

Об эффективности доплеровской селекции в коротковолновой части миллиметрового диапазона радиоволн

В. Г. Гутник, Л. И. Шарапов, В. Н. Горобец¹, Ю. В. Гончаренко¹

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: gutnik@rian.kharkov.ua*

*¹Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина
E-mail: ygonch@ire.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2008 г.

Проанализированы экспериментальные статистические характеристики помех, обусловленных обратным рассеянием радиоволн коротковолновой части миллиметрового диапазона растительностью. Основное внимание уделено сигналам, отраженным листовыми деревьями, имеющим большую интенсивность по сравнению с радиолокационными отражениями от других видов растительности. Показано, что для коротких времен наблюдения сигналы, отраженные листовыми деревьями, – статистически нестационарны. Для них получены модельные оценки эффективности устройств доплеровской селекции. Показано, что применение методов адаптивной фильтрации помех, с учетом их статистических характеристик, повышает эффективность этих устройств.

В последнее время наблюдается интенсивное использование радиоволн коротковолновой части миллиметрового диапазона (КВЧ ММД) в радиолокации и системах зондирования окружающей среды. Это обусловлено преимуществами систем КВЧ ММД перед системами более длинноволновых диапазонов: высоким пространственным разрешением (связанным с возможностью формирования узких диаграмм направленности антенны при небольших их габаритах и использованием коротких импульсов), возможностью обеспечения лучшей помехозащищенности и электромагнитной совместимости, а также высокой чувствительностью распространения коротких миллиметровых волн к изменению параметров атмосферы и подстилающей поверхности.

Одной из важных проблем современной радиолокации является обнаружение движущихся целей на фоне интенсивных пассивных

помех различного происхождения (отражений от подстилающих поверхностей, метеорообразований, облаков диполей и т. д.) В РЛС такую задачу решают с помощью устройств селекции движущихся целей (СДЦ), в которых используются различия в доплеровских скоростях помех и целей. Существенным моментом, связанным с повышением эффективности РЛС СДЦ, является как можно более точное определение статистических характеристик помех [1].

В работе [2] представлен обзор и анализ удельных эффективных площадей рассеяния (ЭПР) и энергетических спектров сигналов, отраженных от различных типов земных покровов, в том числе от деревьев и кустарников. В [3-5] приведены результаты экспериментальных исследований амплитудных и усредненных доплеровских спектров СВЧ сигналов, отраженных от растительности, а также

полученные методом моделирования зависимости ЭПР растительности от угла падения электромагнитной волны. Анализ приведенных в литературе данных показывает, что, во-первых, исследований в КВЧ ММД недостаточно, во-вторых, характеристики помех получены в предположении их стационарности и, наконец, теоретические и экспериментальные данные об энергетических спектрах в основном охватывают область частот от 0 Гц до частот не превышающих $100 \div 200$ Гц. В случае использования РЛС КВЧ ММД помехи могут быть неоднородными и нестационарными, а их спектр может охватывать область в несколько килогерц.

Поэтому целью настоящей работы является:

- 1) получение и анализ экспериментальных статистических характеристик помех, обусловленных отражениями от растительности в КВЧ ММД;
- 2) оценка влияния этих помех на эффективность устройств СДЦ.

Экспериментальные статистические характеристики помех

В Радиоастрономическом институте НАН Украины был разработан и создан макет когерентной РЛС непрерывного излучения с частотой 140 ГГц и нулевой промежуточной частотой. Подробное описание макета приведено в работе [6]. С его помощью были осуществлены экспериментальные исследования с целью получения и записи сигналов, рассеянных различными видами растительности, при разных скоростях ветра – от $1 \div 2$ до $7 \div 10$ м/с. Для оценки уровня отраженного сигнала использовался калибровочный отражатель – металлический шар диаметром 60 мм. На магнитную ленту записывались сигналы, отраженные от участков с различной растительностью: травой, кустарником, деревьями (вербой, березой). Дальность до них выбиралась в пределах от 60 до 120 м. Диаметр площадки, участвующей в формировании отраженного сигнала, при исследованиях отражений от деревьев определялся диаграммами направленности антенн и имел величину около 6.5 м.

Для травы и кустарника размеры отражающего пятна определялись геометрией трассы и были больше.

Предварительная обработка и анализ записанных данных показали, что средний уровень сигнала, отраженного от кустарника и травы, был на $10 \div 20$ дБ ниже, чем уровень сигнала, отраженного от лиственных деревьев. Нас интересовало в первую очередь влияние помех на эффективность устройств СДЦ. Поэтому при обработке и получении статистических характеристик выбирались помехи с более высоким уровнем, т. е. сигналы, отраженные от деревьев. При этом основное внимание уделялось получению энергетических доплеровских спектров для разных значений времени анализа, близких к времени обновления данных в реальных РЛС КВЧ ММД.

Следует отметить, что отраженный деревьями сигнал формируется большим количеством элементарных рассеивателей, каждый из которых имеет свою скорость перемещения, обусловленную ветром. Энергетические доплеровские спектры характеризуют распределение спектральной плотности мощности отраженного сигнала по скоростям, которое дает представление об интенсивности отраженных движущимися элементарными рассеивателями сигналов в зависимости от их радиальных скоростей. Радиальная скорость – это проекция скорости наблюдаемого объекта на линию, соединяющую РЛС и объект. Условно весь диапазон доплеровских частот (радиальных скоростей) энергетического доплеровского спектра можно разбить на две области: область низких частот, прилегающих к нулевой, – область малоподвижных рассеивателей – и область доплеровских частот выше некоторой частоты раздела – область скоростных рассеивателей (СР).

