

RADAR, THE PHYSICAL BASES AND PROBLEMS

A. I. KOZLOV

The physical principles of modern radar are considered, and the main problems of radar are formulated. Tracking problems are shown, and the methods for solving of these radar tracking problems are examined. Methods of improving accuracy, representations about non-classical types of radar, and peculiarities of their application are given.

Рассматриваются физические принципы, лежащие в основе современной радиолокации. Формулируются основные проблемы и задачи, а также устанавливаются пути их решения. Даются представления о неклассических видах радиолокации и особенностях их применения.

РАДИОЛОКАЦИЯ. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРОБЛЕМЫ

А. И. КОЗЛОВ

Московский государственный технический университет
гражданской авиации

ВВЕДЕНИЕ

Где-то в пятидесятые годы большинство жителей нашей страны впервые услышали слово “радиолокация”. Оно произносилось, как правило, тихим голосом, с большим почтением и уважением к этому слову и несло в себе элемент того, что произносивший это слово причастен к каким-то высшим либо военным, либо научным секретам. Массовые популярные публикации того времени в газетах и журналах, детективные повести и фильмы убеждали читателей и зрителей в существовании очень сложного, способного сотворить чудо средства, которое позволит защитить наше небо от непрошенных гостей, дать возможность самолетам летать в любую погоду, при любой видимости и видеть все, что творится в небесах, на земле и на море. Но шло время и, как это всегда бывает, массовый интерес к радиолокации угас, его вытеснили новые научные и технические успехи, а сама радиолокация стала оформляться в строгую научную дисциплину с четко очерченными границами возможностей и приложений.

Сегодня мы имеем, с одной стороны, классическую учебно-научную дисциплину, вошедшую в обязательную программу подготовки специалистов в области радиотехники, с другой стороны, — удивительные по своим возможностям различные многочисленные радиолокационные станции и устройства, действительно способные совершить невозможное и “увидеть” то, что в житейском плане в принципе невозможно “увидеть”.

Конечно, очень трудно в одной статье рассказать о всех достижениях и проблемах радиолокации, а поэтому я постараюсь дать представление о физических принципах, которые заложены в радиолокации, ее возможностях и некоторых проблемах, которые стоят перед ней как наукой, а также проиллюстрировать некоторые достижения в области радиолокационной техники рядом примеров.

КАКИЕ ЗАДАЧИ РЕШАЕТ РАДИОЛОКАЦИЯ

Рассмотрение начнем с постановки основной задачи радиолокации. Эту задачу можно сформулировать следующим образом:

Пусть наблюдатель находится в точке $\mathbf{0}$, он хочет узнать, что находится в некоторой другой точке $\mathbf{1}$ и какими физическими и геометрическими характеристиками “это” обладает. Чем располагает наблюдатель? Он имеет возможность излучать радиоволны и концентрировать при помощи антенны основную долю излучаемой энергии в заданном направлении. (Принципиальный момент: несмотря на то что основной поток энергии каким-то образом сконцентрирован в пространстве, энергия излучается по всем направлениям без исключения.) Наблюдатель имеет возможность принимать отраженные радиоволны с требуемого направления. (Принципиальный момент: прием отраженных радиоволн осуществляется тем не менее со всех направлений без исключения.) Наблюдатель также может обладать определенными сведениями об объекте наблюдения (радиолокационная цель) и об окружающей среде.

Сказанное позволяет отнести радиолокацию к классу задач дистанционного зондирования.

Рассмотрим теперь, какие физические процессы происходят при осуществлении радиолокационного зондирования.

Итак, наблюдатель излучает радиоволну, которая, спустя какое-то время, достигает точки $\mathbf{1}$, где наводит на исследуемом объекте электрические и магнитные токи, которые, в свою очередь, порождают радиоволны, распространяющиеся по всем направлениям, в том числе и в направлении на точку $\mathbf{0}$. Отраженная радиоволна достигает точки $\mathbf{0}$, где в приемнике радиолокационной станции вызывает появление соответствующего сигнала (тока, напряжения). Ясно, что вся получаемая информация о наблюдаемой цели может быть получена только из сравнения излученного и принятого сигналов. Будучи извлеченной, эта информация будет выражаться на языке электрических сигналов, а не на языке каких-либо физических или геометрических характеристик цели. Перевод с одного языка на другой — это другая самостоятельная задача.

КАКИЕ СИГНАЛЫ ИСПОЛЗУЮТСЯ В РАДИОЛОКАЦИИ

В радиолокации используются радиоволны с длиной волны, приходящейся на сантиметровый (реже дециметровый) и миллиметровый диапазоны. Сам же вид излучаемого сигнала оказывается достаточно прост. Как правило, это последовательность коротких во времени импульсов, следующих один за другим через время, много превосходящее длительность этих импульсов. Ширина спектра таких сигналов Δf в подавляющем большинстве случаев оказывается во много раз меньше несущей частоты излучаемого сигнала f_0 , то есть у радиолокационных сигналов (за исключением особых случаев) отношение $\Delta f/f_0 \ll 1$. Для функций $U(t)$, обладающих таким

свойством (узкополосные сигналы), как это впервые показал Гильберт, допустимо представление

$$U(t) = A(t)\cos(2\pi f_0 t + \varphi(t)), \quad (1)$$

где $A(t)$ и $\varphi(t)$ — медленно за период высокой частоты $T = 2\pi/f_0$ меняющиеся во времени функции.

