В. А. Фираго, В. Л. Козлов

ПОИСКОВО-ОБЗОРНЫЕ И СЛЕДЯЩИЕ ЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

Введение

Среди задач ПВО – обнаружить и поразить воздушную цель – первая считается в настоящее время наиболее трудно выполнимой. Если в 60–70-ых г. основными воздушными целями для тактических комплексов ПВО были самолеты с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) в десятки квадратных метров, либо ракеты первого поколения с радиолокационной ЭПР более 1 м^2 и высотой полета около 100 м, то 80-е годы главной угрозой стали малогабаритные низколетящие ракеты нового поколения с ЭПР около 0.1 м^2 и низкими высотами полета. Кроме того, интенсивно проводимые во многих западных странах НИОКР по разработке технологий «стелс» и внедрение их при создании самолетов и ракет способствуют дальнейшему снижению ЭПР. Предполагается, что вскоре ЭПР низколетящих противокарабельных ракет может уменьшиться до 0.01–0.001 м^2. Совершенствование возможностей воздушных летательных аппаратов преодолевать зону ПВО послужило еще одной причиной усиленного внимания со стороны специалистов к проблеме разработки новых средств поиска и обнаружения воздушных целей.

Существуют и чисто физические проблемы. Например, малая высота полета современных противокарабельных ракет приводит к тому, что почти вся трасса прохождения энергии сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения радиолокатора находится в приводной зоне. Возникающие в ней при определенных погодных условиях инверсные распределения влажности и температуры воздуха приводят к хорошо известному явлению аномального распространения радиоволн, нарушающему нормальное функционирование радиолокационных станций (РЛС). Разумеется, работа в оптическом диапазоне также сопряжена с проблемами прохождения сигналов через приземную атмосферу. Снег, туман, дождь или низкая облачность могут ограничить использование оптических средств. Однако неблагоприятные условия одновременно для систем оптического и радиодиапазона, как правило, не возникают. Именно поэтому совместная, взаимодополняющая работа локационных систем обоих диапазонов признается оптимальным способом решения проблемы поиска и обнаружения воздушных объектов на современном этапе.

1. Тенденции развития пассивных и активных инфракрасных локационных систем военного назначения

История развития локационных систем оптического диапазона насчитывает около 40 лет. Они рассматривались как устройства, решающие вспомогательные задачи для штатных радиолокационных средств. Но по мере совершенствования возможностей летательных аппаратов преодолевать ПВО пришлось разрабатывать принципиально новые, более эффективные средства борьбы с ними. Например, в последнее десятилетие развитые западные государства большое значение придают совершенствованию ПВО надводных кораблей. Причем наибольшее внимание уделяется не коллективной обороне морских соединений от противокорабельных ракет и авиации, а средствам индивидуальной защиты отдельных кораблей, т. е. подавляющая часть задач самообороны перекладывается с кораблей тяжелых классов на корабли средних и малых классов. Подобная переориентация неизбежно приводит к необходимости расширения возможностей технических средств таких кораблей при относительно небольшом увеличении стоимости их постройки и эксплуатации.

При локационном способе обнаружения объекта и дальнейшего слежения за ним требуется затрачивать некоторую энергию. Уровень средней излучаемой мощности является величиной, определяющей массу, габариты, энергопотребление и, в конечном счете, стоимость системы, что характерно и для активных оптико-локационных систем. Естественно при активном способе обзора заданного участка воздушного пространства теряется скрытность работы и противник может своевременно принять адекватные меры по подавлению излучающих средств ПВО.

Пассивные оптико-локационные системы выгодно отличаются незаметностью для противника, поскольку каждый достаточно быстро двигающийся летательный аппарат затрачивает энергию на преодоление сопротивления воздуха, часть которой, преобразуясь в электромагнитное излучение оптического диапазона, несет информацию позволяющую обнаружить его. Характеристики современных многоэлементных приемников излучения близки к теоретически достижимым, поэтому габариты оптико-механических сканирующих узлов пассивных локационных систем на порядки меньше, чем у РЛС. Разумеется, скорость обзора воздушного пространства и число одновременно сопровождаемых целей для пассивных систем имеет пределы, но они обусловлены в основном вычислительной мощностью блока обработки цифровых видеопотоков, идущих от фотоприемных устройств. Быстрый прогресс в области микропроцессорной техники позволяет наращивать эту мощность практиче-

ски без увеличения массогабаритных характеристик и энергопотребления системы.

В настоящий момент поисково-обзорные и следящие оптико-электронные системы, а также аналогичные системы наведения рассматриваются как ключевые элементы современного оружия. Это стало возможным в результате технологических прорывов при создании всех критических элементов этих систем.

Рассмотрим их по порядку. Основным узлом оптических локаторов является оптико-механическая система. Поле обзора современных зарубежных локационных систем составляет 360° по азимуту и от –10 до +40° по углу места. Время разворота в заданном направлении – не более 2 с, максимальные угловые скорости слежения 40 – 60 угл. град/с. Такие динамические характеристики обеспечиваются применением высокомоментных электродвигателей с магнитами из редкоземельных металлов, либо гидравлическими приводами. Важнейшая характеристика локационных систем – погрешность определения координат объекта. Эта величина складывается в основном из трех компонентов: погрешности определения координат цели относительно главной оси оптической системы, погрешности измерения ориентации главной оптической оси и погрешности начальной установки угловой системы координат. Первая погрешность в типичных случаях приближенно равна десяти угловым секундам (при работе по квазиточечным целям); вторая, при использовании современных датчиков углов, составляет единицы угловых секунд. При размещении локационной системы на постоянно двигающемся объекте, например на корабле, третья составляющая общей погрешности может возрастать вследствие рассогласования (из-за упругих динамических деформаций корпуса корабля) собственных угловых координат оптического локатора с общекорабельной системой координат, определяемой центральным гироскопическим постом корабля. Включение в состав оптического локатора лазерного трехосного гироскопа с волоконно-оптическими контурами позволяет сохранять взаимное положение систем координат с погрешностью единицы угловых секунд.

К оптическому тракту локационных систем, в который входят оптические элементы, начиная со входного окна и заканчивая плоскостью формирования конечного изображения, предъявляются весьма жесткие требования. Например, угловое разрешение должно быть близко к дифракционному пределу, относительное отверстие объектива для улучшения пороговой чувствительности путем уменьшения площади фоточувствительных площадок многоэлементного приемника должно быть больше единицы. При одновременной работе в двух окнах прозрачности

атмосферы (обычно 3–5 и 8–14 мкм) хроматические аберрации должны вносить минимальные искажения. К тому же коэффициент пропускания оптического тракта должен быть близким к единице, а все характеристики – сохраняться в большом интервале температур эксплуатации. Выполнение этих требований стало возможным после создания новейших технологий: прецизионного алмазного точения, позволяющего изготавливать высокоточные асферические поверхности; нанесения алмазоподобных высокоэффективных просветляющих покрытий; изготовления специальных оптических элементов, обеспечивающих радикальное улучшение хроматической коррекции и уменьшение влияния на формирование изображения температурных перепадов.

Самый значительный прогресс достигнут в процессе улучшения характеристик следующего узла, представляющего собой многоэлементный детектор ИК излучения. В используемых окнах прозрачности атмосферы пороговая чувствительность инфракрасных локационных систем ограничивается флуктуациями фонового излучения. Поэтому главной задачей разработчиков линеек и матриц инфракрасных приемников было создание технологии их изготовления и конструктивных решений, обеспечивающих минимум собственных шумов и высокую однородность чувствительности элементов. В пассивной инфракрасной локации информационными сигналами являются небольшие изменения яркости двигающегося объекта $L_{\text{об}}$, наблюдаемого на естественном яркостном фоне. Эквивалентный перепад температур между объектом и окружающим фоном с яркостью $L_{\text{ф}}$ зачастую меньше 1 К, что соответствует контрасту $K = \left(L_{\text{об}} - L_{\text{ф}}\right) / \left(L_{\text{об}} + L_{\text{ф}}\right)$, равному 4 % в спектральном диапазоне 3–5 мкм и – 1.6 % в диапазоне 8–14 мкм. Это предъявляет повышенные требования к однородности чувствительности элементов матриц, их собственным шумам и блоку преобразования получаемых сигналов в цифровой видеопоток. Были созданы крупноформатные гибридные матрицы на основе узкозонных полупроводников HgCdTe и InSb, квантоворазмерных гетероструктур GaAs/AlGaAs, планарные матрицы на основе фотодиодов Шоттки из PtSi и гетеропереходов GeSi/Si, объединенных со сдвиговыми регистрами на единой кремниевой подложке. Предпринимаются попытки создания перспективных для ИК-матриц фотоприемников на основе квантоворазмерных структур GeSi/Si, δ-легированных квантовых ям и сверхрешеток, а также на основе других сложных полупроводников.

Наилучшие характеристики среди крупноформатных матриц имеют гибридные, в которых используются фотодиоды на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с

$x > 0.2$. Квантовая эффективность таких приемников превышает 70 % и лучшие их образцы в наземных условиях обеспечивают пороговую чувствительность, ограниченную флуктуациями фонового излучения. Но обязательное условие их эксплуатации – криогенное охлаждение до 77 К. Эта проблема была успешно решена в прошлое десятилетие. Временной ресурс современных микрокриогенных систем, построенных по термодинамической схеме Стирлинга, достигает несколько десятков тысяч часов, а энергопотребление – несколько десятков ватт, что обеспечивает возможность их нахождения в постоянно работающем состоянии на протяжении нескольких лет.

В режиме ограничения чувствительности матрицы флуктуациями фонового излучения единственным путем повышения отношения сигнал/шум при поисково-обзорном сканировании является увеличение количества чувствительных элементов матрицы вдоль направления сканирования, например, в строках. При этом появляется возможность усреднения получаемых отсчетов яркости по элементам строки и отношение сигнал/шум растет пропорционально корню квадратному их количества. В настоящий момент главное препятствие на пути увеличения формата рассматриваемых гибридных матриц – высокий уровень фонового излучения в средней ИК области спектра. Расчеты показывают, что количество фотонов, попадающих на один элемент матрицы от фона в диапазоне 8–14 мкм за 10 мкс, составляет несколько десятков миллионов, что приводит к быстрому переполнению накопительных емкостей генерируемыми зарядами. В видимой области спектра в яркий солнечный день соответствующее количество фотонов фона меньше на три – пять порядков. Большая скорость фотогенерации носителей приводит к необходимости использовать высокую тактовую частоту считывания зарядов, а это в свою очередь расширяет рабочую полосу частот сдвиговых регистров и блока преобразования зарядов в цифровой видеопоток. Естественно, при этом снижается пороговая чувствительность матрицы, и основные усилия разработчиков в настоящий момент направлены на радикальное увеличение емкости накопительных ячеек, чтобы время накопления составляло десятки миллисекунд.

