Методические указание по Отраслевой олимпиаде студентов «Газпром», профиль "Радиотехнические и телекоммуникационные системы"

Учебное пособие для подготовки к олимпиаде
(этап 2)

Под редакцией к.т.н. А.С. Маругина и к.т.н. Е.Ю. Замешаевой

Методические рекомендации по подготовке ко второму этапу Студенческой олимпиады «Газпром», ФРТ

Второй этап олимпиады включает в себя два этапа:

– практический этап;

– теоретический (творческий) этап.

Теоретические задания содержат концептуальные вопросы, связанные к ключевыми проблемами, возникающими при проектировании современных и перспективных радиотехнических и телекоммуникационных систем (выбор формата сигнала и его параметров, алгоритмы обработки сигналов в условиях, характерных для работы современных информационных систем). Продолжительность выполнения теоретического этапа – 2 астрономических часа.

Практические задания предполагают решение задач, связанных с описанием случайных процессов, вопросами преобразования сигналов и помех линейными и нелинейными звеньями радиотехнических и телекоммуникационных систем, задачами оптимальной линейной и нелинейной фильтрации, а также проблемами обнаружения-различения сигналов и оценки их параметров. Продолжительность выполнения практического этапа – 3 астрономических часа.

Примеры олимпиадных задач и решений:

1. В обнаружителе сигнала $s(t)=\begin{cases} U, t\in[0,T], \\ 0, t\notin[0,T], \end{cases}$ на фоне АБГШ момент взятия отсчета на выходе СФ взят равным $t_0=\frac{T}{2}$. При взятии отсчета в момент $t_0=T$ вероятность ложной тревоги и пропуска сигнала были $P_{\text{л.т.}}=10^{-3}$, $P_{\text{п.с.}}=0.1$. Какими они будут при $t_0=\frac{T}{2}$? Какое минимальное значение $P_{\text{п.с.}}$ при $P_{\text{л.т.}}=10^{-3}$ можно получить для сигнала $s(t)$, при $t_0=\frac{T}{2}$? Как это сделать?

Решение. При заданных значениях вероятностей ложной тревоги и пропуска сигнала $P_{\text{л.т.}}=10^{-3}$, $P_{\text{п.с.}}=0.1$ для детерминированного сигнала отношение сигнал/шум должно быть q = 3.25 (см. характеристики обнаружения). При переносе точки взятия отсчета t_0 из $t_0=T$ в точку $t_0=\frac{T}{2}$, с учетом треугольности сигнала на выходе СФ отношение сигнал/шум изменится в два раза и при заданной вероятности ложной тревоги

$P_{\text{л.т.}}$ = 10^{-3} вероятность пропуска сигнала будет $P_{\text{п.с.}}$ = 0.75. Если поставить СФ для прямоугольного импульса длительностью $T/2$ и точку отсчета взять $t_0 = \dfrac{T}{2}$, то отношение сигнал/шума будет равно $q = \sqrt{\dfrac{2E_1}{N_0}}$, где E_1 = $E/2$, E–энергия исходного сигнала. Следовательно, отношение сигнал/шума по сравнению с исходным случаем уменьшится в $\sqrt{2}$ раз. Соответственно при вероятности ложной тревоги $P_{\text{л.т.}}$ = 10^{-3} вероятность пропуска сигнала будет равна $P_{\text{п.с.}}$ = 0.6.

2. Ансамбль сигналов имеет вид $a_1 s_1(t) + a_2 s_2(t)$, где a_1 и a_2 могут равновероятно принимать значения ±1, $s_1(t)$, $s_2(t)$– известные ортогональные сигналы, имеющие энергию E. Найти максимально правдоподобный алгоритм различения сигналов, входящих в описанный ансамбль и определить вероятность ошибки, пользуясь аддитивной границей для $P_{\text{ош}}$.

