 3D-спектр для оптимальной длительности окна $\tau=0,1\text{с}$ – б

Выбор длительности окна существенно влияет на форму 3D-спектра. В частности, на рис. 7, а приведен вид спектра для окна малой длительности $\tau=0,02\text{с}$, когда высокая разрешающая способность по времени искажает частотную зависимость траектории 3D-спектра. На рис. 7, б показан вид спектра для окна большой длительности $\tau=1\text{с}$, где свивпирование частоты в пределах длительности окна приводит к характерным фазовым искажениям.

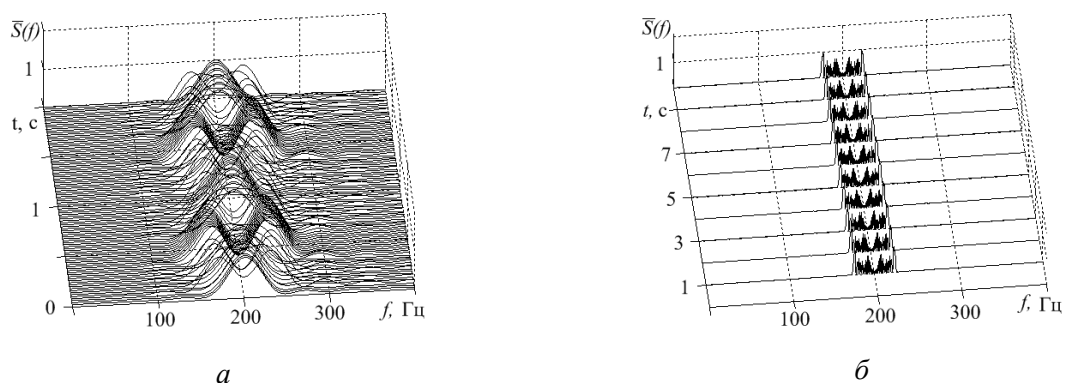


Рис. 7. Примеры 3D-спектра сигналов, отраженных от качающейся гантели при малой длительности окна $\tau=0,02\text{с}$ – а и при большой длительности $\tau=1\text{с}$ – б

Описанный подход позволяет также вычислить оценку траектории движения ЭЦТ в плоскости “частота-время” и на рис. 8 приведены результаты сравнения мгновенной частоты для модели отраженного сигнала (пунктир) и результаты вычисления ЭЦТ на периоде качания гантели (гладкая кривая) для указанного значения длительности окна. Прямая линия соответствует среднему значению скорости на длительности реализации сигнала $T = 3\text{с}$, которое незначительно отличается от истинного среднего значения $f_d = 200\text{ Гц}$ (относительная ошибка не превышает $\frac{\Delta f_c}{f_c} \leq 2,2\%$).

Несмотря на приближенную оценку длительности временного окна, точность вычисления траектории ЭЦТ и ее среднего значения оказывается достаточной для многих практических приложений.

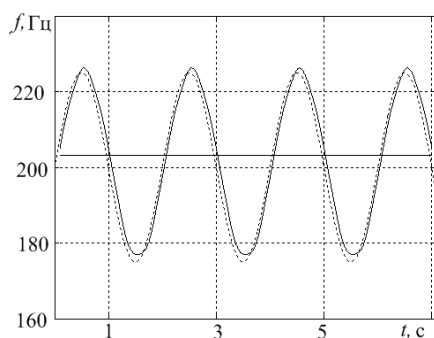


Рис. 7. Траектория движения ЭЦТ для модели сигнала

Результаты экспериментов

Измерения характеристик сигналов, отраженных от подстилающей поверхности при движении тракторного агрегата производились на вертикальной и горизонтальной поляризации излученного (принятого) сигнала для углов наклона антенны измерительного радара $\alpha=30^\circ, 45^\circ$ и 60° .

На рис. 4, б приведен пример спектра отраженных сигналов за время $T=3$ с и при движении агрегата по вспаханному полю (угол наклона антенны $\alpha=45^\circ$). Следует отметить наличие двух спектральных пиков в области низких доплеровских частот ($F_1 \cong 40$ Гц) и в области частот, которая соответствует скорости перемещения тракторного агрегата $F_2 = \frac{2V_r}{\lambda} \cos \alpha \cong 400$ Гц ($\alpha=45^\circ, \lambda=8,47$ мм, $V_r=8,64$ км/ч).