В последнее время проводится ряд работ по созданию оптико-локационных систем в ультрафиолетовой области 0.25–0.3 мкм. В этом диапазоне излучение Солнца полностью поглощается слоем атмосферного озона, находящимся на высотах более 20 км. Атмосферный кислород, поглощая излучение на длинах волн меньше 0.25 мкм, определяет коротковолновую границу этого диапазона. Поэтому в этом достаточно прозрачном окне создается исключительно благоприятная помеховая обста-

новка, лишенная естественного солнечного фона. Даже очень слабое ультрафиолетовое излучение факела ракетного двигателя летательных аппаратов может быть зарегистрировано на дальностях, превышающих возможности систем ИК-диапазона. Но для этого требуются ультрафиолетовые матричные фотоприемные устройства, работающие в режиме счета фотонов.

Недостатком пассивных оптико-локационных систем является отсутствие таких важных составляющих информационных параметров аэродинамической цели как дальность и скорость. Поэтому в конце 20-го века велись интенсивные разработки лазерных локационных систем. Однако созданные лазерные локаторы, определяющие все три координаты целей, а при использовании фотогетеродинного приема и величину радиальной скорости, не могут конкурировать с пассивными системами по дальности обнаружения, производительности обслуживания целей, массогабаритным характеристикам и энергопотреблению. Даже более простая задача – лазерное определение дальности на расстояниях, характерных для современных пассивных систем и со сравнимой с ними производительностью, до сих пор не имеет удовлетворительной реализации. Наличие в ряде зарубежных локационных систем лазерных дальномеров обычно обусловлено тем, что они необходимы для решения ряда вспомогательных задач в зонах значительно более близких, чем те, в которых работают пассивные каналы.

Отсутствие в пассивных локационных системах информации о расстоянии и скорости объектов создает большие затруднения при разработке алгоритмов выделения реальных целей из фоновых помех в процессе обработки поступающего с матрицы потока видеоданных. Используемые критерии должны вырабатываться на основе информации о форме, размерах и спектральных характеристиках излучения объектов, траекторной динамики их координат при движении. Важной информацией для создания алгоритмов обнаружения и последующего слежения являются пространственно-временные статистические характеристики флуктуаций излучения естественных яркостных фонов. Только сложные многоступенчатые процедуры обработки поступающего потока видеоданных, использующие базы данных о характеристиках целей и яркостных фонов, обеспечивают низкую частоту появления ложных тревог при заданной вероятности правильного обнаружения. Стремительное развитие микропроцессорной техники существенно увеличило возможности использования пространственно-временной фильтрации и процедур распознавания образов. Но даже сейчас, при использовании самой суперсовременной элементной базы цифровой блок обработки остается одной из

наиболее трудно реализуемых составных частей оптических локационных систем. Большие потоки видеоданных и необходимость использования сложных критериев требует от разработчиков громадных усилий по созданию алгоритмов, обеспечивающих работу локационных систем в реальном режиме времени. Эти проблемы решались в ряде научно-исследовательских работ, выполнявшихся на кафедре квантовой радиофизики и оптоэлектроники.

2. Пассивная локация подвижных объектов в ИК области спектра

Для эффективной работы локационной системы необходимо обеспечить определенные энергетические соотношения между полезным сигналом и пороговой чувствительностью системы. Работу оптико-электронного узла локационной системы можно представить с помощью функциональной схемы, показанной на рис. 1.

Освещенность изображения объекта в плоскости приемника излучения OXY можно записать с помощью свертки освещенности объекта $E_{\text{и}}(x,y)$, создаваемой идеальным объективом, с функцией рассеяния применяемого объектива $h(x,y)$ [1]:

$$E(x,y)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}E_{\text{и}}(x-\xi,y-\eta)h(\xi,\eta)d\xi d\eta= \\ =h_0\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}L\left(\frac{x-\xi}{k},\frac{y-\eta}{k}\right)h(\xi,\eta)d\xi d\eta, \quad (1)$$

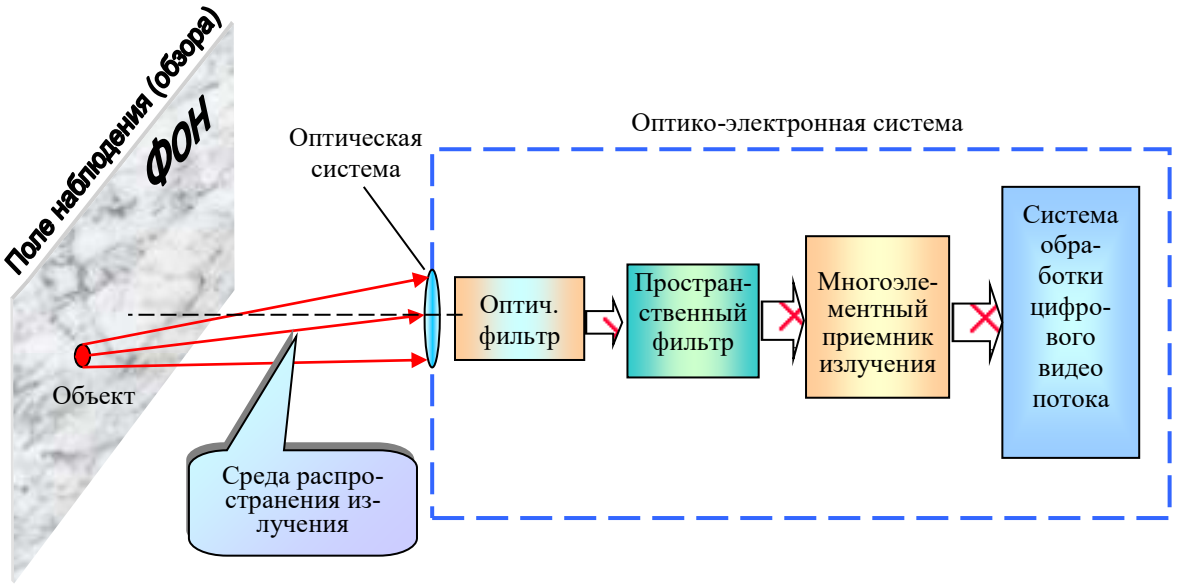


Рис. 1. Функциональная схема оптико-электронной системы пассивного локатора

где $h_0 = \pi\tau_c\tau_0 \cos^2\beta / \left(4f^2/D^2\right)$ – коэффициент, связывающий яркость объекта $L(x_1, y_1)$ в пространстве предметов и освещенность его изображения; τ_0 – коэффициент пропускания оптической системы; $k = f/l$ – масштабный коэффициент; f – фокусное расстояние оптической системы; β – угол между нормалью к входному зрачку объектива и направлением на объект. Применяя преобразование Фурье к полученному выражению, а также теоремы подобия, смещения и о спектре свертки можно найти пространственно-частотную спектральную плотность освещенности изображения, которую запишем в векторной форме:

$$S_E(\vec{\omega}_r) = h_0 k^2 S_L(k\vec{\omega}_r) H(\vec{\omega}_r) \qquad (2)$$

где $S_L(k\vec{\omega}_r)$ или $S_L(\vec{\omega}_{r1})$ – пространственно-частотная спектральная плотность яркости объекта в пространстве предметов, $H(\vec{\omega}_r)$ – пространственно-частотная передаточная функция (ПЧПФ) оптической системы.

Если фон, на котором наблюдается объект, рассматривать, как однородное случайное яркостное поле $L(\vec{r}_1)$ со спектральной плотностью мощности пространственных флуктуаций яркости $G_L(\vec{\omega}_{r1})$, то спектральная плотность мощности пространственных флуктуаций изображения определяется выражением

$$G_E(\vec{\omega}_r) = h_0^2 k^4 G_L(k\vec{\omega}_r) \left|H(\vec{\omega}_r)\right|^2. \qquad (3)$$

Для эффективного обнаружения объекта, находящегося на фоне естественных яркостных помех, необходимо использование оптимальных методов, которые основываются на минимизации функции потерь. Однако вероятности присутствия p или отсутствия q объекта в поле обзора обычно неизвестны, что приводит к необходимости использовать отношение правдоподобия

$$\Lambda = W(y/s)/W_g(y), \qquad (4)$$

где $W(y/s)$ – функция правдоподобия, являющаяся плотностью условной вероятности получения реализации y при наличии сигнала s и помехи g, а $W_g(y)$ – плотность вероятности получения той же реализации для одной лишь помехи. При равных вероятностях присутствия или отсутствия сигнала ($p = q = 0{,}5$) отношение правдоподобия полностью определяет вероятность наличия полезного сигнала в полученной реализации y.

Обычно при локации объект затеняет находящийся за ним участок фона. Поэтому в качестве сигнала можно рассматривать разность яркости объекта $L_{об}$ и средней яркости окружающего его фона $\bar{L}_{ф}$, т. е. $L_0(\vec{r}) = L_{об}(\vec{r}) - \bar{L}_{ф}$, что позволяет пользоваться условием аддитивности $L(\vec{r}) = L_0(\vec{r}) + \bar{L}_{ф}$ и записывать отношение правдоподобия в виде

$$\Lambda = W(y-s)/W_g(y). \qquad (5)$$

Подставляя в это отношение плотность вероятности помех и применяя известные критерии обнаружения (например, Неймана-Пирсона), можно найти оптимальный алгоритм обработки получаемого кадра. Вид плотности вероятности существенно влияет на возможности технической реализации вычисленного алгоритма. Для нормальной плотности вероятности алгоритм сводится к линейной оптимальной фильтрации принятой реализации и выбору порога решения, с которым сравнивается выходной сигнал фильтра. При этом линейный оптимальный фильтр является наилучшим из всех возможных, включая любые нелинейные фильтры. Для негауссовых помех алгоритмы обработки, следующие из отношения правдоподобия, существенно усложняются и в общем случае не сводятся к линейной фильтрации. Таким образом, для создания эффективных методов обнаружения объектов необходима обширная информация по пространственно-временным статистическим характеристикам естественных яркостных полей.

2.1. Статистические характеристики пространственно-временных флуктуаций естественных яркостных фонов

Осознание потребности в достоверных статистических характеристиках флуктуаций яркостных полей потребовало больших усилий по анализу имеющихся данных и выработке унифицированных методов измерения, обработки и представления пространственно-временных статистических характеристик естественных фоновых помех. Были проанализированы полученные данные по статистическим характеристикам [2], создана соответствующая аппаратура [3], разработана методика измерения статистических характеристик [4], оценены погрешности их определения [5] и проведена большая работа по накоплению, обработке и классификации статистических характеристик пространственных флуктуаций яркости земных и небесных ландшафтов при различных погодных условиях [6, 7].