Решение.В данной задаче речь идет о различении четырех равновероятных сигналов вида $s_1(t) + s_2(t)$, $-s_1(t) + s_2(t)$, $s_1(t) - s_2(t)$, $-s_1(t) - s_2(t)$. Эти сигналы с учетом ортогональности $s_1(t)$ и $s_2(t)$ имеют одинаковые энергии, равные $2E$. Поэтому максимально правдоподобный алгоритм различения данного ансамбля сигналов сводится к вычислению двух корреляционных интегралов $z_1 = \int_0^T y(t) s_1(t) dt$, $z_2 = \int_0^T y(t) s_2(t) dt$, формированию величин $z_1 + z_2$, $-z_1 + z_2$, $z_1 - z_2$, $-z_1 - z_2$ и сравнению их между собой. Различаемые сигналы образуют ортогональный набор. Каждый из сигналов по отношению к двум является ортогональным (коэффициент корреляции $\rho = 0$) и противоположным третьему ($\rho = -1$). С учетом равновероятности сигналов и использовании аддитивной границы для $P_{\text{ош}}$, будем иметь

$$P_{\text{ош}} \approx 2\left[1 - \Phi\left(\frac{q}{2}\right)\right] + 1 - \Phi(q),$$

где отношение сигнал/шум $q = 2\sqrt{\dfrac{E}{N_0}}$.

3. В обнаружителе детерминированного сигнала $s(t)=\begin{cases}U, t\in[0,T],\\ 0, t\notin[0,T],\end{cases}$ на фоне АБГШ реализованном на основе коррелятора, в качестве опорного сигнала используется $s_{on}(t)=\begin{cases}U, t\in[0,KT],\\ 0, t\notin[0,KT].\end{cases}$ Как изменятся значения вероятностей ложной тревоги и пропуска сигнала по отношению к случаю реализации оптимальной обработки в зависимости от K? (Оценить количественно).

Решение. Величина $z=\int_0^{T_H} y(t)s_{on}(t)dt$, сравниваемая с порогом $z_{п}$, где $T_H \geq KT$ – время наблюдения, подчиняется нормальному закону с параметрами $M\left\{z/H_0\right\}=0$, $M\left\{z/H_1\right\}=\begin{cases}U^2KT, K\leq 1,\\ U^2T, K>1,\end{cases}$ и $D\left\{z/H_i\right\}=D=\dfrac{N_0U^2KT}{2}$, i = 0, 1. Поэтому вероятность ложной тревоги определяется

$$P_{\text{л.т.}}=\int_{z_n}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi D}}\cdot\exp\left(-x^2/2D\right)dx=1-\Phi\left(\frac{\sqrt{2}z_n}{U\sqrt{N_0KT}}\right),$$

а вероятность пропуска сигнала

$$P_{\text{п.с.}}=\int_{-\infty}^{z_n}\frac{1}{\sqrt{2\pi D}}\cdot\exp\left(-\frac{\left(x-M\left\{z/H_1\right\}\right)^2}{2D}\right)dx=\begin{cases}\Phi\left[\dfrac{\sqrt{2}\left(z_n-U^2KT\right)}{U\sqrt{N_0KT}}\right], K\leq 1,\\ \Phi\left[\dfrac{\sqrt{2}\left(z_n-U^2T\right)}{U\sqrt{N_0KT}}\right], K>1.\end{cases}$$

Выражая величину $\dfrac{\sqrt{2}z_n}{U\sqrt{N_0KT}}$ через вероятность ложной тревоги $P_{\text{л.т.}}$, получим окончательно

$$P_{\text{п.с.}}=\begin{cases}\Phi\left[\Phi^{-1}\left(1-P_{\text{л.т.}}\right)-q\sqrt{K}\right], K\leq 1,\\ \Phi\left[\Phi^{-1}\left(1-P_{\text{л.т.}}\right)-q/\sqrt{K}\right], K>1.\end{cases}$$

4. На фильтр, согласованный с сигналом $s(t)=\begin{cases}U, t\in[0,T],\\ 0, t\notin[0,T],\end{cases}$ подается АБГШ с СП $N_0/2$. Записать двумерную плотность вероятности отсчетов на выходе СФ, разделенных промежутком *T*/2.