Для выяснения природы низкочастотной составляющей спектра измерялся энергетический спектр сигналов для неподвижного агрегата с работающим двигателем – рис. 8, который показывает, что низкочастотная часть спектра обусловлена вибрациями элементов конструкции. В частности, пик на частоте $F=27,85$ Гц соответствует лопастной частоте воздушного вентилятора двигателя (четвертая гармоника холостых оборотов при частоте вращения двигателя 417 об/мин).

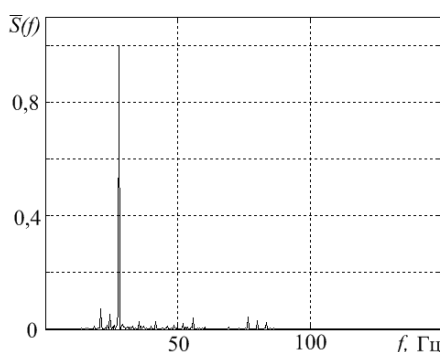


Рис. 8. Спектр сигналов ($T=3$ с), отраженных от почвы при неподвижном агрегате

Поэтому, чтобы исключить малоинформативные компоненты спектра, отраженные сигналы при дальнейшей обработке подвергались цифровой фильтрации с целью подавления низкочастотных участков спектра, обусловленных вибрацией элементов конструкции.

Необходимая длительность временного окна определялась с помощью критерия, введенного выше для модели сигналов, отраженных от гантели, и который в рассматриваемом

случае $\tau = \sqrt{\frac{1}{f_{\min} F_{\tilde{a}}}}$, где f_{\min} – минимальная частота спектра отраженных сигналов, F_r – частота галлопирования агрегата. Для минимальной частоты спектра $f_{\min} \cong 200$ Гц (рис. 4, б) и

при значении частоты $F_r \approx 0,5 \text{ Гц}$, длительность временного окна составляет $\tau \approx 100 \text{ мс}$, которая использовалась при дальнейшей обработке отраженных сигналов.

На рис. 9 приведен пример 3D-спектра для агрегата при движении по пахоте, причем угол наклона антенны (рис. 3) составлял $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ и 60° (рис. 9, *а, б* и *в* соответственно) для горизонтальной поляризации излучения.

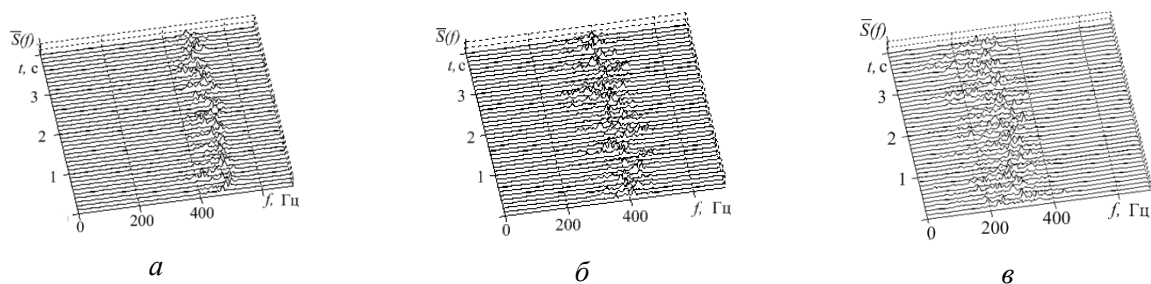


Рис. 9. Примеры 3D спектра отраженных сигналов при углах наклона антенны $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ и 60° (*а, б* и *в* соответственно) для горизонтальной поляризации излучения

На рис. 10 приведен аналогичный пример 3D-спектра для тех же значений угла наклона антенны (10, *а, б* и *в* соответственно) при вертикальной поляризации излучения.