Количественные данные по основным полученным статистическим характеристикам пространственных флуктуаций дневной яркости города,

лиственного леса и небосвода в окнах прозрачности атмосферы 2.1–2.4; 3.1–4.2 и 4.5–5.1 мкм можно найти в [1, 6, 7]. Установлены ориентировочные пределы вариаций статистических характеристик и найдены аппроксимации плотностей вероятности пространственных флуктуаций яркости, их корреляционных функций и пространственных спектральных плотностей мощности аналитическими зависимостями. Приведем наиболее характерные результаты экспериментальных исследований.

Одномерные математические спектральные плотности мощности в исследованном диапазоне пространственных частот в основном аппроксимируются выражением

$$G_x(\omega_x) = \frac{\alpha_L \sigma_L^2}{\left(\beta^2 + \omega_x^2\right)^n}. \qquad (6)$$

Пределы изменения дисперсии σ_L^2, показателя степени n и коэффициентов аппроксимации α_L и β приведены в [6, 7]. При $n > 0.5$ коэффициент α_L однозначно зависит от β и n

$$\alpha_L = 2\sqrt{\pi}\beta^{2n-1}\frac{\Gamma(n)}{\Gamma(n-0,5)}, \qquad (7)$$

где $\Gamma(n) = \int_0^\infty t^{n-1}e^{-t}dt$ – гамма-функция.

Для квазиизотропных полей с $n > 0.5$ из (6) при помощи преобразования

$$G(\omega) = -2\int_\omega^\infty \frac{d}{d\omega_x}\left[G_x(\omega_x)\right]\frac{d\omega_x}{\sqrt{\omega_x^2 - \omega^2}} \qquad (8)$$

определена аппроксимация двумерных спектральных плотностей мощности пространственных флуктуаций

$$G(\omega_x, \omega_y) = \frac{\gamma_n \sigma_L^2}{\left(\beta^2 + \omega_x^2 + \omega_y^2\right)^{n+1/2}}, \qquad (9)$$

где $\gamma_n = 4\pi\beta^{2n-1}$. Полученные аппроксимации для автокорреляционных функций пространственных флуктуаций яркости исследованных полей при $n > 0,5$ имеют вид

$$K(\xi) = \frac{2\sigma^2}{\Gamma(n-0,5)}\left(\frac{\beta|\xi|}{2}\right)^{n-0,5} K_{n-0,5}(\beta|\xi|), \qquad (10)$$

где $K_\nu(z)=\pi\left[I_{-\nu}(z)-I_\nu(z)\right]/\left(2\sin(\nu\pi)\right)$ – модифицированная функция Бесселя 3-го рода, $I_\nu(z)=\sum_{m=0}^{\infty}(z/2)^{\nu+2m}/\left[m!\Gamma(\nu+m+1)\right]$ – модифицированная функция Бесселя 1-го рода. Для частных случаев $n=1$ и $n=3/2$ корреляционная функция выражается в более простом виде:

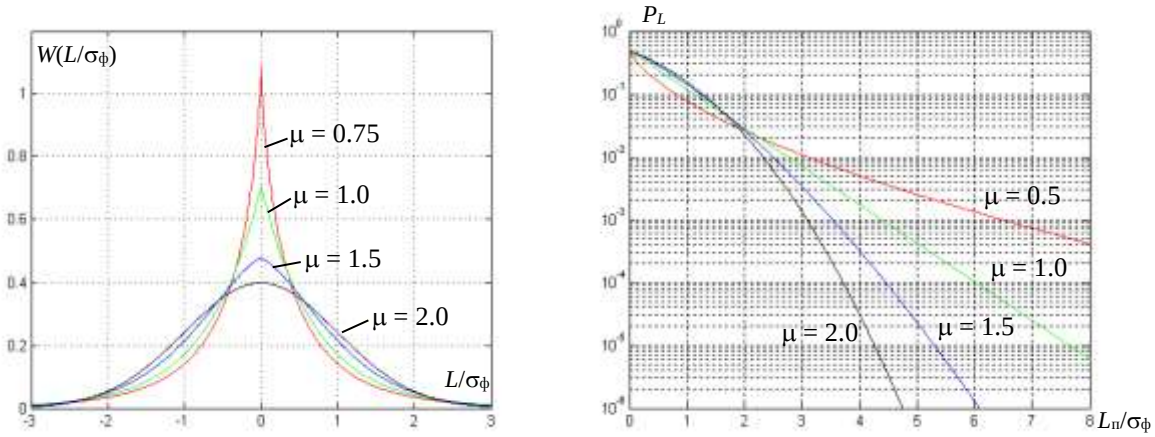
$$K(\xi)\big|_{n=1}=\sigma_L^2 e^{-\beta|\xi|} \quad \text{и} \quad K(\xi)\big|_{n=3/2}=\sigma_L^2\beta|\xi|K_1(\beta|\xi|).$$

Анализ взаимных статистических характеристик пространственных флуктуаций яркости естественных полей в различных окнах прозрачности атмосферы показал, что наиболее линейные стохастические связи наблюдаются для излучения наземных фонов. Корреляционное отношение для них незначительно превышало коэффициент взаимной корреляции, а в некоторых случаях даже совпадало с ним. Нелинейные стохастические связи наблюдаются в излучении сплошной неоднородной облачности.

Наиболее сильно влияние пространственной неоднородности фонов сказывается при определении плотности вероятности амплитудного распределения яркости. Одномерные и двумерные плотности вероятности распределения как яркости, так и отношения яркостей фонов в окнах прозрачности атмосферы, полученные без высокочастотной фильтрации, имели сложный вид, практически не поддающийся аппроксимации. Для подавляющего числа зафиксированных реализаций эти плотности вероятности состояли из нескольких перекрывающихся мод, наличие которых вызвано главным образом низкочастотными вариациями средней яркости. Для устранения влияния крупномасштабных вариаций яркости на исследуемые значения наиболее важной для оптических локационных систем плотности вероятности мелкоструктурных флуктуаций неоднородных яркостных полей использовалась цифровая фильтрация низкочастотной составляющей. Это позволило найти соответствующие аппроксимации. Одномодовые плотности вероятности мелкоструктурных отклонений яркости от среднего значения хорошо аппроксимируются функцией вида [7]

$$W(L)=\frac{A(\mu)}{\sigma_\phi}\exp\left\{-\left[\frac{|L|}{D(\mu)\sigma_\phi}\right]^\mu\right\}, \tag{11}$$

где $\sigma_\phi^2=\frac{1}{\pi}\int_0^\infty G_x(\omega_x)\left|K_\phi(\omega_x)\right|^2 d\omega_x$ – дисперсия пространственных флуктуаций яркости после фильтрации, $K_\phi(\omega_x)$ – передаточная функция



а *б*

Рис. 2. Одномерные плотности вероятности распределения величины мелкоструктурных флуктуаций яркости (*а*) и зависимости вероятности появления выбросов от величины нормированного порога (*б*) для естественных яркостных полей

фильтра, $A(\mu)=\frac{\mu}{2}\sqrt{\Gamma(3/\mu)/\Gamma^3(1/\mu)}$, $D(\mu)=\sqrt{\Gamma(1/\mu)/\Gamma(3/\mu)}$, а зарегистрированные пределы изменения величины μ лежат от 0.3 до 2.2. Причем величина μ зависит не только от типа естественного яркостного поля, но и от его неоднородности по дисперсии. Более неоднородные поля при прочих равных условиях имеют плотности вероятности с меньшим значением μ. Для них характерны колебания яркости, происходящие, в основном, возле среднего значения с редкими большими выбросами, что хорошо видно на рис. 2 [1, 7]. Причем вероятность P_L появления больших выбросов для малых значений μ может быть на несколько порядков больше, чем для гауссовых полей ($\mu=2$). Поэтому естественные яркостные поля создают гораздо большее количество ложных тревог для локационных систем оптического диапазона, чем гауссовые. Сильные отличия от гауссовых наблюдаются и для двумерных плотностей вероятности мелкоструктурных флуктуаций яркости, вид которых при $\mu=0.5$ и $\mu=1.0$ приведен на рис. 3 и рис. 4. Как и одномерные, они аппроксимируются семейством распределений на основе экспоненциальных степенных функций величины флуктуаций:

$$W(L_1,L_2,\xi)=\frac{A^2(\mu)}{\sigma_ф^2\sqrt{1-r_ф^2(\xi)}}\exp\left\{-\frac{|L_1|^\mu+\left[|L_2-L_1r_ф(\xi)|/\sqrt{1-r_ф^2(\xi)}\right]^\mu}{\left[D(\mu)\sigma_ф\right]^\mu}\right\}, \quad (12)$$

