

Ч. Кук, М. Бернфельд

Радиолокационные сигналы

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 621.39
ББК 32
Ч-11

Ч-11 **Ч. Кук**
Радиолокационные сигналы / Ч. Кук, М. Бернфельд – М.: Книга по Требованию, 2013. – 568 с.

ISBN 978-5-458-44928-1

В книге излагаются вопросы теории и практики применения сложных радиолокационных сигналов, позволяющих осуществлять сжатие импульсов. Рассматриваются основные элементы теории согласованной фильтрации применительно к ЧМ сигналам и системам сжатия импульсов, а также функции неопределенности таких сигналов; описываются системы с линейной и нелинейной ЧМ сжимаемых импульсов и системы с дискретным кодированием сигналов. Обосновываются требования к сигналам для работы при наличии пассивных помех и оценивается влияние искажений, вносимых при согласованной фильтрации. Описан ряд конструктивных решений согласованных фильтров на базе Т-образных звеньев и ультразвуковых линий задержки, а также оптические и СВЧ методы согласованной фильтрации. Книга будет полезна радиоспециалистам и разработчикам радиолокационных станций, а также студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

ISBN 978-5-458-44928-1

© Издание на русском языке, оформление

«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,

«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, кляксы, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Предисловие редактора

Настоящая книга представляет собой серьезную монографию, в которой излагаются вопросы теории и практики сложных радиолокационных сигналов, позволяющих осуществлять сжатие импульсов.

Существенным достоинством книги является простота изложения, сочетающаяся с большой глубиной рассмотрения и охватом широкого круга вопросов современной радиолокации.

Большое внимание уделено проблемам обоснования и выбора сигналов для работы в условиях различного рода пассивных помех, вопросам влияния искажений в трактах радиолокационных станций на характеристики сигнала, а также вопросам расчета и проектирования согласованных фильтров для сжатия радиолокационных сигналов с использованием ультразвуковых, СВЧ и оптических методов.

Эта книга вместе со сравнительно недавно вышедшими переводами книг: «Современная радиолокация» Р. Берковица и «Введение в технику радиолокационных систем» Д. Бартона в известной мере отражает современный уровень радиолокационной техники в США.

Техника сложных радиолокационных сигналов, как известно, развивалась параллельно в ряде стран, в том числе и в Советском Союзе. Однако в данной книге авторы ссылаются только на работы ученых США, Англии и Германии. При переводе этот недостаток частично исправлен и приведены ссылки на оригинальные работы советских ученых.

В американском издании книги имеются отдельные неточности и опечатки. На одну из них указано в работе Палса (см. «Зарубежная радиоэлектроника» № 2 за 1970 г.). При переводе сделаны необходимые исправления.

Перечни литературных источников, помещенные после каждой главы, воспроизведены так, как они даны в английском издании. Работы, переведенные на русский язык, отмечены звездочкой и приводятся дополнительно под теми же номерами после источников на английском языке. Двумя звездочками отмечаются статьи из журнала *Proceedings IEEE*, который с 1961 г. полностью переводится на русский язык издательством «Мир» вначале под названием ТИРИ и затем (с 1963 г.) как ТИИЭР.

Книга Кука и Бернфельда будет полезна широкому кругу радиоспециалистов, разработчикам радиолокационных станций и систем, а также студентам и аспирантам вузов.

Перевод книги выполнен М. К. Размахниным (главы 1—8 и 13—14) и Г. Н. Белобровым (главы 9—12).

В. С. Кельзон

Предисловие авторов

В настоящей книге рассматриваются основы теории и применения радиолокационных сигналов, получивших название сигналов с большим значением произведения длительности на ширину полосы частот, сигналов, позволяющих осуществлять сжатие импульса, или сложных сигналов. Теория сигналов этого класса является одним из краеугольных камней современной радиолокации, однако до сих пор не опубликованы труды, где этот вопрос был бы рассмотрен достаточно полно и на сравнительно простом уровне, пользуясь которыми студенты старших курсов и инженеры-практики могли бы получить необходимые основы знаний для работы в этой области радиолокации. При написании данной книги авторы пытались представить в единой форме теоретические и практические аспекты применения некоторых методов обработки радиолокационных сигналов, которые освещены в целом ряде опубликованных работ.

