

70X
10

p-250/
3001/11
62

ISSN 0033-8486

РАДИОТЕХНИКА

11 2001

www.webcenter.ru/~iprzhr/

В НОМЕРЕ:

ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ

РАДИОСИСТЕМЫ

Выпуск 57 Электродинамика и техника
телекоммуникационных систем, № 2

Внимание!
Этот номер журнала вышел с ПРИЛОЖЕНИЕМ.
См. 2 с. обложки



Тел./факс: (095) 925-9241
E-mail: iprzhr@online.ru
<http://www.webcenter.ru/~iprzhr/>

Журнал переводится на английский язык
и издается компанией Begell House, Inc. под названием
TELECOMMUNICATIONS AND RADIO ENGINEERING

ПОДПИСКА НА ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ ПО МОСКВЕ ЧЕРЕЗ ИНТЕРНЕТ WWW.GAZETY.RU

416

Информационная безопасность радиоэлектронных систем

УДК 621.391

Анализ скрытности передачи информации на основе импульсной частотно-временной модуляции шумовой несущей

А.П. Трифонов, В.И. Парфенов

Показано, что одним из способов повышения информационной безопасности радиоэлектронной системы является применение сигналов с импульсной частотно-временной модуляцией шумовой несущей; определены условия достижения абсолютной скрытности, а также пути увеличения относительной скрытности факта передачи информации радиоэлектронной системой, использующей такие сигналы.

It was shown that the application of signals with pulse frequency time modulation of noise carrier is one of the method of increasing of information security of radioelectronic system. The conditions of absolute security and the ways of increasing of relative security of information transmission of radioelectronic system, using such signals, are found.

Важным фактором, определяющим информационную безопасность радиоэлектронных систем (РЭС), является их скрытность. Общее требование скрытности РЭС включает три самостоятельных условия: во-первых, обеспечение скрытности самого факта работы радиолинии; во-вторых, обеспечение скрытности факта наличия в данном сигнале информации (факта передачи информации); в-третьих, обеспечение скрытности самой информации [1–4]. Обычно при радиотехнической разведке вначале с помощью разведывательного приемника устанавливается факт работы РЭС, т. е. определяется, излучает ли РЭС сигнал или нет. При этом решается обычная статистическая задача обнаружения сигнала на фоне шума [3]. Если в результате выносится решение о наличии сигнала в реализации наблюдаемых данных, то это автоматически означает, что происходит передача информации РЭС. Следовательно, из первого условия скрытности в этом случае автоматически следует второе.

Один из наиболее простых и часто используемых на начальном этапе радиотехнической раз-

ведки разведывательных приемников – это так называемый энергетический приемник (ЭП) [2, 3, 5]. Поэтому, если рассматриваемый метод передачи не является стойким (в смысле необнаружения) к ЭП, то использование этого метода для повышения скрытности передачи информации вряд ли целесообразно. Естественно, метод передачи, стойкий к ЭП, может оказаться не стойким по отношению к другим способам радиотехнической разведки. Тем не менее, стойкость к ЭП представляется необходимым (но возможно не всегда достаточным) свойством, которым должен обладать полезный сигнал.

Для повышения скрытности факта работы радиолинии применяют различные методы передачи, стойкие к ЭП. В частности, известно [2], что увеличение базы сигнала, а также уменьшение входного отношения сигнал-шум (ОСШ) в полосе линейной части ЭП приводит к повышению скрытности метода передачи. Недостатки, присущие этим методам, хорошо известны. К ним, в первую очередь, следует отнести существенное усложнение передатчика и приемника, а также увеличение требуемых полосы частот и длительности сигнала.