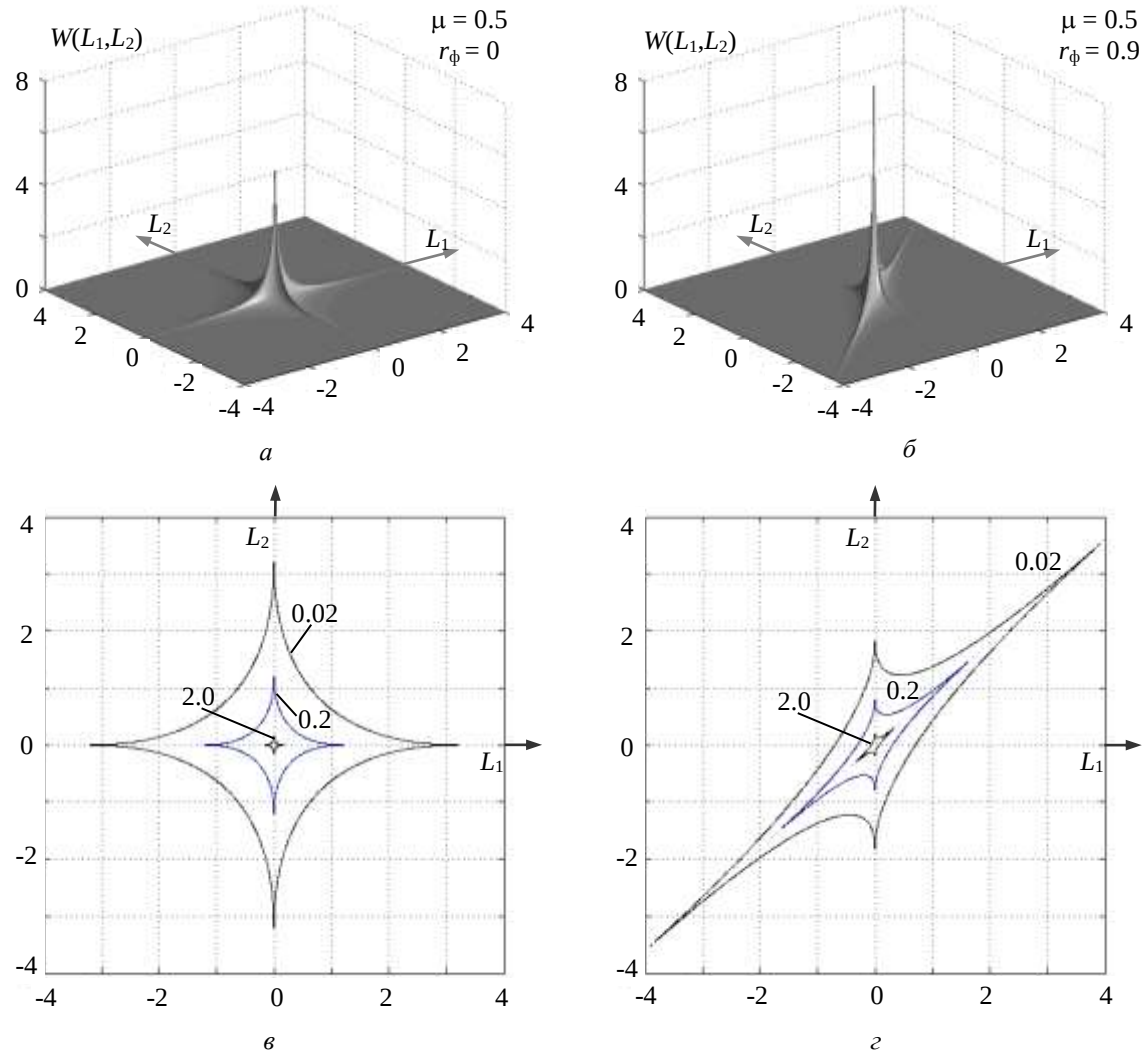


Рис. 3. Двумерные плотности вероятности распределения величины мелкоструктурных флуктуаций яркости при μ = 0,5 и двух значениях коэффициента автокорреляции (*а*, *б*) и их сечения (*в*, *г*)

где $r_{\text{ф}}(\xi)$ – коэффициент пространственной автокорреляции мелкоструктурных флуктуаций яркости для квазиизотропных полей, ξ – расстояние между рассматриваемыми точками яркостного поля. Для сравнения на рис. 5 приведен вид двумерной плотности вероятности гауссового случайного поля с коэффициентом корреляции $r_{\text{ф}} = 0.9$. Анализируя представленные на рис. 3–5 сечения двумерных плотностей вероятности распределения мелкоструктурных флуктуаций яркости можно заметить, что с уменьшением μ происходит переход контуров сечений от выпуклой к вогнутой форме. При этом со снижением μ скорость спада величины плотностей вероятности для флуктуаций с большими амплитудами также

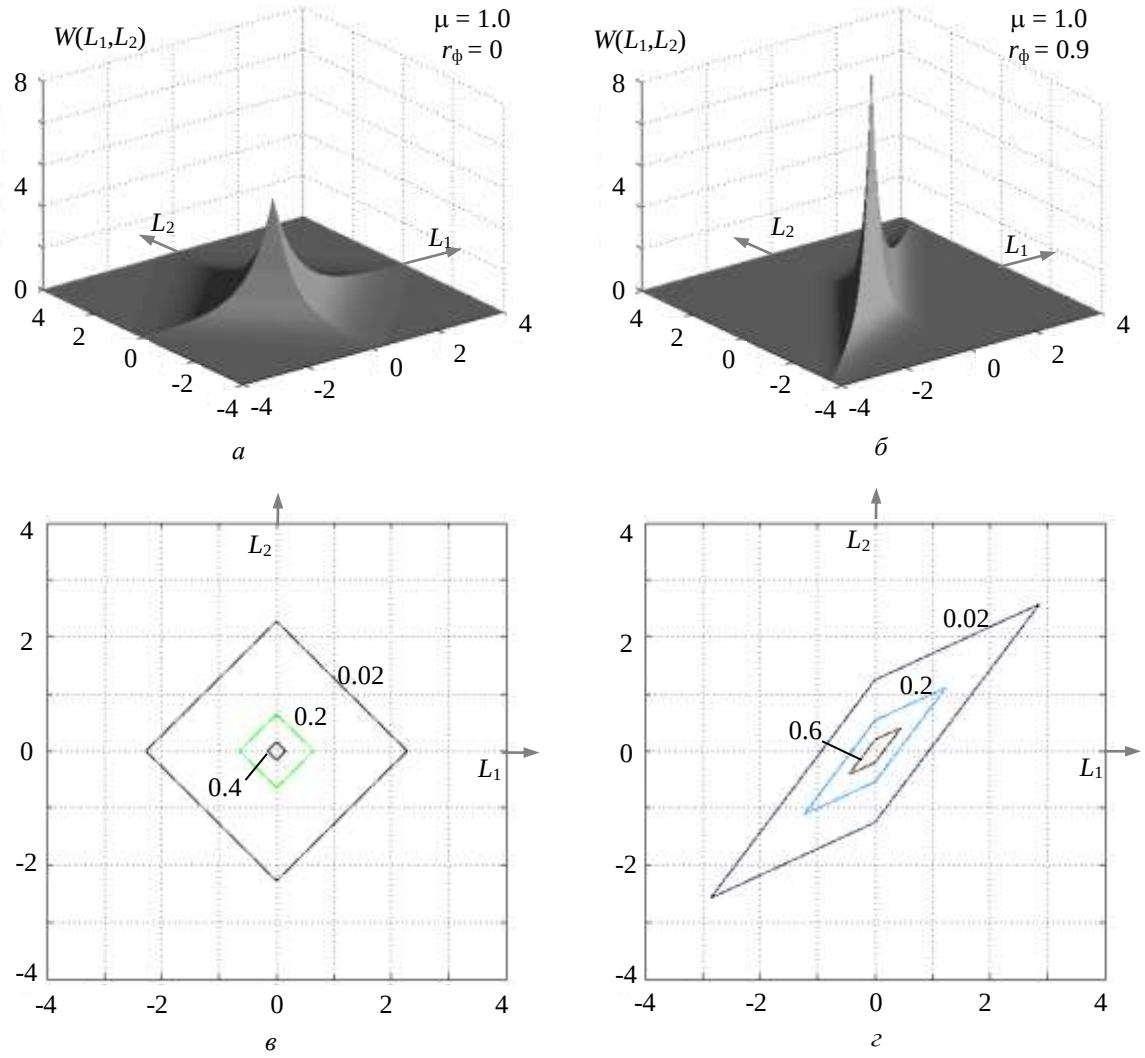


Рис. 4. Двумерные плотности вероятности распределения величины мелкоструктурных флуктуаций яркости при μ = 1.0 и двух значениях коэффициента

уменьшается. Физически такое поведение плотностей вероятности объясняется тем, что инфракрасное изображение естественных фонов создается множеством реальных объектов, имеющих конечные размеры. Мелкоструктурные перепады яркости излучения возникают на границах их соприкосновения, а величина этих перепадов определяется разностью температур объектов и коэффициентов их излучения. Для гауссовых случайных полей амплитуда флуктуаций обычно определяется несколькими механизмами, которые случайным образом суммируются, что практически не приводит к возникновению флуктуаций с амплитудой большей $3\sigma_{ф}$. При этом контур сечения двумерной плотности вероятности имеет выпуклую форму. Случайность же естественных яркостных

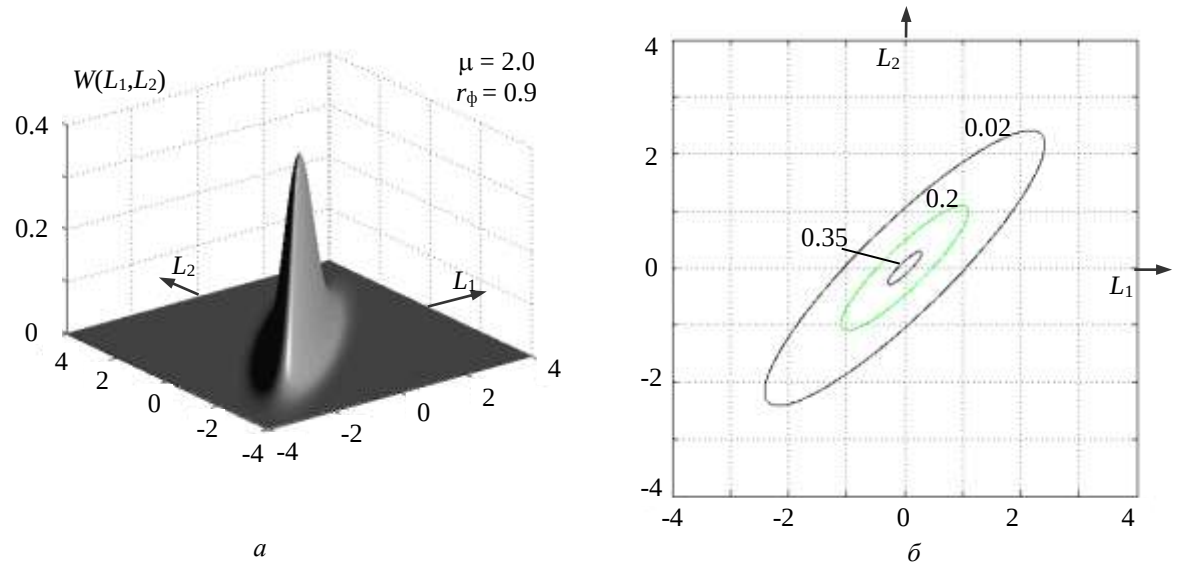
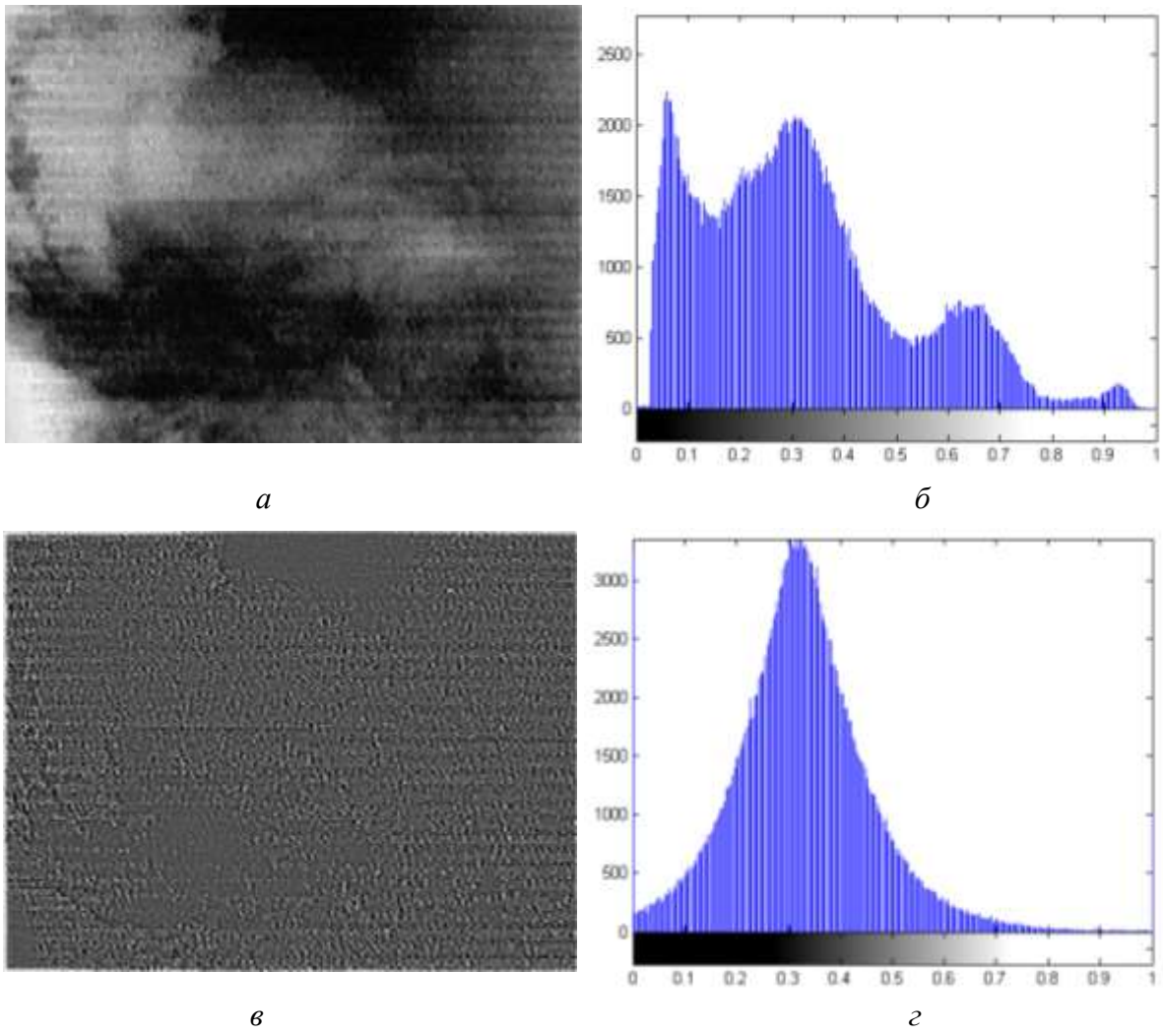