Решение. Процесс на выходе будет гауссовским. Среднее значение отсчетов равно нулю, а дисперсия $\sigma^2=\dfrac{N_0E}{2}$. Так как корреляционная функция выходного процесса СФ $K(\tau)=\begin{cases}\dfrac{N_0E}{2}\left(1-\dfrac{|\tau|}{T}\right), |\tau|\le T,\\ 0, |\tau|>T,\end{cases}$ то коэффициент корреляции *r*отсчетов, разделенных промежутком $\tau=T/2$, будет равен 0.5. Поэтому двумерная плотность вероятности отсчетов

$$W(x_1,x_2)=\frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)(1-r^2)}}\cdot\exp\left(-\frac{x_1^2+x_2^2-2rx_1x_2}{2\sigma^2(1-r^2)}\right)=\frac{1}{\dfrac{N_0E}{2}\sqrt{(2\pi)^2 0.75}}\cdot\exp\left(-\frac{x_1^2+x_2^2-2rx_1x_2}{2\cdot\dfrac{N_0E}{2}\cdot 0.75}\right).$$

5. БШ со СПМ $N_0/2$ подается на фильтр, согласованный с сигналом $s(t)=\begin{cases}U, t\in[0,T],\\ 0, t\notin[0,T],\end{cases}$ а затем на фильтр с коэффициентом передачи $K(j\omega)=1-\exp(-j\omega T)$. Найти корреляционную функцию процесса и построить ее график.

Решение. Корреляционная функция на выходе звена с коэффициентом передачи $K(j\omega)=1-\exp(-j\omega T)$ имеет вид $K_{\text{вых}}(\tau)=2K(\tau)-K(\tau+T)-K(\tau-T)$, где $K(\tau)$ – корреляционная функция на входе. В нашем случае корреляционная функция на входе $K(\tau)=\begin{cases}\dfrac{N_0E}{2}\left(1-\dfrac{|\tau|}{T}\right), |\tau|\le T,\\ 0, |\tau|>T\end{cases}$ и $K_{\text{вых}}(\tau)$ имеет вид, приведенный на рисунке 1.

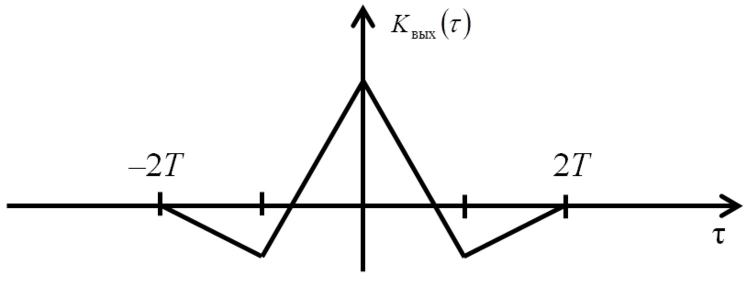

Рис. 1.

6. Различаемые на фоне АБГШ со СПМ $N_0/2$ сигналы $s_1(t)$ и $s_2(t)$ являются четной и нечетной частями сигнала $s(t) = \begin{cases} Ut/T, t \in [0,T], \\ 0, t \notin [0,T]. \end{cases}$ Считая сигналы $s_1(t)$ и $s_2(t)$ равновероятными, определить вероятность ошибки.

Решение. Исходный сигнал $s(t)$ и его четная $s_ч(t)$ и нечетная $s_н(t)$ составляющие приведены на рисунке 2.