Оказывается, такое на вид простое представление, каковым является выражение (1), несет в себе серьезную проблему, превращающую радиолокацию с точки зрения решения стоящих перед ней задач в класс особых наук, что крайне принципиально.

ЧТО ПРОИСХОДИТ ПРИ ОТРАЖЕНИИ РАДИОВОЛН

Отраженная радиоволна, естественно, будет также иметь вид, определяемый равенством (1). Если цель неподвижна, то частота отраженного сигнала не изменится, а изменения претерпят лишь его амплитуда и фаза.

Облучению подвергнутся также все остальные цели и, в частности, те из них, которые расположены на том же расстоянии от радиолокационной станции (назовем эти цели, например, $\mathbf{2}$ и $\mathbf{3}$), что и исследуемая цель $\mathbf{1}$.

Естественно, что радиоволны, отраженные от целей $\mathbf{1}$, $\mathbf{2}$ и $\mathbf{3}$, одновременно достигнут точки $\mathbf{0}$, где расположена радиолокационная станция. В этом случае сигнал в точке $\mathbf{0}$ найдется простым сложением трех сигналов типа того, что определено равенством (1). Это значит, что и суммарный сигнал будет также иметь тот же вид, что и представление (1), независимо от того, присутствует или отсутствует обнаруживаемая цель.

Это значит, что независимо от ситуации наличия или отсутствия цели в общем случае на входе радиолокационного приемника всегда присутствует сигнал одного и того же вида — квазигармоническое колебание.

ЧТО НЕСЕТ В СЕБЕ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Следующий важный вопрос состоит в том, чтобы выяснить, а что вообще несет в себе радиолокационная информация, то есть, иными словами, а что вообще можно получить из радиолокационных измерений. Для получения ответа на этот вопрос отвлечемся от воздействия помех и влияния среды распространения радиоволн. Чтобы такая картина представлялась реальной, можно просто считать, что интенсивность волны, отраженной от исследуемой цели, существенно превосходит соответствующие величины для помехового сигнала.

Итак, приступим к поиску ответа на поставленный вопрос. Для этого прежде всего выберем некоторую ортогональную систему координат (X, Y) , в которой в дальнейшем будем проводить анализ

протекающих процессов. Сначала будем считать, что излучается радиоволна, у которой электрический вектор \mathbf{E}_{rad} имеет только X -компоненту (горизонтальная поляризация). Если не накладывать никаких дополнительных ограничений, то электрический вектор отраженной радиоволны \mathbf{E}_{ref} в общем случае будет иметь иную, чем вектор \mathbf{E}_{rad} , ориентацию в пространстве. Иными словами, в выбранной системе координат поле \mathbf{E}_{ref} будет иметь два компонента $(E_X)_{\text{ref}}$ и $(E_Y)_{\text{ref}}$. Ясно также, что между интенсивностями отраженной и излученной радиоволн (а стало быть, между длинами векторов \mathbf{E}_{ref} и \mathbf{E}_{rad}) имеет место прямая пропорциональность. Это приводит к тому, что $(E_X)_{\text{ref}}$ будет пропорционально $(E_X)_{\text{rad}}$, прямая пропорциональность будет также между $(E_Y)_{\text{ref}}$ и $(E_X)_{\text{rad}}$.

Обозначим соответствующие коэффициенты пропорциональности соответственно S_{XX} и S_{XY} , то есть

$$\begin{aligned}(E_X)_{\text{ref}} &= S_{XX}(E_X)_{\text{rad}}, \\ (E_Y)_{\text{ref}} &= S_{XY}(E_X)_{\text{rad}}.\end{aligned}\quad (2)$$

Если вернуться к представлению радиолокационного сигнала в виде выражения (1), то у каждого из компонентов отраженной радиоволны в общем случае после отражения от цели появится некий фазовый сдвиг по отношению к излученной радиоволне.

Запишем временное представление для ортогональных компонентов электрического вектора отраженной радиоволны в следующем виде:

$$\begin{aligned}(E_X(t))_{\text{ref}} &= S_{XX}A(t)\cos(2\pi f_0 t + \varphi(t) + \psi_{XX}), \\ (E_Y(t))_{\text{ref}} &= S_{XY}A(t)\cos(2\pi f_0 t + \varphi(t) + \psi_{XY}).\end{aligned}\quad (3)$$

Как видно из формулы (3), при облучении цели горизонтально поляризованной радиоволной отраженная радиоволна определяется некоторыми четырьмя параметрами, характеризующими радиолокационную цель: S_{XX} , S_{XY} , ψ_{XX} , ψ_{XY} .