Рис. 5. Двумерная плотность вероятности распределения величины мелкоструктурных флуктуаций яркости для гауссового поля (при μ = 2.0) с коэффициентом автокорреляции $r_\phi = 0.9$ (*а*) и ее сечения (*б*)

полей определяется случайностью расположения составляющих их объектов и вариациями их формы. Сказанное хорошо иллюстрирует рис. 6, на котором приведены исходное и профильтрованное изображения дневного небосвода с кучевой облачностью в спектральном диапазоне 8–12 мкм и соответствующие гистограммы распределения яркости. Хорошо видно, что одномерная плотность вероятности распределения мелкоструктурных флуктуаций (см. рис. 6 *г*) негауссова и подчиняется экспоненциальному распределению (11) с $\mu \approx 1$. Радиационные шумы и собственные шумы приемной системы при суммировании с пространственными флуктуациями яркости регистрируемого изображения, приводят к изменению формы результирующей плотности вероятности. Поэтому вершина полученной гистограммы не имеет характерной заостренной формы. В [1, 8] получены соответствующие выражения для определения суммарной плотности вероятности мелкоструктурных флуктуаций $W_\Sigma(L)$. Для приведенного случая, т. е. когда $\mu = 1$, получено аналитическое выражение

$$W_\Sigma(L,z) = \frac{\sqrt{1+z}}{2\sqrt{2}\sigma_\Sigma} e^{-U^2}\left[e^{\left(z+U^2\right)}\operatorname{erfc}(z+U) + e^{\left(z-U^2\right)}\operatorname{erfc}(z-U)\right], \qquad (13)$$

где $\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_ш^2}$, $z = \sigma_ш / \sigma_L$, $U = VL/\sigma_\Sigma$, $V = \sqrt{1+z^2}/\left(\sqrt{2}z\right)$, $\operatorname{erfc}(z)$ – дополнительный интеграл вероятности, σ_L^2 – дисперсия мелкострук-



а *б*

в *г*

Рис. 6. Тепловое изображение небосвода до и после ВЧ пространственной фильтрации и соответствующие гистограммы распределения яркости

а – исходное изображение облачного небосвода $L(x,y)$ вблизи Солнца; *б* – гистограмма распределения яркости исходного изображения; *в* – тепловое изображение после удаления низкочастотных пространственных составляющих, сдвига и масштабирования $L_I(x,y) = 4\left[L_F(x,y) + 0,08\right]$; *г* – гистограмма распределения яркости полученного после пространственной фильтрации изображения

турных флуктуаций яркости, $\sigma_{ш}^2$ – дисперсия радиационных и собственных шумов локационной системы.

После фильтрации корреляционное отношение и коэффициент взаимной корреляции флуктуаций яркости в окнах прозрачности атмосферы обычно меньше, чем до фильтрации, а стохастическая связь оказывается более линейной [1, 7]. В случае линейной стохастической связи одномодовые двумерные взаимные плотности вероятности амплитудного распределения мелкоструктурных флуктуаций естественных яркостных по-

лей, рассматриваемые для двух окон прозрачности, аппроксимируются семейством экспоненциально степенных распределений:

$$W_{ik}\left(L_i, L_k, \xi\right) = \frac{A\left(\mu_i\right) A\left(\mu_k\right)}{\sigma_{\phi i}\sigma_{\phi k}\sqrt{1-r_{\phi ik}^2\left(\xi\right)}} \times$$

$$\times \exp\left\{-\left[\frac{\left|L_i\right|}{D\left(\mu_i\right)\sigma_{\phi i}}\right]^{\mu_i} - \left[\frac{\left|L_k - L_i\left(\sigma_{\phi k}/\sigma_{\phi i}\right) r_{\phi ik}\left(\xi\right)\right|}{D\left(\mu_k\right)\sigma_{\phi k}\sqrt{1-r_{\phi ik}^2\left(\xi\right)}}\right]^{\mu_k}\right\}. \quad (14)$$

Показатели степени μ_i и μ_k зачастую не равны между собой, поэтому $W_{ik}\left(L_i, L_k, \xi\right)$ могут иметь разнообразную форму.

Таким образом, накоплены обширные данные по статистическим характеристикам пространственных флуктуаций яркости естественных яркостных полей, установлены ориентировочные пределы вариаций основных характеристик, получены соответствующие аналитические выражения, аппроксимирующие основные характеристики, и объяснены основные закономерности их формирования. Это позволило существенно дополнить результаты других исследователей и развить соответствующие математические модели, применяемые при создании оптимальных методов выделения сигналов из фоновых помех локационными системами оптического диапазона.

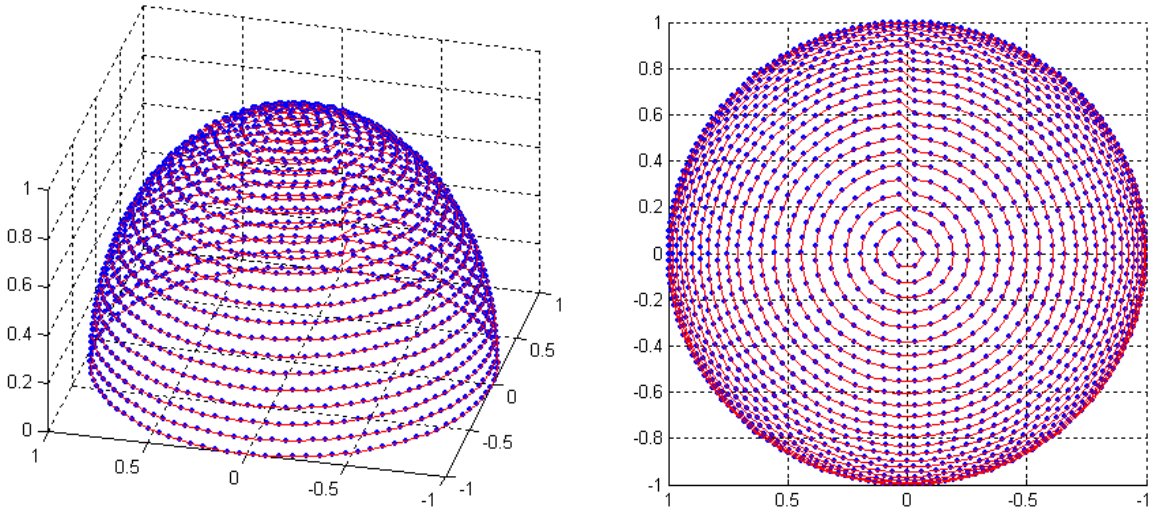
2.2. Синтез и исследование характеристик алгоритмов обнаружения удаленных объектов

Характеристики обнаружения объектов локационными системами поисково-обзорного и следящего типов в основном определяются параметрами пространственно-временных фильтров, осуществляющих выделение полезного сигнала из фоновых помех и собственных шумов приемной системы. В [8, 9, 10] выделены параметры фоновых помех и характеристики приемной части локационных систем, влияющие на передаточные функции фильтра и отношение сигнал/шум на его выходе. Численный анализ полученных выражений показал существенное влияние параметров n и β спектральной плотности мощности пространственных флуктуаций яркости естественных фонов (9) на характеристики пространственного фильтра. Установлено, что при работе в изменяющихся фоновых условиях необходимо проводить оценку отмеченных параметров спектральной плотности мощности фоновых помех и применять адаптивные пространственно-временные фильтры с регулируемым порогом принятия решения. В дальнейшем была разработана методика

синтеза оптимальной чувствительности многоэлементного приемника излучения $\varepsilon(\vec{r})$, на который проецировалось неподвижное изображение наблюдаемого поля, и оценено влияние на ее форму и параметры временного фильтра основных характеристик фоновых помех [11]. Показано, что оптимизированная чувствительность $\varepsilon(\vec{r})$ претерпевает сильное изменение своей формы при вариациях параметров приемника излучения, объектива и фоновых помех, что требует при создании пассивных систем обнаружения предварительного проведения оптимизации распределения чувствительности с учетом пределов возможных изменений характеристик фоновых помех, параметров объектива и приемной системы.