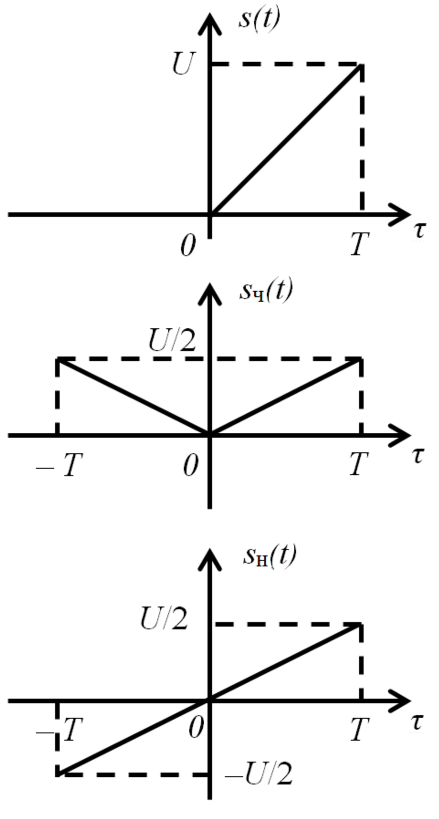

Рис. 2.

Как видно из рисунка 2, различаемые сигналы $s_ч(t)$ и $s_н(t)$ ортогональны, и имеют энергию $E/2$, где $E = \int_0^T \left(\frac{Ut}{T}\right)^2 dt = \frac{U^2 T}{3}$ – энергия исходного сигнала $s(t)$. С учетом сказанного, вероятность ошибки $P_{ош} = 1 - \Phi\left(q/\sqrt{2}\right)$, где отношение сигнал/шум $q = \sqrt{\frac{E}{N_0}}$, а значение энергии E определено выше.

7. Суммируются два независимых обобщенных телеграфных сигнала с корреляционными функциями $K_1(\tau) = \exp(-\lambda_1|\tau|)$ и $K_2(\tau) = \exp(-\lambda_2|\tau|)$. Найти ПВ отсчетов суммарного сигнала и его корреляционную функцию.

Примечание. Случайным обобщенным телеграфным сигналом называется случайный процесс, принимающий с вероятностью 0.5 значения $\pm u$. Число перемен знака в единицу времени подчиняется распределению Пуассона с параметром λ, имеющего смысл среднего числа перемен знака в единицу времени.

Решение. Отсчеты суммарного процесса принимают три значения: 2, если оба отсчета равны 1; –2, если оба отсчета равны –1; 0, если отсчеты имеют разные знаки. Очевидно, что $P(2) = 1/4$, $P(-2) = 1/4$ и $P(0) = 1/2$. Поэтому плотность вероятности отсчетов суммарного сигнала $W(x) = \frac{1}{4}\delta(x+2) + \frac{1}{4}\delta(x-2) + \frac{1}{2}\delta(x)$. Так как суммируемые процессы независимы, то корреляционная функция суммарного сигнала $K_\Sigma(\tau) = K_1(\tau) + K_2(\tau) = e^{-\lambda_1|\tau|} + e^{-\lambda_2|\tau|}$.

8. Для какой из приведенных ниже пар сигналов а) или б) можно получить меньшую вероятность ошибки различения на фоне АБГШ со СПМ $N_0/2$:

а) $s_1(t) = \begin{cases} U\sin^4(2\pi f_0 t), t \in [0,T], \\ 0, t \notin [0,T], \end{cases}$ $s_2(t) = \begin{cases} U\cos^4(2\pi f_0 t), t \in [0,T], \\ 0, t \notin [0,T]. \end{cases}$

б) $s_1(t) = \begin{cases} U\sin^2(2\pi f_0 t), t \in [0,T], \\ 0, t \notin [0,T], \end{cases}$ $s_2(t) = \begin{cases} U\cos^2(2\pi f_0 t), t \in [0,T], \\ 0, t \notin [0,T]. \end{cases}$ $T = 100/f_0$.

Решение. Так как $\sin^4 x = \frac{1}{8}(\cos 4x - 4\cos 2x + 3)$, $\cos^4 x = \frac{1}{8}(\cos 4x + 4\cos 2x + 3)$, то вычитая общую часть $\frac{1}{8}(\cos 4x + 3)$, приходим к различению двух противоположных сигналов равных энергий $\frac{U}{2}\cos 2x$ и $-\frac{U}{2}\cos 2x$. К аналогичному результату приходим вдля второй пары сигналов. Следовательно, вероятности ошибок для рассматриваемых пар сигналов одинаковы.