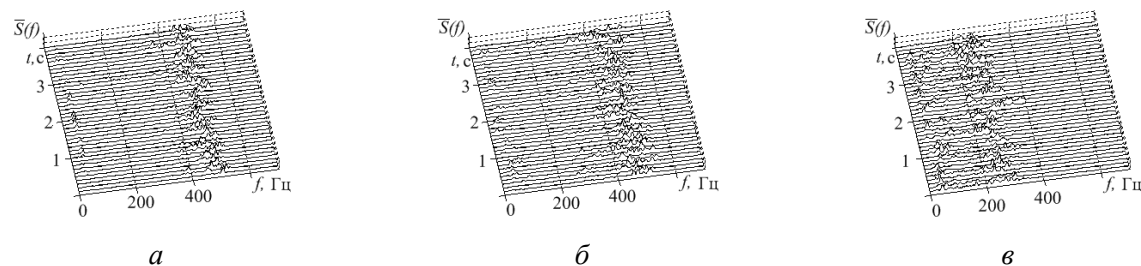


Рис. 10. Примеры 3D спектра отраженных сигналов при углах наклона антенны $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ и 60° (*а, б* и *в* соответственно) при вертикальной поляризации излучения

На рис. 11 показаны примеры рассчитанной траектории ЭЦТ в частотно-временной плоскости для угла наклона антенны $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ и 60° (11, *а, б* и *в* соответственно) при горизонтальной поляризации излучения, которые соответствуют 3D спектру на рис. 9, а на рис. 12 приведены аналогичные данные для траектории ЭЦТ при угле наклона антенны $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ и 60° (12, *а, б* и *в* соответственно) для вертикальной поляризации излучения и в соответствии с 3D спектром на рис. 10.

Как видно, угол наклона антенны влияет на статистические характеристики отраженных сигналов, в связи с чем, нами вычислялась зависимость коэффициентов вариации $VAR = \frac{\delta_{\text{ЭЦТ}}^2}{\bar{E}^2}$ ($\delta_{\text{ЭЦТ}}$ – среднеквадратичное отклонение ЭЦТ, \bar{E} – среднее значение ЭЦТ) от угла наклона антенны для ортогональных поляризаций излученных сигналов и для длительности реализации сигналов $T = 3 \text{ с}$ – рис. 13.

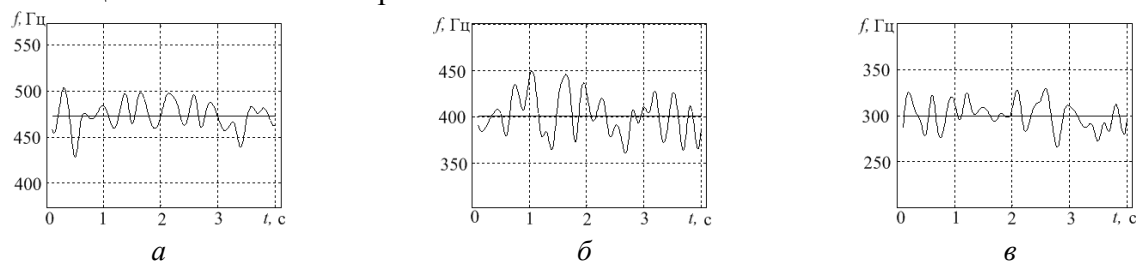


Рис. 11. Траектория ЭЦТ при горизонтальной поляризации сигналов (угол наклона антенны $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ и 60° (*а, б* и *в* соответственно), 3D спектр на рис. 9)

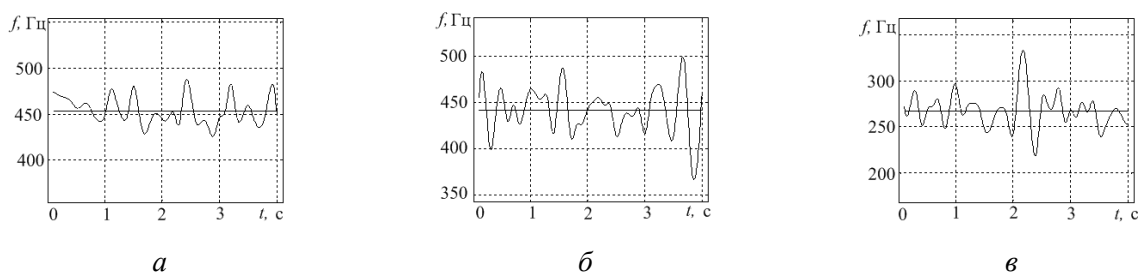


Рис. 12. Траектория ЭЦТ при вертикальной поляризации сигналов (угол наклона антенны $\alpha=30^\circ$, 45° и 60° (а, б и в соответственно, 3D спектр на рис. 10)

Как видно, коэффициент вариации растет с увеличением угла наклона антенны, что, возможно, связано с возрастанием влияния галлопирования агрегата (вертикальной составляющей скорости при движении на неровностях почвы) при больших углах визирования.