При анализе сканирующих локационных систем оценивались характеристики двух типов пространственных фильтров: с согласованным со скоростью сканирования сдвигом функции чувствительности приемника излучения $\varepsilon(\vec{r}+\vec{v}t)$ вдоль координаты, по которой происходит сканирование; фильтров с фиксированной функцией чувствительности $\varepsilon(\vec{r})$. Использование фильтров первого типа, к которым относятся многоэлементные приемники на приборах с зарядовой связью, показало, что оптимальный алгоритм обработки сводится к скользящему взвешиванию с соответствующими коэффициентами сигналов от элементов матрицы с последующим накоплением за время $t_{\text{н}}$ сигналов от наблюдаемой точки поля. Время $t_{\text{н}}$ в свою очередь зависит от размеров мгновенного поля зрения вдоль направления сканирования, равного $l_{\text{м}}/f$, где $l_{\text{м}}$ – линейный размер ПЗС матрицы, и угловой скорости сканирования v_{φ}, т. е. $t_{\text{н}} = l_{\text{м}}/(fv_{\varphi})$. Для такого фильтра уменьшается влияние радиационных и собственных шумов приемной системы локатора.

Для локационных систем с фильтрами второго типа, к которым можно отнести приемные устройства, использующие линейки приемников с расположением отдельных элементов перпендикулярно направлению сканирования, оптимизирована форма распределения чувствительности приемных элементов линейки и синтезированы передаточные характеристики временных фильтров [10, 11]. Рассмотрены методы хранения отсчетов яркости для сканирующих систем обнаружения летательных аппаратов при просмотре всей небесной полусферы. Предложен метод формирования координатной сетки выборок с упорядоченной структурой, основанный на представлении поля обзора гексагонально расположенными отсчетами. Пример формирования такой сетки отсчетов представлен на рис. 7. Предложенный подход позволяет в $\pi/2$ раза умень-



а *б*

Рис. 7. Сетка отсчетов с упорядоченной структурой
(*а* – вид сбоку, *б* – вид сверху)

шить объем требуемой памяти по сравнению с хранением отсчетов в цилиндрической координатной сетке.

Для некоторых типичных случаев оценены предельно достижимое с помощью линейной фильтрации отношение сигнал/шум и рассчитаны параметры пространственно-временных фильтров. Полученные соотношения, параметры и достижимые характеристики приведены в [1, 11].

Внедрение в локационные системы современных линеек и матриц инфракрасных фотоприемников потребовало создания методов определения их характеристик, что необходимо для оценки пригодности этих многоэлементных фотоприемников для работы в составе систем обнаружения. Были разработаны методы оценки квантового выхода, коэффициента преобразования фотогенерированного заряда и определения параметров собственных шумов многоэлементных приемников, а также программные средства для оценки статистических характеристик собственных шумов фотоприемников на приборах с зарядовой связью, которые позволяют локализовать местоположение источников возникновения аномальных собственных шумов и определить частоты тактовых помех. В качестве примера на рис. 8 приведено трехмерное изображение модуля пространственного спектра однородного фона, зарегистрированного матрицей фотоприемников, анализ которого позволяет установить неоптимальность условий переноса зарядов из вертикальных сдвиговых регистров в горизонтальный и наличие проникновения в видеосигнал тактовой помехи из счетчика.

Дискретизация изображений многоэлементными приемниками вызывает определенные затруднения при оптимизации алгоритмов обнаруже-

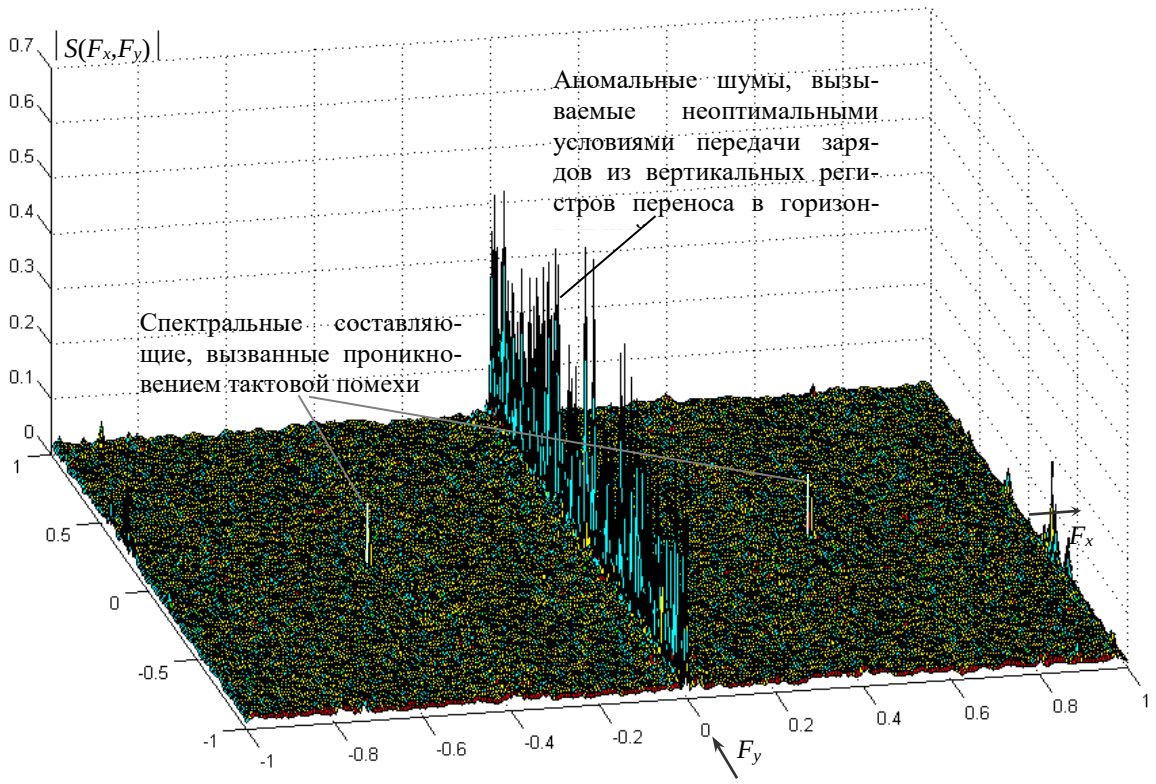


Рис. 8. Модуль пространственного спектра изображения однородного фона, полученного матрицей фотоприемников

ния и оценки положения удаленных объектов, а также характеристик приемного объектива. Например, сдвиг центра изображения точечного источника относительно середины ближайшего пиксела вызывает перераспределение накапливаемого ячейками матрицы заряда и требует использования при оценке координат наблюдаемого объекта набора пространственных фильтров, каждый из которых оптимизирован на его конкретное положение. Такой подход многократно увеличивает объем требуемых вычислений. Поэтому разработаны упрощенные алгоритмы, позволяющие при небольших ухудшениях характеристик обнаружения по сравнению с оптимальными проводить оценку положения объекта на доступных микропроцессорных наборах с темпом поступления видеоданных, характерных для современных видеосистем.

3. Методы построения поисково-обзорных ОЛС высокого пространственно-временного разрешения

Предельные характеристики, в том числе и дальность действия оптико-локационных систем определяются энергетическими параметрами излучателя, пороговой чувствительностью фотоприемного устройства,

характеристиками среды распространения излучения и объекта локации, возможностями электронной системы обработки больших массивов информации. Традиционные способы повышения точностных характеристик ОЛС требуют увеличение габаритов и чувствительности приемной оптической системы, мощности излучателя, повышение временного разрешения и быстродействия электронной системы обработки локационной информации. При заданных энергетических параметрах системы улучшения точности измерений можно достигнуть также путем оптимизации методов формирования и обработки локационных сигналов. В научных работах сотрудников кафедры задача улучшения точностных характеристик ОЛС, таких как вероятность ложной тревоги и правильного обнаружения, время обнаружения и измерения параметров движения, пространственно-временное разрешение и др., решалась за счет использования новых методов формирования и обработки зондирующих сигналов, учета условий распространения излучения и параметров объекта локации.

В современных ОЛС при приеме отраженного зондирующего излучения эффективно применяется лазерное гетеродинирование благодаря созданию надежных одномодовых лазеров с узкой спектральной линией. Методы гетеродинного приема, наряду со значительным увеличением чувствительности по сравнению с прямым детектированием (до двух порядков), обеспечивают эффективную спектральную и пространственную фильтрацию полезного сигнала, отраженного от движущегося объекта, при наличии достаточно мощных отражений излучения от фоновых образований. Наряду с выбором оптимальных параметров источника излучения и способа регистрации отраженного сигнала для построения высокоэффективных поисково-обзорных ОЛС необходимо использовать оптимальные методы формирования и обработки локационных сигналов. В таких системах целесообразно использование непрерывного частотно-модулированного зондирующего излучения. Это позволяет обеспечивать необходимую скорость просмотра анализируемой области пространства с заданной вероятностью пропуска сигнала, недостижимую для импульсных локаторов, а также необходимую дальность действия и пространственно-временное разрешение за счет обеспечения более высокой чувствительности при фотогетеродинном приеме и возможности обработки локационных сигналов согласованными фильтрами.

По виду модуляции зондирующего и гетеродинного излучения можно выделить три типа локаторов:

1. Системы с частотно-модулированным зондирующим сигналом и переменной частотой гетеродина, в качестве которого обычно применя-

ется смещенный по частоте зондирующий сигнал. В таких системах девиация частоты на выходе фотоприемника определяется дальностью до объекта, а смещение средней частоты - эффектом Доплера.

2. Системы с одним частотно-модулированным зондирующим сигналом и постоянной частотой излучения гетеродина, в которых величина сдвига частоты радиосигнала на выходе фотоприемника определяется скоростью объекта, а задержка – дальностью.

3. Системы с двумя частотно-модулированными зондирующими сигналами и постоянной частотой гетеродина, в которых с помощью преобразования выходных сигналов фотоприемника образуются частотно-модулированные сигналы для измерения дальности и скорости.

Основным достоинством ОЛС первого типа является простота генерации зондирующего лазерного сигнала и обработки отраженного, достаточно высокое разрешение по дальности и скорости. Однако они имеют невысокую чувствительность, поскольку сигнал после фотосмешения обладает переменными параметрами, что затрудняет применение методов согласованной фильтрации. Другим недостатком является невозможность разрешения параметров двух или нескольких объектов, одновременно попадающих в поле зрения, а также низкая защищенность от искусственных помех. Таким образом, применение таких систем оправдано лишь при лоцировании одного контрастного объекта и нецелесообразно при построении поисково-обзорных ОЛС.