К аналогичному результату мы придем, если будем рассматривать радиоволну, имеющую лишь одну Y -компоненту (вертикально поляризованная радиоволна). В этом случае мы выйдем на другие четыре характеристики радиолокационной цели: S_{YY} , S_{YX} , ψ_{YY} , ψ_{YX} .

В общем случае, если излученная радиоволна имеет произвольную поляризацию, то есть два компонента электрического вектора $(E_X)_{\text{rad}}$ и $(E_Y)_{\text{rad}}$, полное описание радиолокационной цели может быть проведено при помощи упомянутых выше восьми чисел.

Однако, как это следует из электродинамики, перекрестные элементы в перечисленном перечне характеристик оказываются равными, то есть $S_{XY} = S_{YX}$ и $\psi_{XY} = \psi_{YX}$. Сказанное означает, что цель описывается не восьмью, а шестью числами. Если опираться на реальности измерений, то сомнительной

представляется надежность абсолютных измерений амплитуд и фаз. Именно поэтому речь, конечно, может идти об относительных измерениях, а стало быть, об относительных и нормированных характеристиках. При таком подходе число определяющих радиолокационную цель параметров сокращается до четырех, в качестве которых могут, например, выступать следующие: S_{XX}/S_{YY} , S_{XY}/S_{YX} , $\psi_{XX} - \psi_{YY}$, $\psi_{XY} - \psi_{YX}$.

ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕМЕНТ РАЗРЕШЕНИЯ

Казалось бы, мы имеем даже определенное преимущество по сравнению с наблюдением в оптическом диапазоне, где объект характеризуется двумя числами: яркостью (коэффициентом отражения) и цветом (какая-либо количественная характеристика цвета). Однако дело обстоит далеко не так. Прежде всего заметим, что в подавляющем большинстве используемых на практике радиолокационных станций (РЛС) измеряемым параметром является всего лишь одно единственное число – коэффициент отражения. Однако это не самое главное при сравнении с оптическими устройствами. Главное же состоит в следующем.

В любой рассматриваемый момент времени на входе приемного устройства формируются сигналы, порожденные радиоволнами, отраженными от различных целей, находящихся на одинаковом расстоянии R от точки приема. Прием отраженных радиоволн антенной в основном осуществляется в пределах некоторого телесного угла $\Delta\Omega$, для количественной оценки которого можно использовать два плоских угла $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ в двух взаимно перпендикулярных сечениях этого телесного угла. (Величина каждого из углов $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ определяется отношением λ/d длины волны λ к линейному размеру антенны d в соответствующих сечениях.)

Таким образом, на выходе приемной антенны возникают токи, обязанные своим происхождением электрическим и магнитным токам, возбужденным падающей волной на прямоугольной площадке с линейными размерами $R\Delta\alpha \times R\Delta\beta$, находящейся от антенны на расстоянии R . Принципиальное отличие оптики от радиолокации заключается в размерах этой площадки. Для больших наземных радиолокационных станций углы $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ составляют десятки угловых минут, что соответствует отношению λ/d порядка $(3 - 5) \cdot 10^{-3}$. На расстоянии 50 км от антенны для этого случая линейный размер площадки составит величину порядка 400 – 600 м. В данном примере речь идет об очень больших и весьма редких антеннах. Для большинства же антенн сантиметрового диапазона отношение λ/d примерно равно 0,03 – 0,05, что на порядок хуже приведенного примера. Для оптики при диаметре антенны всего лишь в 1 см искомое отношение составляет величины порядка 10^{-5} , а поэтому размеры

рассматриваемой площадки для оптики оказываются принципиально иными.

Не вдаваясь в подробности, а сославшись лишь на авторитет великого Рэля, следует отметить, что все объекты, расположенные вдоль одного направления в пределах дальности, равной $c\tau/2$, будут восприниматься наблюдателем как один объект (здесь c — скорость света, τ — длительность зондирующего импульса). Для ориентировки проведем оценочный расчет этой величины. Если использовать “обычный” радиолокатор, то для него длительность импульса следует принять равной на уровне 1 мкс; это для искомого размера даст величину порядка 150 м, что весьма существенно.

Таким образом, все объекты, находящиеся в пределах параллелепипеда с размерами $R\Delta\alpha \times R\Delta\beta \times c\tau/2$ (этот параллелепипед носит название разрешаемого объема, или элемента разрешения) будут восприниматься как одна цель.

Из проблемы уменьшения этого объема вытекают почти все проблемы радиолокации.