Анализ показал, что спектры, полученные за короткое время, порядка сотых – десятых долей секунды, имеют ряд особенностей. Основная особенность этих спектров – существенная изменчивость во времени их параметров: уровня спектральных составляющих, ширины полосы, формы. Характерно, что изменчивость параметров наблюдается на частотах выше частоты раздела,

равной 500 Гц, в спектральной области, соответствующей скоростным рассеивателям. В этой статье будут рассматриваться полученные энергетические доплеровские спектры на частотах выше 500 Гц в области частот, соответствующей СР с радиальными

ми скоростями отражателей больше 0.5 м/с. Примеры характерных энергетических доплеровских спектров сигналов, отраженных от берез при порывистом ветре до 5÷7 м/с, в разные моменты времени приведены на рис. 1.

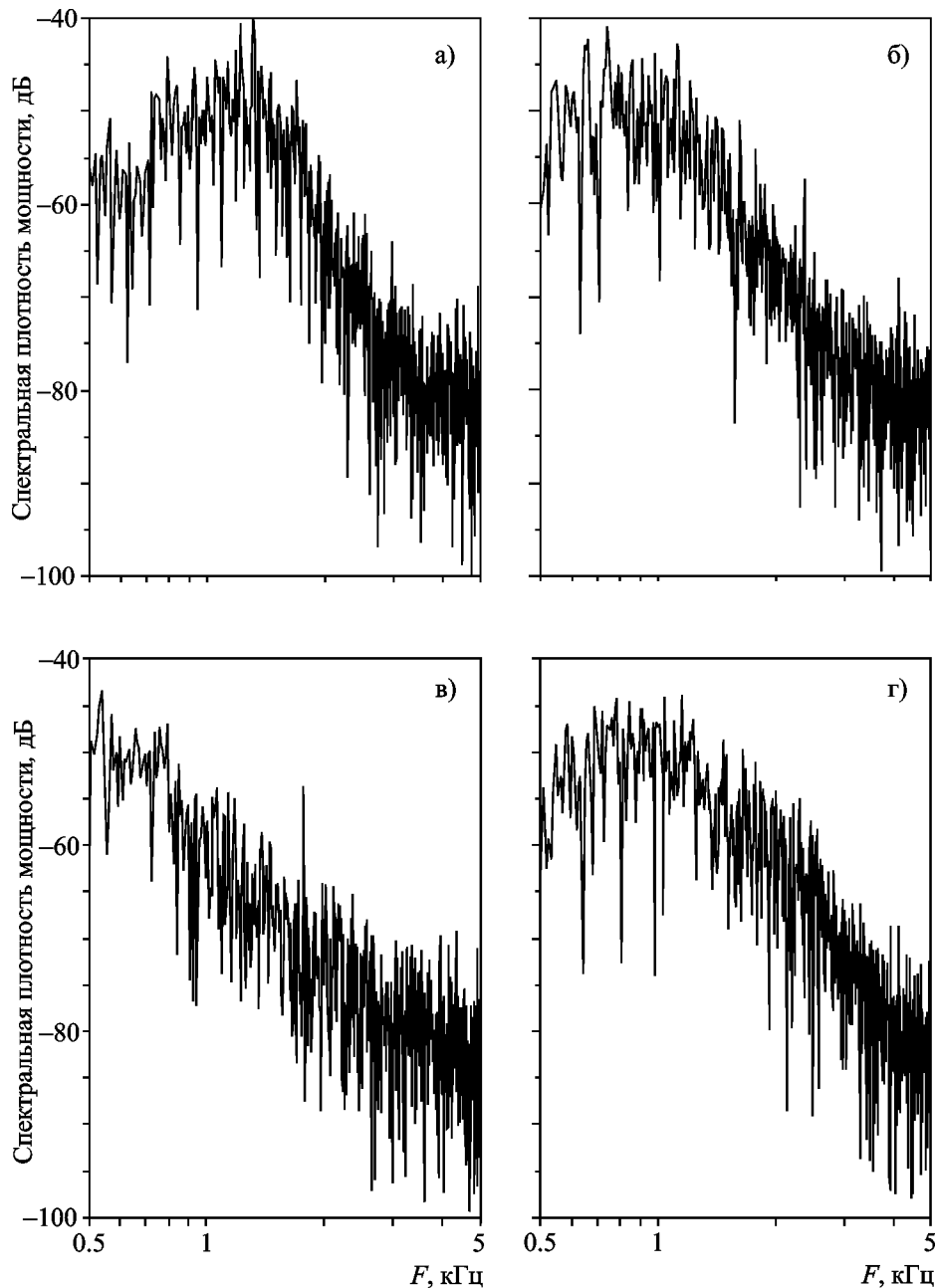


Рис. 1. Спектральная плотность мощности помехи в различные моменты времени: а) – t_0 ; б) – $t_0 + 0.13$ с; в) – $t_0 + 0.26$ с; г) – $t_0 + 0.39$ с