Возможная альтернатива такому подходу – использование сигналов с импульсной частотно-временной модуляцией шумовой несущей (ИЧВМ ШН) [6, 7]. В этом случае РЭС постоянно излучает шумовое несущее колебание, представляющее собой реализацию узкополосного случайного процесса. Если полезная информация не передается, то центральная частота спектра мощности такого процесса постоянна и равна ν_1 . Для передачи информации частота шумовой несущей изменяется на ограниченном отрезке времени и принимает значение $\nu_2 \neq \nu_1$. Таким образом, факт передачи информации не следует автоматически из факта обнаружения работы радиолинии. Для обнаружения факта передачи полезной информации при таком подходе необходимо определить, изменяется ли на некотором интервале времени центральная частота спектра мощности шумовой несущей или нет. Очевидно, что применение ИЧВМ ШН требует значительных энергетических затрат на излучение немодулированной шумовой несущей. Однако возможно, что эти затраты окупятся простотой аппаратной реализации передатчика и приемника [6, 7], а также повышением информационной безопасности РЭС вследствие высокой скрытности факта передачи информации.

Ц е л ь р а б о т ы – повышение информационной безопасности РЭС на основе использования ИЧВМ ШН.

С этой целью исследуем степень скрытности факта передачи полезной информации посредством ИЧВМ ШН. В соответствии с [6, 7] сигнал с ИЧВМ ШН, принимаемый на интервале времени $[0; T]$, запишем в виде

$$s(t, \lambda) = \{1 - I[(t - \lambda)/\tau]\} \xi_1(t) + I[(t - \lambda)/\tau] \xi_2(t), \quad (1)$$

где τ – длительность модулирующего импульса; $I(x) = 1$ при $|x| < \frac{1}{2}$ и $I(x) = 0$ при $|x| > \frac{1}{2}$; $\xi_i(t)$ – реализации независимых центрированных гауссовских узкополосных стационарных случайных процессов со спектрами мощности $G_i(\omega) = G_0 \{f[(\nu_i - \omega)/\Omega_s] + f[(\nu_i + \omega)/\Omega_s]\} / 2$, $i = 1, 2$ (функция $f(x) = f(-x)$ определяет форму спектра мощности и нормирована так, что $\max f(x) = 1$,

$$\int_{-\infty}^{\infty} f^2(x) dx = 1); \nu_i \text{ и } \Omega_s - \text{соответственно цен-}$$

тральные частоты и эквивалентная полоса частот процессов $\{\xi_i(t)\}$, причем $\nu_i \gg \Omega_s$. Неизвестное временное положение модулирующего импульса λ в (1) принимает значения из априорного интервала $[\Lambda_1; \Lambda_2]$, расположенного внутри интервала наблюдения $[0; T]$, так что $\frac{\tau}{2} < \Lambda_1 < \Lambda_2 < T - \frac{\tau}{2}$.

Следовательно, процессы $\{\xi_i(t)\}$ имеют спектры мощности одинаковой формы, но с разными центральными частотами. Так как $\nu_2 \neq \nu_1$, то модуляция шумовой несущей осуществляется изменением параметра λ в соответствии с передаваемым сообщением.

Введем в рассмотрение три гипотезы:

$$H_1 : x(t) = s(t, \lambda_0) + n(t) \quad (2)$$

– реализация наблюдаемых данных при наличии факта передачи информации;

$$H : x(t) = n(t) \quad (3)$$

– реализация наблюдаемых данных при наличии только шума;

$$H_0 : x(t) = \xi_1(t) + n(t) \quad (4)$$

– реализация наблюдаемых данных при отсутствии факта передачи информации (отсутствии полезной информации в передаваемом сигнале). В (2)–(4) $n(t)$ – гауссовский белый шум с одномерной спектральной плотностью N_0 ; λ_0 – истинное значение неизвестного временного положения модулирующего импульса.

Для обнаружения факта передачи информации необходимо осуществить проверку гипотез (2) и (4), в то время как для обнаружения факта работы радиолинии требуется осуществлять проверку гипотез (2) и (3) или (4) и (3). Применение метода максимального правдоподобия (МП) приводит к следующему алгоритму обнаружения факта передачи информации (факта наличия ИЧВМ ШН) [6, 7]:

$$\begin{aligned} & H_1 \\ & \sup M(\lambda) > h, \quad \lambda \in [\Lambda_1; \Lambda_2], \\ & H_0 \end{aligned} \quad (5)$$

где $M(\lambda) = \int_{\lambda-\tau/2}^{\lambda+\tau/2} [y_2^2(t) - y_1^2(t)] dt / N_0$, $y_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(v) H_i(t-v) dv$ – сигнал на выходе узкополосного фильтра с импульсной характеристикой $H_i(t)$.