9. В обнаружителе сигнала со случайной начальной фазой равномерно распределенной на интервале $[-\pi, +\pi]$ на фоне АБГШ со СПМ $N_0/2$ вышел из строя один из каналов ($z_2 = 0$, где $z_2 = \int_0^T y(t)S(t)\sin\omega_0 t dt$). Как изменится работа обнаружителя? Найдите распределения решающей статистики и запишите выражение для $P_{\text{п.с.}}$ и $P_{\text{л.т.}}$.

Решение. Если $z_2 = 0$, то решающая статистика Z имеет вид $Z = \sqrt{z_1^2} = |z_1|$. Ее распределение по гипотезе H_0 $w(Z/H_0) = \begin{cases} \frac{Z}{\sqrt{2\pi D}} \exp\left(-\frac{Z}{2D}\right), Z \ge 0, \\ 0, Z < 0, \end{cases}$ где $D = \frac{N_0 E}{2}$, поэтому вероятность ложной тревоги $P_{\text{л.т.}} = \int_{Z_\text{п}}^{\infty} W\left(Z/H_0\right) dZ = 2\left[1 - \Phi\left(\frac{Z_\text{п}}{\sqrt{D}}\right)\right]$.Для гипотезы H_1 распределение $w(Z/H_1) = \begin{cases} \frac{Z}{\sqrt{2\pi D}} \left[\exp\left(-\frac{(Z - E\cos\varphi)^2}{2D}\right) + \exp\left(-\frac{(Z + E\cos\varphi)^2}{2D}\right)\right], Z \ge 0. \\ 0, Z < 0. \end{cases}$

Условная вероятность пропуска сигнала $P_{\text{п.с.}}(\varphi) = \int_0^{Z_\text{п}} W\left(Z/H_1\right) dZ$, а безусловная $P_{\text{п.с.}} = \int_{-\pi}^{\pi} P_{\text{п.с.}}(\varphi) \frac{1}{2\pi} d\varphi$.

10. Найти алгоритм оценивания количества импульсов M в пакете $\sum_{k=0}^{M-1} s(t - kT)$, где $s(t) = \begin{cases} U, t \in [0, T/2], \\ 0, t \notin [0, T/2], \end{cases}$ оптимальный по критерию максимума апостериорной вероятности, если максимально возможное количество импульсов N, а априорное распределения их количества M описывается биномиальным распределением с параметрами pи N.

Решение. Функция правдоподобия для нашей задачи имеет вид $K \exp\left[\frac{2}{N_0}\left(\sum_{k=0}^{M-1} z_k - \frac{ME_0}{N_0}\right)\right]$, где $z_k = \int_{kT}^{(k+1)T} y(t) s_0(t - kT) dt$, $E_0 = \int_0^T s_0^2(t) dt$. Апостериорное распределение числа импульсов M с точностью до множителя, независящего от M, равно $W\left(M/y(t)\right) = K_1 \exp\left[\frac{2}{N_0}\left(\sum_{k=0}^{M-1} z_k - \frac{ME_0}{2}\right)\right] C_N^M p^M (1-p)^{N-M}$.Максимально правдоподобная оценка числа импульсов $\hat{M}_{\text{МП}}$ находится как $\arg\max_{M \le N} W\left(M/y(t)\right)$.

11. Найти МП оценку величины постоянного сигнала U на основе наблюдения N независимых отсчетов аддитивной смеси сигнала и помехи, отсчеты которой подчиняются

распределению $w(x)=\begin{cases}\alpha\exp(-\alpha x), x\ge 0, \alpha>0,\\ 0, x<0.\end{cases}$ Найти смещение оценки и ее дисперсию. Какой результат выдаст измеритель после обработки выборки: 3; 0.8; 4.2; 0.2; 5; 10?