Понимая необходимость создания пособия, где эта информация была бы изложена в более доступной для читателя форме, авторы подготовили для работников фирмы Sperry Gyroscope курс лекций. Указанный курс был предназначен для слушателей вечерних курсов повышения квалификации и охватывал вопросы теории применения и формирования сигналов с большим значением произведения длительности на полосу частот. Этот курс и послужил в дальнейшем основой для создания настоящей книги. Хотя в книге отсутствуют примеры, специально предназначенные для проработки материала различных глав, вопросы и задачи для проверки усвоения его могут быть получены непосредственно из текста и приведены в соответствие с запросами студентов в процессе изучения материала.

Практические потребности, связанные с военными применениями радиолокации, послужили начальным толчком к проведению исследований для изучения свойств и методов формирования сложных радиолокационных сигналов как на протяжении второй мировой войны, так и после нее. В этот период был достигнут быстрый прогресс в понимании существа проблемы, а также в определении и обосновании требований, предъявляемых к оптимальным линейным методам обработки сигналов. В то же самое время развитие техники подготовило почву для практической реализации методов, опирающихся на развитую теорию; выдвигались многочисленные предложения о путях построения систем, известных теперь как системы со сжатием импульса или системы с кодированными сигналами.

Работы Вилле, Вудворда — Дэвиса и Вудворда обеспечили единую базу, основываясь на которой начинается второй этап концентрированных усилий в определении ограничений, накладывае-

мых на вид функции неопределенности радиолокационных сигналов и принципы реализации специфических радиолокационных систем в результате выбора того или иного вида радиолокационного сигнала. В течение некоторого времени упорно существовала надежда, что может быть найден такой сложный сигнал, который был бы оптимален для целого ряда различных приложений. После того, как такие попытки, предпринимавшиеся в течение десятилетия, позволили сформировать значительно более глубокое понимание существа проблемы, оказалось, что эта надежда была в значительной мере иллюзорна. В этом отношении утверждение Вудворда, что «основной вопрос, заключающийся в том, что (какой радиолокационный сигнал) следует передавать, остается по существу без ответа», было до некоторой степени пророческим. Несмотря на достигнутый с тех пор большой прогресс (1953 г.), это заявление все еще содержит элемент истины, если только не может быть дано очень точного описания природы элементов окружающего мира, расположенных в области, от которой отражается радиолокационный сигнал. В этом случае может оказаться возможным оптимальное согласование практически полученного радиолокационного сигнала с окружающей средой. Однако прогнозирование распределения и движения отражающих поверхностей обычно связано с большей или меньшей неопределенностью. При этих условиях разработчик радиолокационной станции обычно стремится сформировать радиолокационный сигнал (или сигналы) компромиссного типа, который, как он думает, будет обеспечивать выполнение задачи в некоторых заранее заданных возможных ситуациях. Намерения авторов книги как раз состоят в том, чтобы обеспечить читателя знанием теории и принципов, которые будут помогать его попыткам при разрешении стоящих перед ним специфических проблем.

Изложение материала в книге сопровождается примерами различных типов радиолокационных сигналов. При этом было найдено, что для многих задач наиболее подходящим и легко реализуемым является сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ сигнал). В связи с этим указанные сигналы используются в качестве примера во многих разделах, где рассматриваются практические проблемы, связанные с радиолокационными системами, которые используют сложные сигналы.