Передаточная функция $H_i(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} H_i(t) \exp(-i\omega t) dt$ этого фильтра удовлетворяет условию $|H_i(\omega)|^2 = 2G_i(\omega) / N_0 \{1 + 2G_i(\omega) / N_0\}^{-1}$. Порог обнаружения h в (5) определяется выбранным критерием оптимальности.

Применение ЭП [2, 3, 5] приводит к алгоритму обнаружения

$$L = \int_0^T y_0^2(t) dt \Big/ N_0 \begin{matrix} H_1 \\ > \\ < \\ H_0 \end{matrix} h_0, \quad (6)$$

где $y_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(v) H_0(t-v) dv$ – сигнал на выходе фильтра с импульсной характеристикой $H_0(t)$. Обычно предполагается, что передаточная функция $H_0(\omega)$ этого фильтра является прямоугольной: $|H_0(\omega)|^2 = I[(v_f - \omega) / \Omega_f] + I[(v_f + \omega) / \Omega_f]$. В общем случае центральная частота v_f и эквивалентная полоса частот Ω_f фильтра могут не совпадать с соответствующими параметрами сигнала, т. е. $v_f \neq v_1$ (или $v_f \neq v_2$) и $\Omega_f \neq \Omega_s$.

Для оценки степени скрытности факта передачи информации РЭС, использующей сигналы с ИЧВМ ШН, сравним характеристики обнаружения таких сигналов максимально правдоподобным (5) и энергетическим (6) приемниками. Как известно, обнаружитель является состоятельным [8], если при заданной вероятности ошибки 1-го рода $\alpha \leq \epsilon < 1$ вероятность ошибки 2-го рода $\beta \rightarrow 0$ при неограниченном увеличении выходного ОСШ. Для МП обнаружителя выходное ОСШ

$$z_m^2 = [\langle M(\lambda_0) | H_1 \rangle - \langle M(\lambda_0) | H_0 \rangle]^2 \times \\ \times \left\{ \langle [M(\lambda_0) - \langle M(\lambda_0) \rangle]^2 | H_1 \rangle \right\}^{-1},$$

а для энергетического обнаружителя

$$z_m^2 = [\langle L | H_1 \rangle - \langle L | H_0 \rangle]^2 \left\{ \langle [L - \langle L \rangle]^2 | H_1 \rangle \right\}^{-1},$$

где угловые скобки означают усреднение по реализации наблюдаемых данных.

Рассмотрим вначале МП приемник (5). В соответствии с [7] вероятности ошибок 1-го рода α_m и 2-го рода β_m при использовании МП алгоритма (5) имеют вид

$$\alpha_m \approx \begin{cases} 1 - \exp[-mu \exp(-u^2/2)/\sqrt{2\pi}], & u \geq 1, \\ 1, & u < 1, \end{cases} \quad (7)$$

$$\beta_m \approx \exp[-mu \exp(-u^2/2)/\sqrt{2\pi}] \{ \Phi(u - z_m) - \\ - 2 \exp[z_m^2/2 + z_m(z_m - u)] \Phi(u - 2z_m) + \\ + \exp[2z_m^2 + 2z_m(z_m - u)] \Phi(u - 3z_m) \} \quad (8)$$

при $u \geq 1$ и $\beta_m = 0$ при $u < 1$.