Решение. Функция правдоподобия (ФП) имеет вид $\begin{cases}\prod\limits_{i=1}^{N}\alpha^N\exp\left(-\alpha\sum\limits_{i=1}^{N}(y_i-U)\right), U<\min y_i,\\ 0, U\ge\min y_i.\end{cases}$ Максимум ФП с учетом условия $U<\min y_i$ достигается, если $\hat{U}_{\text{МП}}=\min y_i$. Поэтому по полученной выборке измеритель выдаст $\hat{U}_{\text{МП}}=0.2$.

Распределение минимального элемента в выборке объемом N $W_{\min}(x)=N[1-F(x)]^{N-1}W(x)$. В нашем случае $F(x)=\begin{cases}1-e^{-\alpha x}, x\ge 0,\\ 0, x<0,\end{cases}$ а $W(x)=\begin{cases}\alpha e^{-\alpha x}, x\ge 0,\\ 0, x<0.\end{cases}$

Поэтому $M\left\{\hat{U}_{\text{МП}}\right\}=\int\limits_U^{\infty}xN\alpha\exp[-N\alpha(x-U)]dx=U-\dfrac{1}{N\alpha}$. То есть смещение оценки равно $\dfrac{1}{N\alpha}$. Аналогично находится дисперсия $\hat{U}_{\text{МП}}$.

12. Найти совместную ПВ случайных величин $\xi_1=\int\limits_0^T n(t)dt$ и $\xi_2=\int\limits_0^{2T} n(t)dt$, где $n(t)$– гауссовский белый шум со спектральной плотностью мощности $N_0/2$.

Решение. Распределение величин ξ_1 и ξ_2 совместно нормальное, $M\{\xi_1\}=M\{\xi_2\}=0$, $D\{\xi_1\}=\dfrac{N_0T}{2}$, $D\{\xi_2\}=N_0T$, а коэффициент корреляции $r=\dfrac{M\{\xi_1\xi_2\}}{\sqrt{D\{\xi_1\}D\{\xi_2\}}}=\dfrac{D\{\xi_1\}}{\sqrt{D\{\xi_1\}D\{\xi_2\}}}=\sqrt{\dfrac{D\{\xi_1\}}{D\{\xi_2\}}}=\dfrac{1}{\sqrt{2}}$. Поэтому совместная ПВ

$$W(\xi_1,\xi_2)=\frac{1}{\sqrt{(2\pi)^2D\{\xi_1\}D\{\xi_2\}(1-r^2)}}\exp\left[-\frac{1}{2(1-r^2)}\left(\frac{\xi_1^2}{D\{\xi_1\}}-\frac{2r\xi_1\xi_2}{\sqrt{D\{\xi_1\}D\{\xi_2\}}}+\frac{\xi_2^2}{D\{\xi_2\}}\right)\right].$$

13. Как с помощью коррелятора и генератора шума с корреляционной функцией $K(\tau)=\sigma^2\dfrac{\sin\pi F\tau}{\pi F\tau}$ оценить постоянную времени интегрирующей *RC*цепи?

Решение. Необходимо подать на исследуемую *RC*-цепь напряжение, формируемое генератором шума (ГШ) и измерить с помощью коррелятора значение корреляционной функции на выходе при $\tau=0$ (дискретно). Так как $K(\tau)=\sigma^2\dfrac{\sin\pi F\tau}{\pi F\tau}$ соответствует СП вида $S(f)=\begin{cases}\sigma^2/F, |f|\le\dfrac{F}{2},\\ 0, |f|>\dfrac{F}{2},\end{cases}$ то дисперсия на выходе интегрирующей *RC*цепи будет равна

$K(0)=D_{\text{вых}}=\int\limits_{-F/2}^{F/2}\dfrac{\sigma^2}{F}\dfrac{df}{1+(2\pi fT)^2}=\dfrac{\sigma^2}{FT}\operatorname{arctg}\pi FT$,откуда можно, зная *K*(0), *F*, найти *T*.