КАК УЛУЧШИТЬ ОБНАРУЖЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ

Даже в рамках неизменного элемента разрешения имеются дополнительные возможности для улучшения обнаружения находящихся там радиолокационных целей. К достаточно эффективным следует отнести поляризационные методы. Их суть сводится к следующему. При изменении вида поляризации излучаемой радиоволны происходит изменение мощности отраженной радиоволны. Ясно, что всегда найдется такой вид поляризации зондирующей радиоволны, при которой отношение мощностей радиоволн, отраженных от исследуемой цели и фоновых объектов, находящихся в элементе разрешения, будет максимально. Теоретические расчеты и экспериментальные результаты показывают, что увеличение радиолокационного контраста для многих типичных ситуаций в среднем составляет 5 — 8 децибел, достигая в отдельных случаях 20 децибел и более. Существенный рост контраста дает возможность соотносить измеренные элементы матрицы рассеяния с исследуемой радиолокационной целью.

До сих пор речь шла о неподвижных по отношению к радиолокационной станции целях. В случае их движения отраженный сигнал (эффект Доплера) имеет другую по отношению к исходному сигналу частоту, которая отличается от основной частоты на величину, пропорциональную отношению радиальной составляющей скорости цели к длине волны. Если в элементе разрешения движущейся является только исследуемая цель, то, осуществляя прием отраженных радиоволн на частотах, не совпадающих с частотой зондирующего сигнала, можно разделить сигналы, идущие от исследуемой цели и от окружающего его фона. (Это направление получило

в радиолокации название селекции движущихся целей (СДЦ). Системами СДЦ снабжены очень многие современные радиолокационные станции (РЛС).)

Наконец есть еще один, хотя и достаточно экзотический, метод повышения радиолокационного контраста. Речь идет о радиолокационных целях, отраженный сигнал от которых содержит частоты, кратные по отношению к частоте зондирующего сигнала — $2f_0$, $3f_0$ и т.д. Таким свойством, как правило, обладают объекты, имеющие ржавчину, трущиеся элементы, контакты и т.п. Если другие объекты такими экзотическими свойствами не обладают, то соответствующий радиолокационный контраст может быть увеличен на десятки децибел.

Вновь вернемся к элементу разрешения. Для уменьшения его размеров по дальности есть только один путь: уменьшить длительность зондирующего сигнала. Современные РЛС специального назначения могут формировать импульсы наносекундной длительности, что обеспечивает разрешение по дальности до десятков сантиметров. Если уменьшение длительности импульсов связано с техническими и конструктивными ограничениями, то проблема уменьшения горизонтального и вертикального размеров элементов разрешения, то есть углов $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$, наталкивается на физическое ограничение, связанное с тем, что углы $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ пропорциональны отношению λ/d . Переход от сантиметрового к миллиметровому диапазону волн дал возможность сократить линейные размеры элемента разрешения в 3 — 5 раз при соответствующем сравнении с сантиметровым диапазоном. Дальнейшее уменьшение длины волны наталкивается на проблему резкого увеличения энергетических потерь радиоволны на трассе распространения вследствие роста поглощения и рассеяния в атмосферных метеорообразованиях. Кроме того, возникающие при этом технические и конструкторские проблемы зажигают красный свет перед волнами короче 1 мм.

Второй путь, связанный с уменьшением отношения λ/d , связан с увеличением линейных размеров антенны. “Лобовая” атака на эти размеры приводит к появлению очень больших антенных систем и конструкций. Однако, поскольку вся “игра” идет на соотношениях между фазами тока в различных точках антенны, а в сантиметровом и миллиметровом диапазонах фазе в 90° соответствуют расстояния, измеряемые миллиметрами и их долями, проблема юстировки таких систем, их защита от температурного расширения, ветрового и дождевого воздействия, колебаний почвы и т.п. представляет собой самостоятельную проблему исключительной сложности. Сказанного достаточно, чтобы понять уникальность таких антенн и их сверхдорогую стоимость при разработке и эксплуатации. Тем не менее такие антенны существуют, но их число в мире исчисляется единицами. Антенны более

скромных размеров размещаются на земле или на передвижных средствах. Однако вполне понятно, что получить у таких антенн отношение λ/d слишком большим (свыше 150 – 200) не представляется реальным.

Для антенн, устанавливаемых на борту летательных аппаратов, эти размеры ограничиваются линейными размерами носителей. Попытка уменьшить угол $\Delta\alpha$ привела к созданию вдольфюзеляжных антенн. Длительное время казалось, что этим исчерпываются все возможности для бортовых радиолокационных станций.

Прорыв произошел в начале шестидесятых годов, когда впервые было обращено внимание на то, что обработка сигнала в антенне по существу сводится к сложению сигналов от различных ее участков с учетом соответствующего набега фазы, вызванного особенностями геометрии антенной конструкции. Это привело к мысли, что такую обработку можно сделать искусственно. С этой целью необходимо последовательно в разных точках пространства произвести измерение амплитуды и фазы напряженности электрического поля, запомнить эти значения, а затем специальным образом их сложить. Реализация этой идеи состоит в том, что упомянутые выше измерения производятся в процессе полета. Это дает возможность искусственно создать антенну, размеры которой определяются расстоянием между первым и последним замерами, то есть в принципе такая антенна может быть практически безграничной.