В (7), (8)

$$m = (\Lambda_2 - \Lambda_1) / \tau, \quad u = h / \sigma_s + z_m / 2,$$

$$z_m = 2q\sqrt{\mu} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(x)[f(x) - f(x - \epsilon_s)]}{1 + qf(x)} dx \times$$

$$\times \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{f(x) - f(x - \epsilon_s)}{1 + qf(x)} \right)^2 dx \right\}^{-1/2},$$

$$\sigma_s^2 = \mu q^2 \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{f(x) - f(x - \epsilon_s)}{1 + qf(x)} \right)^2 dx,$$

$$\mu = \Omega_s \tau / 2\pi, \quad q = G_0 / N_0, \quad \epsilon_s = (v_2 - v_1) / \Omega_s, \quad (9)$$

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt / \sqrt{2\pi}.$$

Как известно [8], приемник МП всегда является состоятельным. Действительно, фиксируя вероятность ошибки 1-го рода α_m (7), определяя соответствующий порог обнаружения h и подставляя его в (8), получаем, что при $z_m \rightarrow \infty$ вероятность ошибки 2-го рода $\beta_m \rightarrow 0$. Отметим, что добиться неограниченного увеличения выходного ОСШ z_m (9) возможно при выполнении условия $\mu \rightarrow \infty$. Эффективность состоятельного алгоритма обнаружения (5) удобно характеризовать парамет-

ром $q_{\text{тп}}$, представляющим собой отношение мощности сигнала к мощности помехи в полосе частот сигнала (пороговое входное ОСШ). Назовем пороговым входным ОСШ $q_{\text{тп}}$ такое значение параметра q (9), которое обеспечивает заданные величины вероятностей ошибок 1-го и 2-го родов. Из (7), (8) следует, что при $\alpha_m = \beta_m = p$ пороговое входное ОСШ $q_{\text{тп}}$ можно найти из решения системы уравнений вида

$$\begin{aligned} \Phi(u - z_m) - 2 \exp\left[z_m^2/2 + z_m(z_m - u)\right] \Phi(u - 2z_m) + \\ + \exp\left[2z_m^2 + 2z_m(z_m - u)\right] \Phi(u - 3z_m) = 1/(1-p), \\ \exp\left[-mu \exp(-u^2/2)/\sqrt{2\pi}\right] = 1-p, \end{aligned} \quad (10)$$

где параметр $z_m = z_m(q_{\text{тп}})$ определен в (9).

Перейдем теперь к анализу ЭП (6). Характеристики обнаружения такого приемника можно найти, если учесть, что при больших значениях параметра μ (9) величина L (6) является приближенно гауссовской случайной величиной как при выполнении гипотезы H_1 (2), так и при выполнении гипотезы H_0 (4). Тогда вероятности ошибок 1-го и 2-го родов принимают вид

$$\alpha_e = 1 - \Phi[(h_0 - m_0)/\sigma_0], \quad \beta_e = \Phi[(h_0 - m_1)/\sigma_1], \quad (11)$$

где $m_0 = \mu\chi\varphi(1 + qg_{11})$, $\sigma_0^2 = \mu\chi\varphi[1 + 2qg_{11} + q^2g_{21}]$ – математическое ожидание и дисперсия случайной величины (6) при выполнении гипотезы H_0 (4); $m_1 = m_0 + \mu\varphi q(g_{12} - g_{11})$, $\sigma_1^2 = \sigma_0^2 + \mu\varphi q \times [q(g_{22} - g_{21}) + 2(g_{12} - g_{11})]$ – математическое ожидание и дисперсия случайной величины (6) при выполнении гипотезы H_1 (2); $\chi = T/\tau$,

$$\varphi = \Omega_f/\Omega_s, \quad g_{kn} = \int_{-1/2}^{1/2} f^k(\varphi x + \varepsilon_n) dx, \quad k, n = 1, 2,$$

$$\varepsilon_i = (v_f - v_i)/\Omega_s, \quad i = 1, 2, \text{ причем } \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \varepsilon_s.$$

Полагая в (11) вероятность α_m фиксированной, найдем порог обнаружения α_e и подставим его в выражение для β_e . Тогда получаем

$$\beta_e = \Phi[\eta \arccos \Phi(1 - \alpha_e) - z_e \operatorname{sgn}(\xi)], \quad (12)$$