Эти мгновенные спектры получены методом периодограмм за время анализа $T_a = 0.13$ с, что соответствует частотному разрешению около 8 Гц, через интервал времени $\Delta t = 0.13$ с. Они иллюстрируют изменчивость во времени спектральной плотности мощности сигнала, отраженного от участка лиственного леса при порывистом ветре. На рис. 1, а спектральная плотность мощности имеет максимум на доплеровской частоте порядка 1 кГц, т. е. в этот момент времени обратное рассеяние определялось движущейся группой отражателей, средняя радиальная скорость которых была близка к 1 м/с. На рис. 1, б представлен спектр, полученный через 0.13 с. Из рисунка видно, что максимум спектральной плотности сместился ближе к нулю, т. е. радиальная составляющая средней скорости группы отражателей уменьшилась. На рис. 1, в спектральная плотность мощности имеет максимум около нулевых доплеровских частот. А на рис. 1, г этот максимум находится уже на частоте порядка 1 кГц. Такая спектральная картина характерна для небольших площадок облучения лиственного леса (десятки квадратных метров) при ярко выраженном порывистом ветре. При стабильном ветре спектры, как правило, максимумов не имеют, но интенсивность спектральных составляющих и ширина полосы мгновенных спектров меняются во времени.

В связи с этим представляют интерес следующие вопросы. Каковы мгновенная мощность помехи и граничная частота энергетического спектра? Как ведут себя во времени эти параметры, полученные за сравнительно короткое время анализа? Под мгновенной мощностью мы понимаем мощность сигнала, определяемую на небольшом конечном интервале времени. В нашем случае – это время анализа $T_a = 0.13$ с. По мгновенным спектрам рассчитаны значения граничных частот спектра $F_{гр}$. Они получены из условия, что мгновенная мощность помехи выше частоты $F_{гр}$ равна или меньше трехкратной мощности собственных шумов приемника макета РЛС двухмиллиметрового диапазона. Из мгновенных спектров определены величины мгновенной мощности помехи для времен анализа $T_a = 0.13$ с в диапазоне доплеровских частот

от 0.5 кГц до $F_{гр}$. Мгновенная мощность помехи полностью характеризует ее эффективную поверхность рассеяния, благодаря тому что в эксперименте проводились записи сигналов, отраженных от металлического шара, имеющего известную ЭПР. При этом следует иметь в виду, что ЭПР определялась для сигнала в полосе доплеровских частот от 0.5 кГц до $F_{гр}$, т. е. она является ЭПР СР. Другими словами, это ЭПР рассеивателей, имеющих радиальные скорости выше 0.5 м/с.

Исследуемые величины (ЭПР СР и граничная частота) являются случайными. Для получения и анализа этих величин, характеризующих сигнал помехи и его изменчивость во времени, были изучены записи отраженных от лиственных деревьев сигналов общей длительностью более 100 мин.

На рис. 2 приведены характерные примеры реализаций случайных процессов – зависимости ЭПР СР помехи и граничной частоты мгновенных спектров от времени.

Эти примеры свидетельствуют о статистической нестационарности сигнала помехи, обусловленной изменчивостью во времени его мощности и полосы доплеровских частот. Для выборочных значений случайных процессов $\sigma(t)$ и $F_{гр}(t)$, при различных длительностях

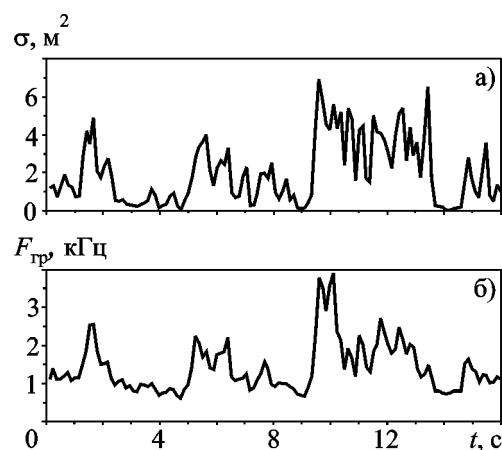


Рис. 2. Примеры реализаций случайных процессов: зависимости ЭПР СР помехи (а) и граничной частоты мгновенных спектров (б) от времени

реализаций T_p , получены оценки статистических характеристик: коэффициента взаимной корреляции R , средних значений $\overline{\sigma(t)}$ и $\overline{F_{гр}(t)}$, среднеквадратических значений выборочных случайных величин ϑ_σ и ϑ_F , вероятностей превышения их средних значений P_σ и P_F . Они приведены в табл. 1.

Приведенные оценки статистических характеристик позволяют охарактеризовать случайные процессы $\sigma(t)$ и $F_{гр}(t)$. Прежде всего, следует отметить высокий коэффициент взаимной корреляции между ними – даже для достаточно длинной реализации он имеет значение не менее 0.7. Это свидетельствует о высокой статистической связи между этими двумя параметрами сигналов. Для случайных процессов характерна большая дисперсия, особенно для ЭПР, для которой среднеквадратичное отклонение составляет величину порядка среднего значения. Вероятности превышения среднего значения случайных величин P_σ и P_F меньше 0.5, что свидетельствует о несимметричности мгновенных значений величин относительно среднего значения. Отклонения от среднего в сторону меньших значений более вероятны и имеют меньшую амплитуду в отличие от выбросов в сторону больших значений. Это видно из примеров реализации случайных процессов, приведенных на рис. 2. Оценки статистических характеристик случайных процессов $\sigma(t)$ и $F_{гр}(t)$ незначительно меняются в зависимости от длины реализации, когда ее значения варьируются в пределах от 16 до 100 с.