Здесь мы не будем говорить о тех теоретических и инженерных трудностях, с которыми сопряжена реализация этой идеи. Главное – это то, что названные трудности были успешно преодолены, что привело к созданию принципиально нового класса антенн – антенн с синтезированной апертурой. Радиолокационные станции, работающие с такими антеннами, получили название РЛС с синтезированной апертурой (РСА). В современных РСА удается получить отношение d/λ , исчисляемое несколькими сотнями, а в отдельных случаях даже тысячами. Использование РСА привело к такому сокращению элемента разрешения, что радиолокационное изображение стало приближаться к фотографическому (в фотографии “точка переводится в точку”, в радиолокации “элемент разрешения переводится в точку”). Сегодняшний уровень РСА – это многочастотная РЛС с управляемой поляризацией излучаемой волны, работающая в реальном масштабе времени.

КАКИЕ СИГНАЛЫ ВОЗДЕЙСТВУЮТ НА ВХОД РЛС

Перейдем теперь к рассмотрению процессов, имеющих место после прохождения принятым сигналом антенных трактов и поступлением его на вход радиоприемного устройства РЛС.

Поскольку в радиолокации приходится иметь дело с очень малыми сигналами, интенсивность которых соизмерима с интенсивностью собственных шумов самого радиоприемного устройства РЛС (часто полезный сигнал даже много меньше шумового сигнала), необходимо учитывать, что на вход радиолокационного приемника постоянно воздействует шумовой сигнал, который, как это следует из общей теории, также имеет вид квазигармонического колебания, определяемого равенством (1). При этом его амплитуда и фаза являются случайными функциями времени.

Таким образом, во всех случаях, связанных с наличием или отсутствием цели, и даже в случаях наблюдения свободного пространства, на вход радиоприемного устройства РЛС всегда воздействует некоторое квазигармоническое колебание вида (1) со случайными амплитудой и фазой.

Представим сигнал, воздействующий на вход РЛС, в виде двух слагаемых, первое из которых относится к обнаруживаемому сигналу, а второе ко всем остальным, в том числе и шумовому сигналу:

$$U_{in}(t) = nA_1(t)\cos(2\pi f_0 t + \varphi_1(t)) + A_2(t)\cos(2\pi f_0 t + \varphi_2(t)). \quad (4)$$

В равенство (4) введен параметр n , который в случае наличия цели принимается равным 1 ($n = 1$), а в случае ее отсутствия – равным нулю ($n = 0$).

Равенство (4) позволяет формализовать основную задачу радиолокации и сформулировать ее следующим образом. В уравнении (4) требуется определить значение параметра n и, если $n = 1$, определить характер изменения функций $A_1(t)$ и $\varphi_1(t)$. При этом измерению поддается только функция $U_{in}(t)$. Известными могут считаться некоторые характеристики обнаруживаемой цели, влияющие на характер изменения во времени функций $A_1(t)$ и $\varphi_1(t)$. Слагаемое, связанное с шумовой частью входного сигнала, принципиально неизвестно, так как носит случайный характер, а поэтому функция $U_{in}(t)$ также является случайной функцией времени.

КАК ПРИНИМАТЬ РЕШЕНИЕ О НАЛИЧИИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ

Из сказанного ясно, что строго решить поставленную задачу, то есть решить уравнение (4), принципиально невозможно, тем более по результатам какого-либо разового измерения в какой-то фиксированный момент времени $t = t_1$.

Уравнение (4) позволяет сделать еще ряд принципиальных выводов и заключений.

Прежде всего отметим, что безошибочно ответить на вопрос, чему равен параметр n , то есть ответить на вопрос, есть или нет в разрешаемом элементе обнаруживаемая цель, принципиально невозможно. Этот ответ может носить только характер предположения, количественными оценками которого могут

выступать какие-то вероятности достоверности этого предположения. Следовательно, адекватным математическим аппаратом для задач обнаружения, да и большинства радиолокационных задач, могут выступать методы математической статистики и теории вероятностей.

Второй вывод, вытекающий из рассмотрения уравнения (4), состоит в том, что достоверность заключения о значении параметра n можно увеличить, увеличивая время наблюдения, то есть увеличивая отрезок функции $U_{in}(t)$, подвергающийся анализу.

Наконец еще один вывод, который можно сделать, анализируя с общих позиций уравнение (4), состоит в том, что различие в виде функций $U_{in}(t)$ при наличии или отсутствии цели заключается в различии статистических законов, которым подчиняются случайные функции $U_{in}(t)$.

Попытаемся выяснить, какие принципы необходимо заложить в процесс обработки принятого сигнала, чтобы совершаемые при этом ошибки в ответе на вопрос о наличии или отсутствии цели были каким-то образом минимизированы, а для этого попытаемся разобраться в тех типах ошибок, которые неизбежно возникают в процессе принятия решения о наличии или отсутствии цели.