где $\arccos \Phi(y)$ – функция, обратная интегралу вероятностей $\Phi(y)$, т. е. удовлетворяющая условию $\Phi[\arccos \Phi(y)] = y$,

$$\eta^2 = \sigma_0^2/\sigma_1^2 = \left\{ 1 + \frac{q[q(g_{22} - g_{21}) + 2(g_{12} - g_{11})]}{\chi[1 + 2qg_{11} + q^2g_{21}]} \right\}^{-1},$$

$$z_e = |m_1 - m_0|/\sigma_1 = \sqrt{\mu\varphi q} |g_{12} - g_{11}| \times$$

$$\times \left\{ \chi + 2q[g_{12} + (\chi - 1)g_{11}] + q^2(g_{22} - g_{21}) \right\}^{-1/2}$$

– выходное ОСШ для ЭП; $\operatorname{sgn}(x) = 1$ при $x > 0$ и $\operatorname{sgn}(x) = -1$ при $x < 0$, $\xi = g_{12} - g_{11}$. Согласно (12), если $m_1 > m_0$ или, что тоже самое,

$$\xi = g_{12} - g_{11} > 0 \quad (13)$$

и $z_e \rightarrow \infty$, то ЭП будет состоятельным, так как в этом случае при фиксированной величине α_e вероятность ошибки 2-го рода $\beta_e \rightarrow 0$. Выполнение условия (13) существенно зависит от соотношений между параметрами φ , ε_1 и ε_2 . На рис. 1 изображены зависимости ξ от ε_1 для различных значений φ и ε_2 , рассчитанные в предположении, что форма спектра мощности шумовой несущей $\{\xi_i(t)\}$, $i = 1, 2$, описывается кривой Лоренца, так что

$$f(x) = [1 + (\pi x/2)^2]^{-1}. \quad (14)$$

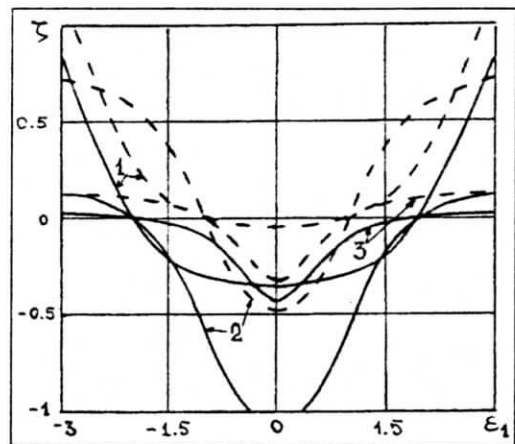


Рис. 1

Кривые на рис. 1 построены при $\mu = 10^3$, $p = 10^{-2}$. Сплошные кривые соответствуют

$\varepsilon_2 = -2$, штриховые — $\varepsilon_2 = 1$; кривые 1 — $\varphi = 5$, 2 — $\varphi = 2$, 3 — $\varphi = 0,5$.

Анализ условия (13) и кривых на рис. 1 показывает, что алгоритм обнаружения (6) является несостоятельным, если $\varepsilon_1 \approx 0$, т. е. если центральная частота полосового фильтра ЭП $\nu_f \approx \nu_1$ (приемник настроен на частоту шумовой несущей ν_1). В частности, из рис. 1 следует, что при любых значениях φ и при $\varepsilon_2 = 1$ условие состоятельности (13) ЭП будет выполнено, если $|\varepsilon_1| > 1$. Для того, чтобы ЭП стал состоятельным при $\varepsilon_1 = 0$, необходимо в алгоритме (6) изменить правило выбора решения, а именно, использовать инверсный алгоритм обнаружения факта передачи информации вида