По 760-ти значениям случайных величин $\sigma(t)$ и $F_{гр}(t)$, полученным за время около 100 с,

построена регрессионная зависимость $F_{гр}$ по σ вида

$$F_{гр} = F_0 + B\sigma, \tag{1}$$

где $F_0 = 0.6$ кГц – свободный член, $F_{гр}$ и σ – случайные величины, $B \approx 0.48$ кГц/м² – коэффициент регрессии. Эта линейная зависимость приведена на рис. 3, где точками изображены значения случайных величин. Из рисунка видно, что зависимость между параметрами, характеризующими отраженный листовыми деревьями сигнал, – ЭПР и граничной частотой спектра – можно удовлетворительно аппроксимировать выражением (1).

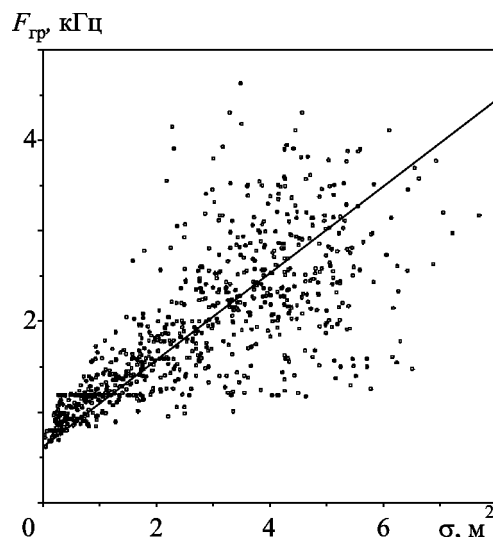


Рис. 3. Регрессионная зависимость

Таблица 1. Оценки статистических характеристик: коэффициента взаимной корреляции R , средних значений $\overline{\sigma(t)}$ и $\overline{F_{гр}(t)}$, среднеквадратических значений выборочных случайных величин ϑ_σ и ϑ_F , вероятностей превышения их средних значений P_σ и P_F

T_p, c	R	$\overline{\sigma(t)}, м^2$	$\overline{F_{гр}(t)}, кГц$	$\vartheta_\sigma, м^2$	$\vartheta_F, кГц$	P_σ	P_F
16	0.86	2	1.42	1.7	0.66	0.39	0.36
50	0.77	2.53	1.8	1.74	0.83	0.44	0.41
100	0.73	2.77	1.93	1.68	0.82	0.48	0.46

Статистическая нестационарность сигнала, отраженного от участка лиственного леса, выражается в том, что мощность высокочастотной части доплеровского сигнала, полученная за короткий интервал времени, меняется во времени. Это, в большинстве случаев, соответствует расширению мгновенных доплеровских спектров. Такая особенность сигнала помехи будет оказывать существенное влияние на эффективность работы устройств СДЦ, и ее необходимо учитывать при разработке перспективных РЛС КВЧ ММД с селекцией движущихся целей.

Оценка влияния помех на эффективность устройств СДЦ

Основная задача РЛС СДЦ – это обнаружение движущейся цели на фоне пассивных помех от местности с заданными вероятностями ложной тревоги и правильного обнаружения на выходе обнаружителя при заданном соотношении сигнал/помеха на его входе [7]. Вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения являются количественными оценками процесса обнаружения и определяются статистическими характеристиками эхо-сигналов цели и помехи, алгоритмом обнаружения и соотношением сигнал/помеха. Решение задачи обнаружения и построение оптимального обнаружителя цели в условиях нестационарной помехи – задача достаточно сложная и зачастую, в условиях априорной неопределенности, нерешаемая. Поэтому в рамках этой работы мы ограничимся оценкой влияния устройств СДЦ на соотношение сигнал/помеха, которое является определяющим при оценках характеристик обнаружения. Основным узлом, входящим во все устройства СДЦ независимо от их схематического решения, является режекторный фильтр. Его основная задача – подавлять все сигналы помехи с частотами от 0 до $F_{п\max}$ и пропускать полезные сигналы с частотами от $F_{п\max}$ до $F_{д\max}$, где $F_{п\max}$ – максимальная частота помехи, $F_{д\max}$ – максимальная доплеровская частота сигнала, обеспечивая необходимое соотношение сигнал/помеха на входе обнаружителя. Схематических решений режекторного фильтра, выполняющего необходимые

функции, множество, но по своей сути – это фильтр верхней частоты с заданными граничными частотами полосы режекции и полосы пропускания.

В качестве характеристик, определяющих эффективность устройств СДЦ, используют коэффициент подавления помехи K_n и коэффициент улучшения K_y [1]. Первый определяется отношением:

$$K_n = P_{in} / P_{out},$$

где P_{in} – мощность помехи на входе режекторного фильтра, P_{out} – мощность помехи на его выходе. Этот коэффициент показывает, насколько подавляется помеха, но не учитывает прохождение полезного сигнала через устройство СДЦ. Коэффициент улучшения K_y определяется отношением:

$$K_y = \frac{(P_c/P_n)_{in}}{(P_c/P_n)_{out}},$$

где $(P_c/P_n)_{in}$ и $(P_c/P_n)_{out}$ – отношения мощности сигнала к мощности помехи на входе и выходе.