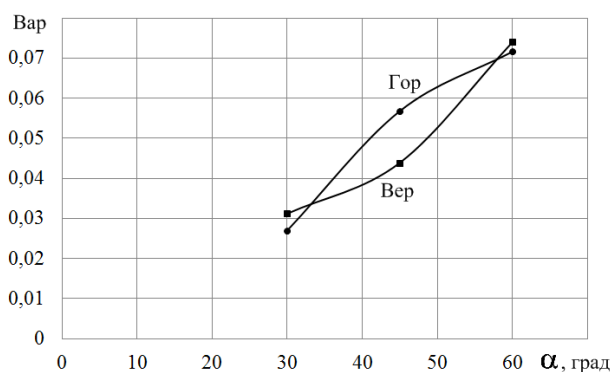


Рис. 13. Зависимость коэффициента вариации ЭЦТ от угла наклона антенны и поляризации излучаемого сигнала

Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработан и изготовлен измерительный когерентный радар 8-миллиметрового диапазона для исследований сигналов от подстилающей поверхности при зондировании с борта движущегося трактора.

2. Исследовано использование двумерной обработки широкополосных отраженных сигналов в плоскости “частота-время” в виде последовательности кратковременных спектров.

3. Предложен и исследован критерий выбора длительности временного окна для вычисления кратковременного спектра в виде $\tau = \sqrt{\frac{T}{f_{\min}}}$, где f_{\min} – минимальная частота спектра

отраженных сигналов, T – время локальной стационарности отраженных сигналов.

4. Проведены натурные исследования сигналов, отраженных от грунта при движении трактора и получены их статистические характеристики в результате двумерной обработки в частотно-временной области, в том числе: 3D-спектр, ЭЦТ и его коэффициент вариации.

5. Показано, что коэффициент вариации ЭЦТ растет с увеличением угла наклона антенны, что, по-видимому, связано с возрастанием влияния галлопирования агрегата (вертикальной составляющей движения на неровностях почвы) при больших углах визирования.

Список литературы: 1. *Зубкович С.Г.* Статистические характеристики радиосигналов отраженных от земной поверхности. – М.: Сов. радио, 1966. – 224 с. 2. *Kulemin G.P.* Millimeter-Wave Radar targets and Clutter. Artech House. – Boston, London. 2003, p. 327. 3. *David R. Barton.* Radar System Analysis and Modeling. Artech House, Boston, London. 1988, p. 546. 4. *Поманов А.А.* Радиофизические эффекты при

взаимодействии электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн с окружающей средой. Рассеивающие свойства растительных и почвенных покровов // Зарубежная электроника. – 1992. – № 11. – С.23-48. 5. Малорацкий Л. Г. Радарные измерители скорости машинно-тракторных агрегатов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1986. – №7. – С.84 -91. 6. Кулемин Г. П., Разказовский В. Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. – Киев : Наук. думка, 1987. – 232с. 7. Андреев Г.А., Потапов А.А. Миллиметровые волны в радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника. – 1984. – №11. – С.28-62. 8. Разказовский В.Б. Поле миллиметровых радиоволн над сушей при малых углах скольжения // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2000. – №3. – С.3-34. 9. Куликов Е.И. Методы измерения случайных процессов. – М. : Радио и связь, 1986. – 272 с. 10. Могилу А. А., Хлопов Г. И., Шестопалов В. П. Траекторный спектральный анализ // Радиотехника. – Харьков : Изд-во Харьк. ун-та. – 1989. – Вып.91. – С. 86-93. 11. Gabor D. Theory of Communication // J. IEE (London). – 1946. – Vol. 93, November. – P.429-457. 12. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения : пер. с англ. – М. : Мир, 1990. – 584с.

ИРЭ им. А.Я. Усикова НАНУ

Поступила в редколлегию 26.11.2013