14. Для сигнала $s(t)=\begin{cases}Ut/T_1, t\in[0,T_1),\\ U\left(1-\dfrac{t-T_1}{T-T_1}\right), t\in[T_1,T],\\ 0, t\notin[0,T],\end{cases}$ определить, как должны быть связаны параметры *U*, T_1, *T*, чтобы точность измерения временного положения на фоне АБГШ со СПМ $N_0/2$ оставалась неизменной при их изменении?

Решение. Дисперсия МП оценки временного положения $D\left\{\hat{\tau}/\tau\right\}=\dfrac{N_0}{2\int\limits_{-\infty}^{\infty}[s'(t)]^2dt}$.

Для нашего сигнала $s'(t)=\begin{cases}U/T_1, t\in[0,T_1),\\ -\dfrac{U}{T-T_1}, t\in[T_1,T],\\ 0, t\notin[0,T].\end{cases}$ Поэтому связь параметров *U*, T_1, и *T*, обеспечивающая неизменность $D\left\{\hat{\tau}/\tau\right\}$ имеет вид $\int\limits_0^T[s'(t)]^2dt=\dfrac{U^2T}{T_1(T-T_1)}=const$.

Рекомендуемая литература

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. – М.: «Радиотехника»,2004.
2. Горяинов В. Т., Журавлев А. Г., Тихонов В. И. Статистическая радиотехника: Примеры и задачи. Учебное пособие для ВУЗов / под ред. В. И. Тихонова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Сов. Радио, 1980 г.

3. Иванов М. Т., Сергиенко А. Б., Ушаков В. Н. Теоретические основы радиотехники: Учеб.пособие. / Под ред. В. Н. Ушакова. М.: Высш. школа, 2002.
4. Информационные технологии в радиотехнических системах: Учеб.пособие / В. А. Васин, И. Б. Власов, Ю. М. Егоров и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003.
5. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. Пер. с англ. под ред. В.С. Кельзона. – М.: Сов.радио, 1971.
6. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003.
7. Прокис Джон Цифровая связь. Пер с англ./ Под ред. Д.Д. Кловского.– М.: Радио и связь, 2000.– 800с.
8. Радиосистемы передачи информации: Учебное пособие для вузов/ В.А. Васин, В.В. Калмыков, Ю.Н. Себякин, А.И. Сенин, И.Б. Федоров; под ред. И.Б. Федорова и В.В. Калмыкова.– М.: Горячая линия–Телеком, 2005. – 472 с.
9. Радиотехнические системы: Учебник для ВУЗов по специальности «Радиотехника» / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др.; под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Высшая школа, 1990 г.
10. Радиотехнические системы: учебник для студентов высших учебных заведений / Ю. М. Казаринов и др.; под ред. Ю. М. Казаринова – М.: Издательский центр «Академия», 2008 г.
11. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для ВУЗов. Стандарт третьего поколения / под ред. В. Н. Ушакова – СПб.: Питер, 2014 г.
12. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник; под ред. Ширмана Я.Д. – М.: ЗАО «Маквис», 1998.
13. Сетевые спутниковые радионавигационные системы/ [В.С. Шебшаевич, ПП.Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др.]; под ред. В.С.Шебшаевича. – М.: Радио и связь, 1993.
14. Системы мобильной связи: Учебное пособие для вузов/ В.П. Ипатов, В.К. Орлов, И.М. Самойлов, В.Н. Смирнов; под ред. В.П. Ипатова.– Горячая линия–Телеком, 2003.– 272 с
15. Скляр Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е издание.: Пер с англ.– М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.– 1104с
16. Теория обнаружения сигналов / П. С. Акимов, П. А. Бакут, В. А. Богданович и др.; Под ред. П. А. Бакута. М.: Радио и связь, 1984.
17. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: Учеб.пособие для вузов.-М.:Радио и связь,1991
18. Френкс Л. Теория сигналов. – М: Сов. Радио, 1974.
19. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов : принципы и приложения / В. Ипатов ; пер. с англ. под ред. авт. - Москва : Техносфера, 2007. - 487 с
20. Ярлыков М.С. Статистическая теория радионавигации.- М.: Радио и связь, 1988