Коэффициент улучшения – это наиболее часто используемый показатель эффективности устройств СДЦ, так как учитывает реакцию режекторного фильтра не только на помеху, но и на сигнал.

Для получения оценок эффективности было проведено компьютерное моделирование фильтров верхней частоты (ФВЧ) с фиксированными полосами подавления и пропускания, входящими в состав традиционных устройств СДЦ. В качестве режекторного фильтра с фиксированной граничной частотой полосы пропускания (ФФГЧ) использовался цифровой ФВЧ Кауэра 4-го порядка, обеспечивающий необходимое подавление в полосе режекции от 0 до 500 Гц, с фиксированной граничной частотой полосы пропускания, которая задавалась двумя значениями. Первое соответствовало среднему значению граничной частоты помехи, приведенному в табл. 1 (1.5 кГц), второе было в два раза больше (3 кГц).

Поскольку исследуемая помеха статистически нестационарна, естественно было в качестве адаптивного режекторного фильтра СДЦ использовать ФВЧ с переменной граничной частотой полосы пропускания (ФПГЧ). Поэтому было проведено компьютерное моделирование ФВЧ с фиксированной полосой режекции и ФПГЧ. Полоса пропускания изменялась во времени синхронно с изменением мощности по заданному алгоритму с использованием регрессионной зависимости (1), приведенной на рис. 3. Условия моделирования такие же, как и для случая ФФГЧ, тот же сигнал, та же помеха.

На вход фильтров подавалась аддитивная смесь сигнала постоянной мощности и помехи. Оценивались соотношение сигнал/помеха на выходе фильтра и коэффициент улучшения. В качестве помехи использовались записанные ранее реализации сигналов, отраженных от берегов, общей длительностью несколько десятков минут, в качестве сигнала – синусоидальное колебание, мощность которого соответствовала сигналу, отраженному от цели с ЭПР = 0.8 м². Частота сигнала задавалась в диапазоне доплеровских частот от 1.5 до 10 кГц.

Анализ результатов моделирования показал, что для случая статистически нестационарной помехи на выходе режекторного ФФГЧ СДЦ соотношение сигнал/помеха и его коэффициент улучшения – величины случайным образом изменяющиеся во времени. Точно так же ведут себя эти величины на выходе адаптивного режекторного ФПГЧ.

Разработчиков РЛС обнаружения с СДЦ интересуют в конечном итоге заданные характеристики обнаружения [7], которые определяются необходимым соотношением сигнал/помеха. Предлагается в качестве коэффициента эффективности устройств СДЦ в случае нестационарной помехи использовать вероятность Q превышения соотношением сигнал/помеха на выходе устройства СДЦ некоторого заранее определенного порогового уровня, необходимого для получения заданных характеристик обнаружения.

Количественные оценки статистических характеристик случайных величин, их среднее значение μ и среднеквадратическое от-

клонение (СКО) зависят от времени, от длины реализации, от характеристик режекторного фильтра. Однако при этом наблюдаются некоторые качественные закономерности. Они будут рассмотрены на примерах результатов моделирования режекторного ФФГЧ для помехи, параметры которой показаны на рис. 2, и для сигнала с доплеровской частотой $F_d = 5$ кГц. Зависимости от времени величин, полученных в результате моделирования для этого случая, приведены на рис. 4. На рис. 5. показаны такие же зависимости, но для адаптивного ФПГЧ.

Для величин, приведенных на рисунках, получены количественные оценки статистических характеристик случайных величин, характеризующих моделируемые фильтры. Оценки сведены в табл. 2.

На рис. 4, а и рис. 5, а представлена зависимость соотношения мощностей сигнала и помехи на входе режекторного фильтра. Видно, что оно существенно меняется во време-

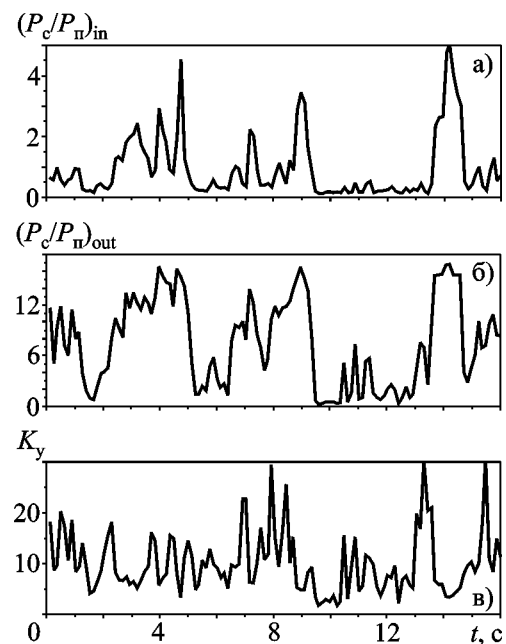


Рис. 4. Примеры зависимостей от времени результатов моделирования режекторного ФФГЧ: а) – соотношение сигнал/помеха на входе фильтра; б) – соотношение сигнал/помеха на выходе фильтра; в) – коэффициент улучшения