3.1. Одночастотные поисково-обзорные ОЛС

Одночастотные локационные системы второго типа, использующие частотную модуляцию зондирующего сигнала и постоянную частоту гетеродина, позволяют производить обработку полученного в результате гетеродирования радиосигнала согласованными фильтрами, что существенно улучшает их чувствительность и помехозащищенность по сравнению с первым типом ОЛС. Такие локаторы позволяют разрешать несколько объектов, одновременно попадающих в поле зрения, производить селекцию по скорости движения, обнаруживать медленно перемещающиеся объекты на фоне неподвижных окружающих предметов с такой же отражающей способностью.

Разработан способ обнаружения и определения скорости объекта и дальности до него, основанный на пилообразной частотной модуляции зондирующего излучения с последующим фотогетеродинированием отраженного от объекта излучения и обработкой полученного сигнала при помощи двух фильтров, согласованных с линейно-частотно-модулиро-

ванными сигналами, имеющими противоположные знаки крутизны перестройки частоты [12]. По временному положению откликов согласованных фильтров рассчитываются дальность и скорость. При этом диапазон измеряемых скоростей ограничен величинами, при которых доплеровский сдвиг частоты отраженного излучения выходит за пределы рабочего частотного диапазона согласованных фильтров. Если же диапазон измеряемых скоростей неизвестен, то возникает необходимость использовать несколько параллельных каналов обработки, либо вводить компенсацию доплеровского сдвига частоты с помощью дополнительного гетеродина. В режиме поиска с помощью системы спектрального анализа определяется доплеровский сдвиг частоты отраженного излучения. Затем система переходит в режим измерения скорости и дальности, в котором производится симметричная пилообразная модуляция частоты излучения лазера и одновременно компенсация доплеровского сдвига частоты радиосигнала при помощи смесителя и генератора, управляемого сигналом с блока спектрального анализа. Определение скорости и дальности производят по временному положению откликов с двух согласованных фильтров с противоположными значениями крутизны, причем дальность определяют по средней величине задержки возникновения обоих импульсов, а скорость – по разности этих задержек с учетом значения частоты на выходе управляемого генератора [12].

В одночастотном способе локации объектов с немодулированным (в режиме обнаружения) зондирующим излучением [13], достигается уменьшение, по сравнению с известными, времени обнаружения объекта и измерения его скорости и дальности и улучшение помехоустойчивости. Сущность способа заключается в последовательном осуществлении двух операций: первая – обнаружение объекта с одновременным измерением его скорости, вторая – измерение дальности до объекта по задержке частотно-модулированного сигнала на дистанции. Для технической реализации предложенного способа разработана система спектрального анализа доплеровских локационных сигналов, использующая методы согласованной фильтрации. Сигнал на выходе согласованного фильтра, определяющий амплитудно-частотный и фазочастотный спектры входного сигнала в зависимости от величины временного параметра θ будет иметь вид

$$W(t) = [0,5U^2\tau_u e^{-j(2\pi f_o t+\beta\Theta^2)}]\frac{\sin\pi\Delta f\,(\Delta t-\Theta)}{\pi\Delta f\,(\Delta t-\Theta)}, \quad f=\frac{\beta\Theta}{\pi} \qquad (15)$$

где τ_u , Δf - длительность импульсной характеристики и девиация частоты согласованного фильтра, $\beta = \Delta f/\tau_u$, U – амплитуда.

Разработан метод построения генератора линейно-частотно-модулированных сигналов с автоподстройкой параметров модуляции по методу цифрового преобразования [14, 15]. Использование в системе спектрального анализа методов согласованной фильтрации, высокостабильного ЛЧМ-генератора и разработанного малошумящего широкополосного усилителя с большим динамическим диапазоном [16] позволило достигнуть предельной чувствительности системы.

Произведено обоснование выбора порога обнаружения локационного сигнала в поисково-обзорной ОЛС с заданными вероятностями ложной тревоги и правильного обнаружения [13]. Частота появления ложных тревог при обнаружении сигнала по двум импульсам с согласованного фильтра с одинаковым временным положением относительно начала анализа за 3, 4 или 5 периодов анализа равна:

$$\begin{gathered} f_3^{(2)}(C_1,T_1) = N_\Sigma(C_1,T_1)/T_1, \\ f_4^{(2)}(C_1,T_1) = 1.5\,N_\Sigma(C_1,T_1)/T_1, \\ f_5^{(2)}(C_1,T_1) = 2\,N_\Sigma(C_1,T_1)/T_1 \end{gathered} \qquad (16)$$

где, $N_\Sigma(C_1,T_1) = (4/6)\,\pi\tau\Delta F\,C_1^2/\sigma^2 \exp(-C_1^2/\sigma^2)$, C_1 – порог обнаружения, σ – дисперсия шума, T_1 – время наблюдения. Для согласованного фильтра с $\tau = 50$ мкс и $\Delta F = 10$ МГц величина $N_\Sigma = 155\,C_1^2/\sigma^2 \exp(-C_1^2/\sigma^2)$.

На рис. 9 и рис. 10 представлены зависимости частоты ложных тревог $F_{\text{л.т.}}$ и вероятности правильного обнаружения $P_{\text{п.о.}}$ от нормированного значения порога $y_\text{п} = C/\sigma$ и сигнала $y_c = U/\sigma$ при обнаружении сигнала по одному или двум импульсам с согласованного фильтра с одинаковым временным положением за 2, 3, 4 или 5 периодов анализа.

Разработаны принципы построения многоканального информационно-измерительного комплекса для одночастотной локационной системы [13], обеспечивающей два основных режима работы: режим поисково-обзорного сканирования по азимуту в заданном диапазоне углов; и режим слежения за одним объектом. Показано, что для повышения помехоустойчивости локационной системы при обработке доплеровских сигналов целесообразно применение схемы ограничения ложных тревог, использующей принцип нескольких периодов анализа сигнала.

Таким образом, разработанные одночастотные ОЛС обладают высокой чувствительностью и помехозащищенностью, позволяют разрешить несколько объектов, одновременно попадающих в поле зрения, производить селекцию по скоростям. Однако это справедливо лишь для случая, если известен диапазон измеряемых скоростей или скорости объектов изменяются в небольших пределах. Если же диапазон скоростей неизвестен, то возникает необходимость использовать несколько параллельных каналов обработки, либо вводить компенсацию доплеровского сдвига

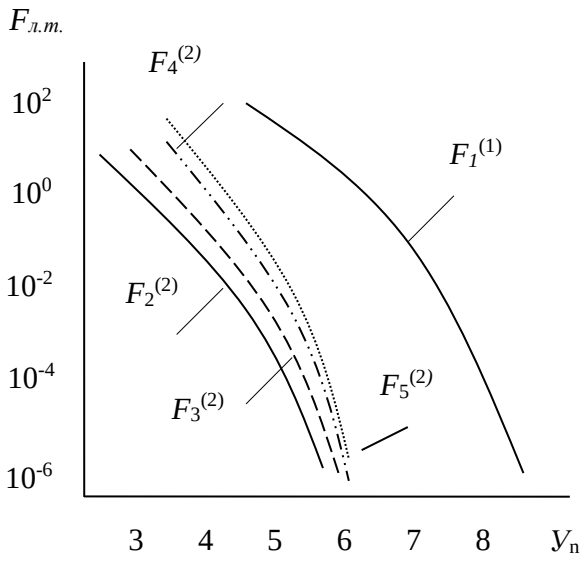


Рис. 9. Зависимость частоты ложных тревог от нормированного значения порога $y_п = C/\sigma$.

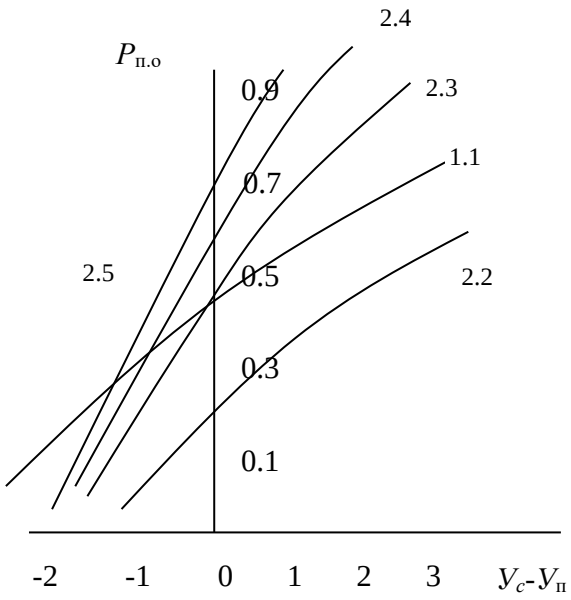


Рис. 10. Зависимость вероятности правильного обнаружения от разности нормированных значений порога $y_п$ и сигнала $y_с$.

частоты с помощью дополнительного гетеродина. Этого недостатка лишены локационные системы с двумя зондирующими сигналами.

3.2. Методы построения двухчастотных ОЛС

В двухчастотных локационных системах осуществляется компенсация доплеровского сдвига частоты, что позволяет одновременно производить обнаружение и измерение дальности до объектов со значительно различающимися скоростями движения, что особенно важно в ИК и видимом диапазонах, где доплеровские сдвиги велики. Более того, для двухчастотной системы возможно увеличение отношения сигнал/ шум на выходе, по сравнению с его значениями для одночастотной, из-за уменьшения шумовой полосы [17].

Разработана локационная система [17], реализующая двухчастотный метод построения. На дистанцию посылаются два зондирующих сигнала: первый – немодулированный, второй – линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ). Отраженное от объекта излучение попадает на фотоприемник, где смешивается с немодулированным гетеродинным сигналом. После оптимальной обработки сигнала фотоприемника с использованием согласованных фильтров на его выходе системы появится сигнал вида:

$$U_S = \frac{\sin[T-(t-\tau)]\beta T/2}{\beta(t-\tau)}\cos\omega_o t + \frac{\sin[T-(t-\tau-\frac{2\omega_D}{\beta})\beta T/2]}{\beta(t-\tau-\frac{2\omega_D}{\beta})}\cos\omega_o t \quad (17)$$

где T – длительность импульсной характеристики согласованного фильтра, $\tau = 2D/c$ (D – расстояние до объекта, c – скорость света), ω_D – доплеровский сдвиг частоты, ω_o – начальная частота ЛЧМ сигнала, β – скорость изменения частоты.