Интересно отметить, что сложные сигналы нашли применение в таких различных областях как метеорология, сейсмология, ионосферное зондирование, портовая навигация, контроль движения в аэропортах, определение дефектов в металлах и экспериментальный анализ пограничных слоев между различными средами. Следует ожидать, что с течением времени этот перечень будет увеличиваться и мы надеемся, что настоящая книга внесет свой вклад в расширение области использования этого класса сигналов.

Ч. Кук, М. Бернфельд

Список обозначений

- 2α — эффективная длительность (среднеквадратичное значение).
 2β — эффективная ширина полосы (среднеквадратичное значение).
 $\beta_f(\omega)$ — фазовая характеристика фильтра, в случае согласованного фильтра $\beta_f(\omega) = -\Phi(\omega)$.
 $\beta'_f(\omega)$ — групповая задержка фильтра $d\beta_f(\omega)/d\omega$.
 γ — постоянная распространения (используется в главах 13 и 14).
 δ — длительность элементарного импульса в дискретном кодированном сигнале.
 δ_r — среднеквадратичная ошибка измерения дальности.
 δ_v — среднеквадратичная ошибка измерения скорости.
 $\theta(t)$ — функция фазовой модуляции.
 $\theta_e(t)$ — ошибка функции фазовой модуляции.
 $\theta'(t)$ — функция частотной модуляции, $d\theta(t)/dt$.
 θ_0 — фазовая постоянная (индекс фазовой модуляции).
 θ_1, θ_2 — обобщенные параметры сигнала (используются только в гл. 5).
 $\Theta(\tau, \Phi)$ — симметрическая функция неопределенности.
 λ — длина волн.
 μ — скорость изменения угловой частоты при ЛЧМ.
 ρ — пространственно-частотная корреляция или коэффициент частотно-временной связи.
 σ_ϕ — среднеквадратичная ошибка измерения частоты.
 σ_ϕ^2 — дисперсия ошибки измерения частоты.
 σ_τ — среднеквадратичная ошибка измерения времени.
 σ_τ^2 — дисперсия ошибки измерения времени.
 φ — допплеровский сдвиг частоты.
 $\Phi(\omega)$ — фазочастотная передаточная функция.
 Φ_0 — фазовая постоянная фильтра.
 $\chi(\tau, \varphi)$ — функция отклика.
 $|\chi(\tau, \varphi)|^2$ — функция неопределенности сигнала.
 $\chi_p(\tau', \varphi)$ — функция отклика на элементарный импульс дискретного кодированного сигнала.
 $\chi(\kappa\delta, \varphi)$ — функция отклика на дискретный кодированный сигнал при целых значениях δ .
 $\psi(t)$ — комплексный сигнал.
 $\Psi(f)$ — спектр комплексного сигнала.
 ω — угловая частота, $2\pi f$.
 ω_d — угловая частота Допплера, $2\pi f$.
 $a(t)$ — огибающая сигнала.
 $\{a_n\}$ — последовательность с дискретным кодированием амплитуды.
 $\{b_n\}$ — последовательность с комбинированным кодированием амплитуд и фаз по коду Хаффмана.
 $\{c_n\}, \{d_n\}$ — другие представления последовательностей с дискретным кодированием фазы.
 $\{\theta_n\}$ — последовательность фаз при дискретном кодировании.
 $\{\omega_n\}$ — последовательность угловых частот при дискретном кодировании.
 $I_r(0)$ — постоянная разрешения по частоте.
 $\Gamma_r(\tau)$ — обобщенная постоянная разрешения по частоте.