ни, принимая значения от 0.12 до 5. Среднее значение и СКО соотношения сигнал/помеха на входе равны 0.95 и 1.04 соответственно. Причем, естественно, минимумы соотношения на временной оси соответствуют всплескам мощности помехи (см. рис. 2, а), а максимумы – минимальным уровням помехи. Поведение во времени соотношения сигнал/помеха на выходе режекторного ФФГЧ

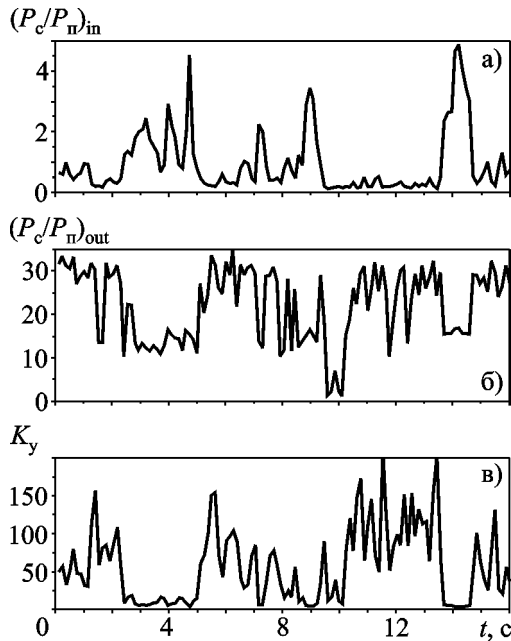


Рис. 5. Примеры зависимостей от времени результатов моделирования адаптивного режекторного ФПГЧ: а) – соотношение сигнал/помеха на входе фильтра; б) – соотношение сигнал/помеха на выходе фильтра; в) – коэффициент улучшения

представлено на рис. 4, б, а оценки его среднего значения и СКО приведены в табл. 2. Видно, что соотношение сигнал/помеха улучшается в несколько раз, а в отдельные моменты времени в десятки раз, что иллюстрирует зависимость коэффициента улучшения от времени, представленная на рис. 4, в.

Характерным для результатов моделирования ФВЧ с низкой граничной частотой полосы пропускания (1.5 кГц) является улучшение соотношения сигнал/помеха на выходе фильтра в моменты времени, когда помеха имеет низкий уровень и занимает сравнительно небольшую полосу доплеровских частот. Это видно из сравнения рис. 2, а и рис. 4, б в интервалы времени 2.5 ÷ 5 с, 8 ÷ 9.5 с, 13.5 ÷ 14.5 с. В промежутки времени, когда помеха имеет сравнительно высокий уровень мощности в широкой полосе доплеровских частот, она хуже подавляется ФВЧ, и на его выходе уровень отношения сигнал/помеха хотя и повышается в несколько раз, но все же остается мал. Это видно из сравнения зависимостей, приведенных на рис. 2, а и рис. 4, б в интервалы времени 1.5 ÷ 2 с, 5.5 ÷ 6.5 с и 9.5 ÷ 13.5 с. Для зависимости, приведенной на рис. 4, б, при пороговом соотношении сигнал/помеха равном 10 коэффициент эффективности $Q = 0.368$.

С увеличением граничной частоты полосы пропускания для ФФГЧ до 3 кГц соотношение сигнал/помеха возрастает примерно в два раза, коэффициент эффективности увеличивается до $Q = 0.888$. Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что в условиях нестационарной помехи применение режекторных ФФГЧ позволяет улучшить соотношение сиг-

Таблица 2. Количественные оценки статистических характеристик случайных величин для разных типов моделируемых фильтров

	$(P_c/P_n)_{in}$	ФФГЧ (1.5 кГц) $(P_c/P_n)_{out}$	ФФГЧ (1.5 кГц) K_y	ФФГЧ (3 кГц) $(P_c/P_n)_{out}$	ФФГЧ (3 кГц) K_y	ФПГЧ $(P_c/P_n)_{out}$	ФПГЧ K_y
μ	0.95	7.5	10.05	23.1	45	22.1	56.7
СКО	1.04	5.2	6.2	8.2	32	8.44	48.5
Q	–	0.368	–	0.888	–	0.96	–

нал/помеха в $10 \div 20$ раз, но при этом время превышения этим соотношением заданного уровня может составить менее 50 % от длительности реализации.

Адаптивный ФПГЧ обеспечивает примерно такой же уровень соотношения сигнал/помеха на выходе при более высоком коэффициенте эффективности. Зависимость подавления помех от времени в ФПГЧ связана с алгоритмом изменения граничной частоты полосы пропускания при фиксированной полосе режекции. При построении модели адаптивного режекторного фильтра полоса режекции взята фиксированной и равной полосе неизменной части доплеровского спектра помехи (в нашем случае – 500 Гц). Тип фильтра, уровень подавления в полосе режекции и алгоритм изменения полосы пропускания выбирались из условия обеления помехи, т. е. получения на выходе моделируемого фильтра равномерного спектра помехи [7]. Оказалось, что использование фильтра Кауэра с подавлением в полосе режекции 40 дБ и изменение полосы пропускания по алгоритму, использующему регрессионную зависимость (1), приведенную на рис. 3, дают приемлемое обеление помехи в $40 \div 50$ % случаев. Обеление помехи необходимо для построения оптимальных обнаружителей [7]. Этот же алгоритм дает приемлемое подавление помехи в большинстве случаев, что улучшает соотношение сигнал/помеха на выходе фильтра, хотя и в разной степени для разного уровня помех. Это видно из сравнения рис. 2, а и рис. 5, б. В интервалы времени $2.5 \div 5$ с, $8 \div 9.5$ с, $13.5 \div 14.5$ с помеха имеет низкую мощность и при выбранном алгоритме адаптации режекторного фильтра коэффициент улучшения оказывается небольшим (рис. 5, в), но уровень соотношения сигнал/помеха составляет величину не менее 10. Здесь важно отметить, что алгоритм адаптации параметров фильтра может быть выбран таким, что обеспечит необходимое соотношение сигнал/помеха. В интервалы времени, когда помеха имеет высокий уровень мощности в широкой полосе доплеровских частот, она эффективно подавляется ФВЧ, и на его выходе уровень отношения сигнал/помеха повышается в $10 \div 30$ раз, достигая необходимого зна-