КАКИЕ ОШИБКИ ВОЗНИКАЮТ ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЯ

Чтобы разобраться в возникающих типах ошибок, рассмотрим простую ситуацию, когда фоновые отражения отсутствуют или ими просто можно пренебречь.

Пусть радиоприемное устройство РЛС производит какую-то обработку принятого сигнала. В этом случае на выходе этого приемника сформируется сигнал, являющийся некоторой функцией от аддитивной смеси принятого сигнала и собственного шума приемного устройства. Это дает возможность выходное напряжение представить в следующем виде:

$$U_{out}(t) = f(U_n(t) + nU_s(t)).$$

В этой формуле $U_n(t)$ — собственный шум радиоприемного устройства, всегда присутствующий в смеси и всегда воздействующий на вход этого устройства; $U_s(t)$ — сигнал, вызванный отражением от обнаруживаемой цели, который присутствует в названной смеси только при наличии цели ($n = 1$) в наблюдаемом элементе разрешения.

Какова бы ни была функция $f(z)$, во всех случаях решение о наличии или отсутствии цели будет приниматься в какой-то фиксированный момент времени $t = t_1$, то есть в результате некоторого разового измерения. Дать же строгий ответ на вопрос, чему равен коэффициент n , принципиальной возможности нет. Как же быть в этом случае? Каково должно быть решающее правило? Как ни странно, ответ на

второй вопрос независимо от способа обработки принимаемого сигнала (вида функции $f(z)$) достаточно прост и очевиден. Единственным возможным решающим правилом может выступать только пороговое правило. Оно сводится к тому, что если входное напряжение $U_{in}(t)$ больше некоторого значения (порогового значения) U_0 , то следует считать, что цель есть; если же имеет место обратная ситуация, то следует признать, что цели нет.

Разобранная ситуация позволяет увидеть, что процедура принятия решения при пороговом правиле, то есть процесс обнаружения, сопровождается ошибками двух типов. Рассмотрим эти ошибки.

При радиолокационном наблюдении возможны две ситуации: первая — в элементе разрешения находится цель (ситуация А), вторая — в элементе разрешения цели нет (ситуация В). В обоих случаях наблюдатель может принять одно из двух решений: либо цель есть (решение 1), либо ее нет (решение 2). Таким образом, возможны четыре варианта, которые условно можно обозначить так: А1, А2, В1, В2. При этом два решения — А1 и В2 — являются истинными, а два других — А2 и В1 — ложными.

Итак, мы имеем дело с двумя типами ошибочных решений: 1) Ложная тревога, когда при отсутствии в элементе разрешения цели принимается решение о ее наличии (вариант В1; соответствующая вероятность называется вероятностью ложной тревоги, она обычно обозначается буквой F). 2) Пропуск цели, когда при наличии цели принимается решение о ее отсутствии (вариант А2; соответствующая вероятность называется вероятностью пропуска цели, она обычно обозначается разностью $1 - D$).

Два других решения являются истинными. 1) Правильное обнаружение, когда при наличии цели принимается решение о ее наличии (вариант А1; соответствующая вероятность называется вероятностью правильного обнаружения, она обычно обозначается буквой D). 2) Правильное необнаружение, когда при отсутствии цели принимается решение об ее отсутствии (вариант В2; соответствующая вероятность называется вероятностью правильного необнаружения, она обычно обозначается разностью $1 - F$).

Какие бы задачи и цели ни стояли перед РЛС, во всех случаях желательно как можно реже принимать ошибочные решения. Однако при пороговом решающем правиле в распоряжении наблюдателя есть только одна-единственная возможность “воздействия” на ситуацию: изменять величину порога U_0 . Рассмотрим, как величина U_0 влияет на вероятности ложных решений, перечисленных выше.

Рост порогового значения U_0 естественно приводит к уменьшению вероятности ложной тревоги, но влечет за собой рост вероятности пропуска цели. Наоборот, уменьшение порогового значения U_0 приводит к уменьшению вероятности пропуска це-

ли, но влечет за собой рост вероятности ложной тревоги.

КОГДА И ПО КАКИМ КРИТЕРИЯМ ПРИНИМАТЬ РЕШЕНИЕ

От чего же зависит выбор порога и кем, и чем он определяется? Уровень вероятностей ложных решений определяется исключительно потребителем радиолокационной информации, исходя из целевого назначения РЛС. В свою очередь, вероятности ложных решений определяют пороговое значение. Таким образом, в конечном счете уровень порога определяет сам потребитель радиолокационной информации. Рассмотрим теперь критерии, которыми руководствуется потребитель радиолокационной информации.

Наличие двух независимых вероятностей ложных решений открывает путь к бесконечному количеству всевозможных критериев оценки эффективности обработки сигналов радиоприемным устройством РЛС, то есть оценки эффективности алгоритма обработки $f(z)$ в формуле (4). В радиолокации принят критерий Неймана–Пирсона, в соответствии с которым при фиксированной вероятности ложной тревоги оценивается вероятность правильного обнаружения. Задача обработки радиолокационного сигнала сводится поэтому к выбору такой функции $f(z)$, при которой в рамках названного критерия максимизируется вероятность правильного обнаружения. Радиоприемное устройство, обеспечивающее максимально возможную вероятность правильного обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги, называется оптимальным по критерию Неймана–Пирсона.