- $H(\omega)$ — комплексная передаточная функция фильтра.
 E — энергия действительного сигнала $s(t)$.
 M — число подыmpульсов $P_n(t)$ в дискретно-кодированном сигнале.
 N — число возможных размещений подыmpульсов в кодированном сигнале.
 N_0 — спектральная плотность мощности белого шума.
 $N(\omega)$ — спектральная плотность мощности для небелого шума.
 $P_n(t)$ — импульс единичной амплитуды фиксированной длительности.
 $P(D)$ — многочлен по степеням оператора единичной задержки D , описывающий функционирование регистра сдвига.
 $P(s)$ — многочлен Хаффмана.
 $s(t)$ — действительный сигнал.
 $S(f)$ — спектр $s(t)$.
 T — длительность сигнала.
 $T\Delta f$ — произведение длительности сигнала на его полосу (база сигнала).
 Δf — ширина спектра (пропорциональная $1/T$ для некодированного импульса).
 $T_r(0)$ — постоянная разрешения по времени.
 $T_r(\varphi)$ — обобщенная постоянная разрешения по времени.
 $u(t)$ — комплексная огибающая $a(t) \exp [j\theta(t)]$.
 $U(\omega)$ — спектр $u(t)$.
 $w(t)$ — временная весовая функция для уменьшения боковых лепестков
 $W(\omega)$ — частотная весовая функция для уменьшения боковых лепестков.

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И СЖАТИЯ ИМПУЛЬСОВ

1.1. Введение

В начале развития радиолокации было широко распространено деление радиолокационных систем на две основные категории. В соответствии с этим радиолокатор являлся либо системой с непрерывным излучением, обладающей большими возможностями по измерению скорости (или допплеровского сдвига), либо импульсной системой, эффективно измеряющей дальность и имеющей хорошую разрешающую способность по дальности. В импульсных радиолокационных системах параметры передаваемого импульса обычно представляли собой компромисс между желанием получить лучшее разрешение по дальности (что связано с необходимостью иметь возможно меньшую длительность импульса) и стремлением добиться максимально возможной дальности обнаружения (что требует максимизации энергии импульса за счет использования как можно более длительных импульсов).

Попытки удовлетворить этим противоречивым требованиям одновременного обеспечения разрешения по дальности и максимальной дальности обнаружения часто заставляли идти на компромисс при решении и других вопросов, связанных с разработкой радиолокатора. Одним из примеров его является уменьшение скорости обзора исследуемого пространства антенной радиолокатора с тем, чтобы получить большее число импульсов, отраженных от объекта. Максимальная дальность обнаружения при этом могла увеличиваться за счет использования методов накопления импульсов (интегрирования).

Разработка радиолокационной системы¹ обычно начинается

¹ В списке литературы, помещенной в конце этой главы, можно найти ряд недавно вышедших работ, посвященных рассмотрению общих принципов построения радиолокационных систем.

с исследования ограничений, накладываемых уравнением дальности радиолокации, которое имеет вид

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1.1a)$$

или

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}} \right]^{1/4}, \quad (1.1b)$$

где P_t — передаваемая мощность; P_r — принимаемая мощность; G — коэффициент усиления передающей и приемной антенн; λ — длина волны излучаемого сигнала; σ — эффективная площадь рассеяния объекта; R — расстояние между радиолокатором и отражающим объектом; R_{\max} — максимальная дальность обнаружения и S_{\min} — минимальный обнаружимый сигнал.

Используя уравнения (1.1a) или (1.1b), разработчик радиолокатора может взвесить достоинства возможных компромиссных решений, которые позволяют достигнуть требуемых результатов.

С развитием радиолокационной техники наметился постепенный переход от разработки устройств, единственным критерием качества которых была их работоспособность, к созданию систем, способных обеспечить оптимальную или близкую к ней обработку сигналов. Возникли новые концепции, которые заложили основы теории построения сигналов как неотъемлемой части теории радиолокационных систем. Одним из примеров применения этой теории для частной задачи служат импульсные допплеровские системы, в которых была предпринята попытка обеспечить одновременное точное измерение скорости (или разрешение по скорости) и разрешение по дальности. Это явилось предвестником более поздних работ, основанных на использовании сложных сигналов в виде последовательностей импульсов. Однако лишь в фундаментальной монографии Вудворда [1] были систематизированы исследования в различных областях теории радиолокационных сигналов, которые начали развиваться в послевоенный период. Эта работа позволила установить, что форма сигнала является дополнительным параметром при разработке радиолокатора и что такие характеристики радиолокационной системы, как разрешение по дальности, могут определяться не только средней излучаемой мощностью и длительностью излучаемого импульса, но и формой сигнала.