чения. Это видно из сравнения зависимостей, приведенных на рис. 2, а и рис. 5, б, в периоды времени $1.5 \div 2.5$ с, $5 \div 7$ с, $9.5 \div 11.5$ с.

Хотя есть интервалы времени, для которых не происходит существенного улучшения соотношения сигнал/помеха, такой, как на рис. 5, б в районе 10-й секунды. Это связано тем, что в этот период времени помеха занимает широкий диапазон доплеровских частот. Частота сигнала находится внутри него, и сигнал подавляется вместе с помехой. И только при увеличении доплеровской частоты сигнала возможно улучшение отношения сигнал/помеха на выходе адаптивного ФПГЧ, что и наблюдается при изменении частоты сигнала.

Коэффициент улучшения зависит от времени и является случайным процессом (рис. 5, в), его значения определяются характеристиками помехи и адаптивного ФПГЧ. Поэтому для оценки эффективности такого фильтра также уместно использовать описанный выше коэффициент Q . Для приведенной на рис. 5, б реализации он составил величину $Q = 0.96$.

В результате моделирования получены зависимости коэффициента эффективности Q режекторных ФФГЧ и ФПГЧ от доплеровской частоты сигнала. Они приведены на рис. 6.

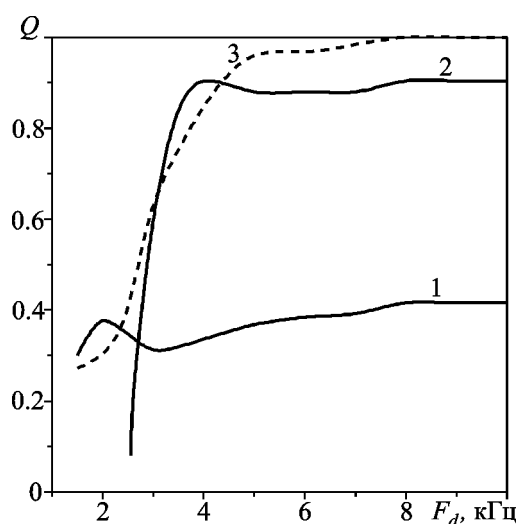


Рис. 6. Коэффициент эффективности СДЦ в зависимости от доплеровской частоты сигнала: 1 – ФФГЧ (1.5 кГц); 2 – ФФГЧ (3 кГц); 3 – ФПГЧ

Эти характеристики позволяют судить об эффективности фильтрации в зависимости от радиальной скорости цели. Фильтр с фиксированной полосой пропускания с нижней границей 1.5 кГц может обеспечивать необходимое соотношение сигнал/помеха для целей с низкими доплеровскими частотами, определяемыми низшей граничной частотой спектра нестационарной помехи (в нашем случае это величина около 0.5 кГц). Но эффективность такого фильтра невелика в широком диапазоне доплеровских частот. Он обеспечивает заданные характеристики всего в 36.8 % интервала времени наблюдения. Увеличение граничной частоты полосы пропускания ФФГЧ до 3 кГц улучшает коэффициент эффективности фильтра до $Q = 0.888$ при значениях доплеровских частот выше граничной частоты полосы пропускания. Однако для целей с доплеровскими скоростями ниже 3 кГц эффективность фильтра стремится к нулю, и для малоскоростных целей он не может быть использован. ФПГЧ при малых доплеровских частотах цели имеет эффективность не хуже, чем ФФГЧ с низкой граничной частотой полосы пропускания. При доплеровских частотах выше 4 кГц этот фильтр имеет коэффициент эффективности больше $Q = 0.9$, что лучше, чем у фильтра с фиксированной высокой граничной частотой полосы пропускания. Исследования показали, что эффективность селекции определяется в первую очередь характеристиками помехи: ее мощностью, законом спада спектральной плотности, граничной частотой спектра, – и во вторую очередь – характеристиками фильтра и алгоритмом изменения его параметров.

Заключение

1. Получены и проанализированы экспериментальные статистические характеристики помех, обусловленных отражениями от растительности. В КВЧ ММД сигналы, отраженные листовыми деревьями, в большинстве случаев являются статистически нестационарными. Нестационарность помехи обусловлена специфическими особенностями устройств этого диапазона, в частности высокой разре-

шающей способностью, и проявляется, как правило, в изменении во времени характеристик отраженного сигнала: мгновенной мощности высокочастотной части доплеровского спектра отраженного сигнала и граничной частоты этого спектра. Важно отметить, что эти характеристики имеют высокий уровень взаимной корреляции.