В предыдущих рассуждениях открытым остался вопрос о выборе момента времени t_1 принятия решения. В рассматриваемых задачах есть два характерных момента. Первый из них t_s определяется моментом, когда отраженный от цели сигнал начал воздействовать на вход радиоприемного устройства, и второй момент t_f – момент окончания этого воздействия.

Ясно, что принятие решения ранее времени t_f , то есть при $t = t_1 < t_f$, неразумно, так как при этом теряется информация о сигнале за промежуток времени от t_1 до t_f . Принятие решения после момента времени t_f также неразумно, так как обработка принимаемого сигнала в отсутствие полезного сигнала не приведет к увеличению информации о ситуации. Таким образом, моментом принятия решения должно выступать время t_f , то есть $t_1 = t_f$.

Следующий вопрос заключается в выработке каких-то подходов к определению алгоритма $f(z)$.

Ясно, что при пороговом правиле линейным алгоритм $f(z)$ быть никак не может. Требование его нелинейности выводит на квадратичную обработку принятого сигнала, то есть на уровень энергетических понятий. К такому же выводу можно прийти,

если рассуждать, опираясь на чисто физические представления.

Таким образом, обработка принимаемого сигнала должна сводиться к построению такого радиоприемного устройства, которое будет накапливать энергию полезного сигнала за время наблюдения в период времени с $t = t_s$ до $t = t_f$. Естественно, что при этом будет накапливаться и энергия шумового сигнала, а поэтому синтезируемый алгоритм должен обеспечивать определенную избирательность в этой процедуре, обеспечивая упреждающую роль первого из названных накоплений. Физической основой возможности такой избирательности могут выступать только какие-то априорные знания об исследуемом сигнале.

Из сказанного вытекает фундаментальный вывод, что любой сколь угодно малый по отношению к собственным шумам радиоприемного устройства сигнал может быть выделен из его смеси с этим шумом при достаточно длительном наблюдении за процессом. Подтверждением такого глобального вывода является успешное радиолокационное зондирование Солнца, Юпитера, Венеры, Меркурия и Марса, осуществленное российскими и американскими учеными и специалистами. Отраженный сигнал был в тысячи, если не в миллионы раз меньше собственных шумов радиоприемных устройств РЛС.

Построение алгоритмов обработки радиолокационных сигналов напрямую связано со знанием статистических закономерностей смеси полезного сигнала, фоновых сигналов и собственного шума радиоприемного устройства. Чем более полными и достоверными знаниями располагает исследователь, тем эффективнее работает алгоритм, тем меньшими можно сделать вероятности ложных решений. Именно поэтому так много внимания уделяется разработке различных теоретических моделей и экспериментальным исследованиям по определению этих закономерностей.

ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ И КАК ЕЕ УЛУЧШИТЬ

Следующей важной проблемой, стоящей перед радиолокацией, является обеспечение точности измерения основных параметров и характеристик отраженных радиосигналов, позволяющих определять пространственные координаты и скорость радиолокационной цели, а также расстояние до этой цели.

Обнаружение радиолокационных целей, как уже говорилось, зависит исключительно от энергии отраженного сигнала и не зависит от его вида и формы. Точность же измерения параметров и характеристик принимаемых сигналов зависит не только от их энергии, но и от формы зондирующего сигнала. Из общей теории следует, что для того чтобы обеспечить высокоточное определение дальности и ско-

рости радиолокационной цели, излучаемый сигнал должен иметь как можно большую длительность во времени и иметь как можно более широкий спектр. (Последнее означает требование сложности формы сигнала, его как бы наибольшее отличие от самого простого радиолокационного сигнала, каковым является обычная синусоида.) Таким требованиям удовлетворяют так называемые сложные сигналы, к которым относятся линейно-частотно-модулированные сигналы, сигналы с фазовой манипуляцией, шумоподобные сигналы и ряд других. Формированию и применению таких сигналов посвящены специальные разделы радиолокации. Невозможность изложения всех проблем радиолокации в одной статье не позволяет более подробно остановиться на этом вопросе. Следует обратить внимание на парадоксальный вывод, что наилучшим по критерию точности одновременного измерения дальности до цели и ее скорости является идеальный шумовой сигнал.

КАКИЕ НЕКЛАССИЧЕСКИЕ ВИДЫ РАДИОЛОКАЦИИ СУЩЕСТВУЮТ

В заключительной части статьи очень кратко остановимся на некоторых неклассических видах радиолокации.