Применительно к уравнению радиолокации (1.1a) или (1.1b) основные идеи, развитые Вудвордом, означают, что длительность излучаемого импульса может быть выбрана настолько большой, насколько это необходимо для удовлетворения энергетических требований, предъявляемых к системе (например, для наиболее полного использования характеристик, имеющихся в мощных каскадах передатчика ламп). После удовлетворения требований к характе-

ристикам обнаружения можно обеспечить условия для получения необходимого разрешения по дальности за счет кодирования излучаемого сигнала с помощью широкополосной модуляции. Одним из наиболее важных вкладов Вудворда в развитие современной радиолокации было установление того, что разрешение по дальности и точность измерений определяются шириной полосы сигнала, а не длительностью излучаемого импульса.

Для извлечения широкополосной информации, содержащейся в сигнале описываемого типа, требуется использовать более сложные приемные системы по сравнению с системами для простого импульсного радиолокатора. Такие приемные системы получили название систем обработки сигнала с помощью согласованных фильтров или систем согласованной фильтрации сигнала. Термин «обработка сигнала» в общем случае подразумевает операции, выполняемые над принимаемым сигналом в высокочастотных каскадах или в каскадах на промежуточной частоте радиолокационного приемника, и отличается от термина «обработка данных», который обычно связан с операциями над продетектированным радиолокационным сигналом.

Возможность варьировать и подбирать в соответствии с теми или иными требованиями различные характеристики радиолокационного сигнала является важным фактором развития современных радиолокационных систем, использующих сложные методы обработки сигналов. Соответствующие современному уровню развития радиолокационных систем методы обработки сигналов широко известны как методы сжатия импульсов, согласованная фильтрация или методы кодирования сигналов [2—4]. Назовем некоторые из основных практических соображений в пользу развития этих методов, хотя такой перечень, конечно, не будет исчерпывающим. При помощи этих методов достигается:

1. Более эффективное использование средней мощности, которую можно получить от радиолокационного передатчика, а иногда и возможность избежать трудностей, связанных с ограничением пиковой мощности в мощных каскадах радиолокационного передатчика.

2. Более высокая разрешающая способность как по дальности, так и по скорости. При стремлении обеспечить высокую разрешающую способность по дальности с помощью использования методов сжатия импульса можно обойти затруднения, связанные с генерированием сигналов, имеющих очень крутые фронты импульсов и высокую пиковую мощность.

3. Повышение помехоустойчивости по отношению к определенным типам интерферирующих сигналов, свойства которых отличаются от свойств кодированных сигналов.

4. Извлечение информации из сигналов, поступающих на вход приемника, что позволяет оценить такие важные параметры, как дальность, скорость и, возможно, ускорение объектов, от ко-

торых отражены отдельные сигналы. Этот вид обработки радиолокационных сигналов называется оценкой параметров.

На рис. 1.1 показана упрощенная форма радиолокационной системы, в которой методы кодирования сигналов использованы для реализации указанных выше возможностей. Поскольку задачей настоящей книги является развитие идей и принципов, необходимых для понимания и сознательного применения специфических методов обработки радиолокационных сигналов (согласованная фильтрация со сжатием импульса), мы особенно подробно рассмотрим теоретические вопросы, связанные с теми элементами схемы