2. Проведена оценка влияния нестационарных помех на эффективность устройств СДЦ в коротковолновой части миллиметрового диапазона радиоволн. Нестационарность сигналов, отраженных от листовых деревьев в этом диапазоне, оказывает существенное влияние на эффективность устройств СДЦ. В случае нестационарной помехи соотношения сигнал/помеха на входе и выходе режекторного фильтра, а также коэффициент улучшения устройств СДЦ зависят от времени и являются случайными процессами. Для оценки эффективности устройств СДЦ в условиях нестационарной помехи предлагается использовать коэффициент эффективности Q . Он представляет собой вероятность превышения соотношением сигнал/помеха на выходе фильтра некоторого заданного уровня и характеризует интервал времени, в течение которого соотношение сигнал/помеха превышает этот уровень. Традиционный подход с использованием в устройствах СДЦ режекторных ФФГЧ оказывается малоэффективным. Такие фильтры позволяют в условиях статистически нестационарной помехи при низкой граничной частоте полосы пропускания фильтра обеспечивать необходимое соотношение сигнал/помеха со сравнительно небольшим коэффициентом эффективности в широком диапазоне доплеровских скоростей наблюдаемых объектов. Важно отметить, что в этом случае низшая, пропускаемая через устройство СДЦ, доплеровская частота сигнала равна граничной частоте полосы пропускания режекторного фильтра. С увеличением граничной частоты полосы пропускания коэффициент эффективности увеличивается, но повышается низшая доплеровская частота сигнала.

3. Использование адаптивных режекторных фильтров с переменной граничной частотой полосы пропускания, изменяемой по алгоритму,

использующему статистическую взаимосвязь между мгновенной мощностью сигнала помехи и граничной частотой его доплеровского спектра, позволяет получить приемлемую эффективность для низких доплеровских частот объекта. Она существенно возрастает с увеличением доплеровской скорости наблюдаемого объекта.

4. Применение методов адаптивной фильтрации при статистически нестационарных помехах в устройствах СДЦ РЛС коротковолновой части миллиметрового диапазона позволяет повысить их эффективность.

Литература

1. Бакулев П. А., Степин В. М. Методы и устройства селекции движущихся целей. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
2. Кулемин Г. П., Разсказовский В. Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. – К.: Наук. думка, 1987. – 232 с.
3. Хлопов Г. И., Коростелев В. С. Экспериментальное исследование спектральных характеристик когерентных сигналов, отраженных от растительности в коротковолновой части миллиметрового диапазона // Тезисы докладов III Всесоюзной школы по распространению миллиметровых волн в атмосфере. Харьков (Украина). – 1989. – С. 176-178.
4. Chuah N. T. Electromagnetic Scattering from Foliage and Vegetation: Modeling and Applications in Active Microwave Remote Sensing // 18th Asian Conference on Remote Sensing – Malaysia. – 1997. – P. 726-729.
5. Chen K. S., Fung A. K., Tjuatja S. Statistical properties of radar signal scattered from forest components // Geoscience and Remote Sensing Symposium, (IGARSS '93). – Tokyo (Japan). – 1993. – P. 817-820.
6. Особенности обратного рассеяния сигналов 2-х мм диапазона морской поверхностью / Гутник В. Г., Горобец В. Н., Майков Г. Г. и др. // В кн. "Научное приборостроение в миллиметровых и субмиллиметровых диапазонах радиоволн". Сб. науч. трудов АН Украины. – Харьков: Из-во ИРЭ АН УССР, 1992. – С. 115-121.
7. Теоретические основы радиолокации / Я. Д. Ширман, В. Н. Голиков, И. Н. Бусыгин и др. / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Сов. Радио, 1970. – 560 с.

Щодо ефективності доплерівської селекції у короткохвильовій частці міліметрового діапазону радіохвиль

**В. Г. Гутник, Л. І. Шарапов,
В. М. Горобець, Ю. В. Гончаренко**

Проаналізовано експериментальні статистичні характеристики завад, зумовлених зворотним розсіянням радіохвиль короткохвильової частки міліметрового діапазону рослинності. Основної уваги приділено сигналам, відбитим листяними деревами, що мають вищу інтенсивність порівняно з радіолокаційними відбиттями від інших видів рослинності. Показано, що для коротких проміжків спостереження сигнали, відбиті деревами, є статистично нестационарними. Для них отримано модельні оцінки ефективності пристроїв доплерівської селекції. Показано, що використання методів адаптивної фільтрації завад, з урахуванням їх статистичних характеристик, покращує ефективність цих пристроїв.

On the Doppler Selection Efficiency at Shorter Millimeter Wavelengths

**V. G. Gutnik, L. I. Sharapov,
V. N. Gorobets, and Yu. V. Goncharenko**

Experimental statistics of the disturbances related to millimeter radiowave backscatter from vegetation are obtained. Major attention is paid to the signals backscattered from deciduous trees and having higher intensity vs. radio echoes from other types of vegetation. The signals reflected from deciduous trees are shown to be statistically nonstationary for short observation periods. For these, the estimated effectiveness model for the doppler selectors is obtained. It is shown that using adaptive filtration methods with the disturbance statistics accounted increase these devices efficiency.