Ранее уже упоминалось о нелинейной радиолокации. Несмотря на весьма слабые отраженные сигналы, которые имеют место в этом случае, их накопление в радиоприемном устройстве за приемлемое время делает это направление радиолокации достаточно привлекательным, а зачастую единственным средством обнаружения малоподвижных, слабоконтрастных целей, обладающих соответствующим эффектом, на фоне мощного отражения от подстилающих покровов.

В последние годы большой интерес и заметное применение находит двухпозиционная радиолокация, при которой облучение цели осуществляется из одного пункта, а прием отраженных радиоволн проводится в других пунктах. Такой способ решения радиолокационных задач позволяет обеспечивать более точную навигационную привязку к исследуемому объекту. Иллюстрацией двухпозиционной радиолокации может служить наша повседневная жизнь, когда источником освещения служит Солнце, мы же воспринимаем рассеянный окружающими предметами солнечный свет.

В какой-то степени к двухпозиционной радиолокации можно отнести так называемую вторичную радиолокацию, нашедшую широкое применение в гражданской и военной авиации. Ее суть сводится к тому, что наземный радиолокатор, облучая летательный аппарат, включает бортовую РЛС, которая передает специальную информацию о полете летательного аппарата и о состоянии некоторых его систем.

Как известно, всякое нагретое тело излучает электромагнитные волны различных частот. Максимум интенсивности этого излучения при температурах порядка 300 – 350 К приходится на инфракрасный диапазон волн. Существуют и довольно успешно функционируют РЛС, осуществляющие прием этого излучения. Направление, связанное с использованием этого диапазона носит название ИК-радиолокации. Достоинство ИК-радиолокации состоит в скрытности функционирования РЛС, в трудностях постановки помех ее действию, неэффективности маскировки наблюдаемых объектов. Недостатки связаны с невозможностью осуществления селекции по дальности, а также с сильным влиянием состояния атмосферы. Свободными от последнего недостатка оказались РЛС, работающие по тому же принципу, но в сантиметровом и частично в миллиметровом диапазонах волн. Сам сигнал здесь существенно меньше, чем в инфракрасном диапазоне, однако это не является принципиальным препятствием на пути использования таких РЛС. Это направление носит название пассивной тепловой радиолокации или микроволновой радиометрии.

Развитие лазерной техники привело к созданию нового направления – оптической радиолокации.

ГДЕ СЕГОДНЯ НЕ ОБОЙТИСЬ БЕЗ РАДИОЛОКАЦИИ

Некоторое представление об областях применения РЛС может дать приводимый ниже перечень.

1. Сельское и лесное хозяйство. Исследование плотности растительного покрова, распределение лесных массивов, лугов и полей, определение вида почв, их температуры и влажности, контроль за состоянием ирригационных систем, обнаружение пожаров.

2. Геофизика и география. Определение структуры землепользования, распределение и состояние транспорта и систем связи, развитие систем переработки природных ресурсов, топография и геоморфология, определение состава пород и их структуры, стратиграфия осадочных пород, поиск минеральных месторождений, отработка техники разведки полезных ископаемых.

3. Гидрология. Исследование процессов испарения влаги, распределение и инфильтрация осадков, изучение стока грунтовых вод и загрязнения водных поверхностей, определение характера снегового и ледового покрова, наблюдение за водным режимом главных рек.

4. Океанография. Определение рельефа волнующейся поверхности морей и океанов, картографирование береговой линии, наблюдение за биологическими явлениями, проведение ледовой разведки.

5. Военное дело, гражданская авиация и космические исследования. Метеорологическое обеспече-

ние полетов, управление воздушным движением, обеспечение ближней и дальней радионавигации, радиолокационное обеспечение посадки воздушных судов и космических аппаратов, обеспечение дальнего и ближнего обнаружения воздушных целей и наведения на них перехватчиков, обеспечение перехвата воздушных целей и прицеливания, панорамный обзор поверхности, распознавание государственной принадлежности летательных аппаратов, обеспечение радиолокационного сопровождения воздушных и наземных объектов и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы лишь слегка заглянули в удивительный мир, который дала нам радиолокация. Здесь есть место исключительно сложной и глубокой теории, уникальным экспериментам, воистину волшебным техническим решениям и прикладным применениям.

Завершая статью, еще раз хочу подчеркнуть, что в ее рамках крайне трудно дать общее представле-

ние о радиолокации, ее задачах и возможностях. Думаю, что какая-то часть изложенного материала была вам известна, но уверен, что в статье нашлось что-то новое для каждого из вас. Если это так, то считаю, что со своей задачей я частично справился.

* * *

Анатолий Иванович Козлов, Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, академик Академии транспорта Российской Федерации, Транспортной Академии Украины и Международной Академии информатизации. Работает в Московском государственном техническом университете гражданской авиации. Круг научных интересов: радиофизика, радиополяриметрия, радиолокация, микроволновая радиометрия и электродинамика. Имеет около 250 научных трудов, автор 12 монографий, 6 учебников и учебных пособий, 13 авторских свидетельств на изобретения. Награжден медалью Ю.А. Гагарина.