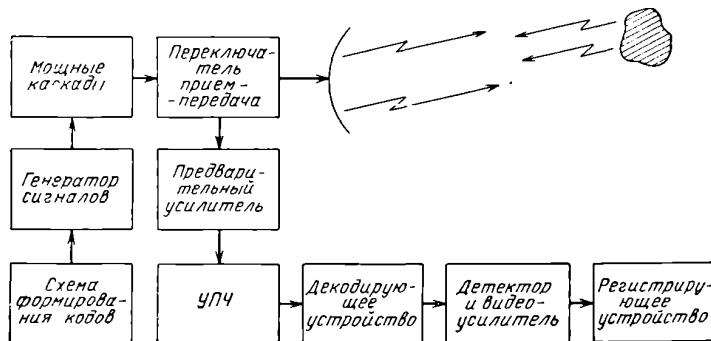


Рис. 1.1. Блок-схема радиолокационной системы с кодированными сигналами.

на рис. 1.1, которые обозначены как «схема формирования кодов» и «декодирующее устройство», а также возможные пути их реализации.

Изложенный в книге материал может быть разбит на три основных части. В первых пяти главах рассматриваются общие теоретические вопросы, связанные с методами согласованной фильтрации. Изложена сущность принципа согласованной фильтрации и дана история развития методов сжатия импульса; приведены различные критерии качества функционирования системы, использование которых приводит к необходимости применять согласованную фильтрацию. Подробно рассматриваются: 1) принцип стационарной фазы, имеющий большое значение и применяемый для вывода приближенных соотношений, связывающих частотно-модулированный кодированный сигнал и согласованный с ним фильтр; 2) функция неопределенности радиолокационного сигнала и ее применение в качестве критерия при формировании радиолокационного сигнала; 3) теория оценки параметров и связь характеристик кодированного сигнала с результатами радиолокационных измерений.

В гл. с 6 до 10 изложены вопросы, относящиеся к специфическим радиолокационным сигналам. Особое внимание уделяется ЛЧМ сигналам¹, так как во многих отношениях именно они являются каноническими сигналами, позволяющими осуществить сжатие импульса с помощью согласованной фильтрации. Среди всех сигналов с большим значением произведения длительности на полосу частот, которые были предложены для использования в радиолокации, ЛЧМ сигналы нашли наиболее широкое применение и им удалено самое большое внимание при создании элементов устройств для генерирования и приема сигналов.

Дискретно-кодированные сигналы, которые здесь противопоставляются непрерывным ЧМ сигналам, рассматриваются как единый класс сигналов в гл. 8. Некоторые из них представляют собой дискретную аппроксимацию хорошо известных ЧМ сигналов, в то время как другие не имеют вообще никакой связи с классом ЧМ сигналов. Теория оценки параметров как критерий при построении сигналов исследуется в гл. 9, где теоретические соотношения, полученные в гл. 5, применяются к некоторым сигналам, рассмотренным в других главах. Гл. 10 посвящена рассмотрению критерии построения сигналов в некоторых задачах с множественными и пространственно-распределенными целями. В последних четырех главах (11—14-я) исследуются различные практические проблемы, связанные с реализацией согласованных фильтров. Сюда входит учет воздействия искажений, изучение методов обработки сигналов при помощи линейных фильтров с задержкой сигнала на большие отрезки времени и ультразвуковых линий задержки, а также применение оптических и СВЧ методов для построения согласованных фильтров.

Приведенный материал рассчитан на то, чтобы дать инженерам и студентам основные понятия о принципах формирования радиолокационных сигналов и, кроме того, обеспечить специалистов, заинтересовавшихся этим вопросом, необходимым фундаментом для последующего изучения более сложных задач в области исследования методов обработки сигналов и их приложений.

1.2. Принцип согласованной фильтрации

Основные принципы согласованной фильтрации были сформулированы в результате исследований, направленных на оптимизацию функционирования радиолокационных систем. По этим углубленным теоретическим представлениям необходимо было разработать схемы, которые могли бы быть реализованы инженерами-практиками. Метод согласованной фильтрации осуществляет оптимальную

¹ Здесь и далее сокращение ЛЧМ сигналы обозначает линейно-частотно-модулированные сигналы. (Прим. перев.)