Сигнал, соответствующий первому слагаемому формулы (17), задержан относительно модулирующего сигнала на τ. Очевидно, что его временное положение характеризует дальность до объекта. Временное положение второго слагаемого сдвинуто относительно времени появления первого на $2\omega_D/\beta$, и, следовательно, характеризует скорость объекта. В зависимости от знака радиальной скорости импульс для определения скорости будет возникать раньше импульса для измерения дальности (для приближающегося объекта) или позже (для удаляющегося). При использовании фильтров с длительностью импульсной характеристики порядка 50 мкс, погрешность измерения дальности составляет 5 м, а скорости 0,1 м/с. Диапазон скоростей наблюдаемых объектов определяется полосой пропускания фотоприемника и усилителя и при полосе 100 МГц имеет величину порядка 500 м/с.

В описанной двухчастотной ОЛС с немодулированными и частотно-модулированными зондирующими сигналами информация о дальности до всех объектов, попадающих в поле зрения, будет присутствовать независимо от величины скоростей их движения. Информация о скорости будет присутствовать только для тех объектов, для которых доплеровский сдвиг частоты не превышает половину девиации частоты зондирующего излучения. Для расширения диапазона измеряемых скоростей разработан двухчастотный способ локации с двумя частотно-модулированными зондирующими сигналами с противоположной крутизной перестройки частоты. Отраженное от двигающегося объекта излучение с доплеровским сдвигом частоты ω_D через приемную оптическую систему попадает на фотоприемник, где смешивается с гетеродинным излучением. При этом на выходе фотоприемника образуется радиосигнал, содержащий две частотные составляющие. При поступлении этих составляющих на нелинейный элемент на его выходе образуются сигналы, определяемые суммой U_S, и разностью U_R частотных составляющих

$$U_S(t) = U_m^{'}\sin[\omega_o + 2\beta(t-\tau)], \quad U_R(t) = U_m^{''}\sin[2\omega_n + \omega_o + 2\omega_D]. \quad (18)$$

Сигнал U_S представляет собой ЛЧМ-импульс, не имеющий доплеровского сдвига частоты, задержка которого определяется только дальностью до объекта. Сигнал U_R определяется только доплеровским сдвигом частоты. Обрабатывая ЛЧМ сигнал с помощью согласованного с ним фильтра, измеряется дальность до объекта, и параллельно определяется скорость объекта путем измерения значения доплеровской частоты быстрым спектроанализатором. Очевидно, что такой способ позволяет измерять дальность и скорость объекта за один период зондирующего сигнала, что обеспечивает уменьшение не менее чем в два раза времени измерения по сравнению с одночастотными локаторами, где для этого требуется минимум два периода. Уменьшение времени измерений дает возможность или увеличить скорость обзора, или увеличить время накопления сигнала и, соответственно, повысить дальность действия локатора.

В случае одновременного появления нескольких объектов в поле зрения на выходе системы появятся ЛЧМ-импульсы, временное положение которых определяет дальности до объектов, и доплеровские сигналы, определяющие скорости объектов. Однако при этом возникает проблема идентификации объектов по скорости, т.е. определения объекту на какой дальности принадлежит данная скорость. Эта задача также актуальна в системах лазерного зондирования турбулентных сред, когда необходимо обеспечить одновременное измерение дальности и скорости нескольких рассеивающих неоднородностей при прохождении излучения через среду. В [18] разработан метод построения ОЛС, решающей задачу одновременного измерения дальности и скорости нескольких подвижных слоев при лазерном зондировании различных сред.

Система содержит два измерительных канала дальности и скорости, идентичные по структуре, но отличающиеся тем, что в канал скорости введен П-образный фильтр с полосой пропускания $\Delta F_{\text{п}} = f_{\text{о}} + 2\Delta F$, где $f_{\text{о}}$ – начальный сдвиг частоты между зондирующими сигналами, ΔF – полоса согласованного фильтра. Зондирующее излучение представляет собой два лазерных сигнала, линейно модулированных по частоте с противоположными значениями крутизны перестройки. В результате приема и корреляционной обработки отраженного от объекта излучения на выходе канала скорости формируется сигнал U_v, аналогичный сигналу на выходе канала дальности U_d, но его амплитуда зависит от абсолютной величины доплеровского сдвига частоты

$$U_v = U_d \left(1 - \frac{|f_d|}{\Delta F} \right). \qquad (19)$$

Таким образом, на выходах согласованных фильтров каналов дальности и скорости формируются сигналы, задержка которых определяется только расстоянием до рассеивающих центров, а отношение амплитуд - радиальной скоростью V перемещения этих центров

$$V = \frac{\Delta FC}{2\upsilon_o}\left(1 - \frac{U_v}{U_d}\right). \qquad (20)$$

Возможность одновременного измерения дальности и скорости позволяет за один период модуляции определить непрерывное распределение радиальных скоростей подвижных атмосферных слоев по дальности вдоль линии распространения зондирующего лазерного излучения. Разрешение по скорости локационной системы при расстояниях между рассеивающими центрами, соответствующих по задержке длительности основного лепестка отклика с согласованного фильтра, определяется отношением амплитуды основного лепестка к амплитуде боковых. Для согласованных фильтров с аподизированной импульсной характеристикой подавление боковых лепестков составляет 30...40 дБ, что позволяет получить разрешение 1...3 процента от диапазона измерения скоростей. В случае больших расстояний разрешение определяется погрешностью измерения амплитуды откликов.

Двухчастотные ОЛС имеют несомненные преимущества перед одночастотными, заключающиеся в увеличении чувствительности приема и минимизации вероятности ошибки, особенно при неизвестном диапазоне скоростей. Они обеспечивают выходной радиосигнал на известной разностной частоте, несмотря на доплеровский сдвиг отраженного излучения, что позволяет избежать частотного сканирования гетеродина или приемника, и дает возможность одновременно наблюдать объекты, имеющие значительно различающиеся скорости. Двухчастотные ОЛС обеспечивают измерение параметров движения объекта за один период модулирующего ЛЧМ сигнала, в то время как в одночастотных ОЛС для этого необходимо минимум два периода В условиях доплеровской неопределенности оптимальные условия работы системы реализуются, когда разностная частота зондирующих сигналов максимально близка к полосе усиливаемых частот усилителя, или когда частота гетеродина лежит между частотами зондирующих сигналов.

Заключение

Таким образом, исследованы основные статистические характеристики пространственно-временных флуктуаций естественных яркостных фонов в инфракрасной области спектра, развиты методы и алгоритмы

функционирования пассивных и активных локационных систем оптического диапазона.

Литература

1. *Фираго В. А.* Методы построения инфракрасных систем обнаружения «точечных» источников на фоне естественных яркостных полей. Дис… канд. физ.–мат. наук: 01.04.03. Мн.: БГУ, 1991. 247 с.
2. *Фираго В. А., Ханох Б. Ю., Долинин В. В.* Естественные фоновые помехи в окнах прозрачности атмосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27, № 11. С. 1355–1381.
3. *Фираго В. А., Ханох Б. Ю.* Двухканальный инфракрасный радиометр для исследования характеристик естественных фоновых помех // Изв. вузов. Приборостроение. 1987. Т. 30, № 3. С. 72–78.
4. *Фираго В. А., Ханох Б. Ю., Гилевский С. В.* Методика определения статистических характеристик излучения естественных фонов в окнах прозрачности атмосферы // Методы и средства обработки оптической информации: Матер. семинара. М., 1983. С. 81–86.
5. *Фираго В. А., Ханох Б. Ю.* О погрешностях определения основных статистических характеристик флуктуаций излучения изотропных яркостных полей // Весці АН БССР. Сер. фіз.-мат. навук. 1985. № 4. С. 105–110.
6. *Фираго В. А., Ханох Б. Ю.* Основные статистические характеристики пространственных флуктуаций инфракрасного излучения некоторых яркостных полей // Изв. вузов. Физика. Томск, 1985. 33 с. Деп. В ВИНИТИ 12.05.85. №3216-85.
7. *Фираго В. А., Ханох Б. Ю.* Статистические характеристики некоторых естественных фоновых помех // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29, № 2. С. 281–290.
8. *Фираго В. А.* Анализ характеристик обнаружения «точечных» объектов оптико-электронными системами поисково-обзорного и следящего типов с линейными пространственно-временными фильтрами // Лазерная и оптико-электронная техника: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 2. Мн.: Белгосуниверситет, 1992. С. 226–237.
9. *Фираго В. А.* Синтез и исследование характеристик линейных пространственно-временных фильтров для обнаружения «точечных» объектов на фоне естественных яркостных полей // Лазерная и оптико-электронная техника: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 2. Мн.: Белгосуниверситет, 1992. С. 217–225.
10. *Фираго В. А.* Анализ влияния параметров фоновых помех, приемника излучения и объектива на отношение сигнал/шум на выходе пространственно-временных фильтров оптических систем // Лазерная и оптико-электронная техника: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 1. Мн.: Белгосуниверситет, 1989. С. 196–201.
11. *Фираго В. А.* Синтез и исследование характеристик линейных пространственно-временных фильтров для обнаружения «точечных» объектов на фоне естественных яркостных полей // Лазерная и оптико-электронная техника: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 2. Мн.: Белгосуниверситет, 1992. С. 217–225.
12. А.с. № 1661572 СССР. Устройство для измерения дальности и скорости объектов. В. Л. Козлов, В. А. Фираго, А. Ф. Шилов. 1991. Бюл. № 25.
13. *Козлов В. Л., Фираго В. А., Шилов А. Ф.* Быстрый последовательный спектроанализатор доплеровских сигналов // Лазерная и оптико-электронная техника: Межвуз. сб. науч. тр. Мн.: Университетское, 1989. С. 202–207.

14. А. с. № 1631698 СССР. Генератор с линейной частотной модуляцией. В. Л. Козлов, В. А. Фираго, А. Ф. Шилов. 1991. Бюл. № 8.
15. Генератор линейно-частотно-модулированных сигналов с автоподстройкой параметров / В. А. Фираго, В. Л. Козлов, К. Н. Коростик, Е. Д. Карик // ПТЭ. 1990. № 3. С. 91–94.
16. *Фираго В. А., Козлов В. Л., Шилов А. Ф.* Широкополосный усилитель с быстродействующей автоматической регулировкой усиления // ПТЭ. 1986. № 2. С. 116–117.
17. *Козлов В. Л., Фираго В. А., Шилов А. Ф.* Двухчастотная локационная система с согласованной фильтрацией зондирующего сигнала // Лазерная и оптико-электронная техника. Сб. науч. ст. Мн.: Университетское, 1993. С. 193–197.
18. А.с. № 1780070 СССР. Устройство для измерения распределения скоростей подвижных слоев по дальности. В. А. Фираго, В. Л. Козлов, И. А. Малевич. 1992. Бюл. № 43.