$$\begin{array}{l} H_1 \\ L < h_0 \\ > \\ H_0 \end{array} \quad (15)$$

Действительно, в этом случае вероятности ошибок 1-го и 2-го родов $\alpha_e = \Phi[(h_0 - m_0)/\sigma_0]$, $\beta_e = 1 - \Phi[(h_0 - m_1)/\sigma_1]$. Полагая здесь вероятность α_e фиксированной, находим порог h_0 и после подстановки его в выражение для β_e получаем $\beta_e = \Phi[z_e \operatorname{sgn}(\zeta) + \eta \operatorname{arcsin} \Phi(1 - \alpha_e)]$. Отсюда следует, что при $\varepsilon_1 = 0$ ($\zeta < 0$) и $z_e \rightarrow \infty$ алгоритм (15) будет состоятельным, так как при фиксированной величине α_e вероятность $\beta_e \rightarrow 0$, когда $z_e \rightarrow \infty$. Таким образом, при $\zeta > 0$ состоятельным является алгоритм (6), а при $\zeta < 0$ — алгоритм (15). Учитывая, что при радиоразведке осуществить проверку условия (13) не представляется возможным из-за отсутствия сведений о форме сигнала, выбор структуры ЭП (обычная (6) или инверсная (15)) осуществляется практически произвольно. В результате, существенно возрастает скрытность факта передачи информации (факта наличия ИЧВМ ШН).

Если $\varepsilon_1 \neq 0$, то возможно выполнение условия (13). Например, если спектр мощности шумовой несущей прямоугольный, т. е.

$$f(x) = I(x), \quad (16)$$

то нетрудно показать, что ЭП (6) будет состоятельным, если выполняется одно из следующих условий:

- 1) $|\varphi - 1|/2 < |\varepsilon_2| < (\varphi + 1)/2$, $|\varepsilon_1| > (\varphi + 1)/2$,
- 2) $-|\varphi - 1|/2 < \varepsilon_2 < |\varphi - 1|/2$, $|\varepsilon_1| > (\varphi + 1)/2$,
- 3) $|\varphi - 1|/2 < |\varepsilon_1| < (\varphi + 1)/2$, $|\varepsilon_1| > |\varepsilon_2|$,
- 4) $|\varphi - 1|/2 < |\varepsilon_1| < (\varphi + 1)/2$, $-|\varphi - 1|/2 < \varepsilon_2 < |\varphi - 1|/2$.

Таким образом, если полоса пропускания фильтра перекрывает одновременно полосы частот, занимаемых спектрами мощности процессов $\{\xi_1(t)\}$ и $\{\xi_2(t)\}$, то ЭП (6) не является состоятельным.

Заметим, что несостоятельность ЭП (6) означает, что скрытность факта передачи информации РЭС в этом случае абсолютная. Действительно, если условие (13) не выполняется, то при применении ЭП (6) обнаружить факт передачи информации РЭС, использующей сигналы с ИЧВМ ШН, с заданными вероятностями ошибок 1-го и 2-го родов не представляется возможным. Если условие (13) выполняется и ЭП (6) состоятелен, то скрытность факта передачи информации в этом случае относительная. Это означает, что для обнаружения факта передачи информации РЭС, использующей сигналы с ИЧВМ ШН, с заданными вероятностями ошибок с помощью ЭП (6) требуется шумовая несущая со значительно большей мощностью, чем при использовании МП обнаружителя (5). Определим пороговое входное ОСШ q_{te} для ЭП (6), как такое значение параметра q (9), которое обеспечивает заданные величины вероятностей ошибок 1-го и 3-го рода α_e и β_e (11). Полагая $\alpha_e = \beta_e = p$, нетрудно показать, что параметр q_{te} при выполнении условия (13) может быть найден из решения уравнения

$$z_e = (1 + \eta) \operatorname{arcsin} \Phi(1 - p). \quad (17)$$

Количественно степень скрытности факта передачи информации при использовании ИЧВМ ШН можно охарактеризовать отношением $\kappa = q_{te}/q_{tm}$, где q_{tm} и q_{te} — пороговые входные ОСШ, которые находятся из решения уравнений (10) и (17) соответственно. Чем больше κ , тем

большей скрытностью обладает РЭС и тем труднее обнаружить факт передачи информации такой РЭС с помощью ЭП. На рис. 2 и 3 приведены зависимости $\kappa = q_{te}/q_{tm}$ (дБ) от φ для лоренцовского

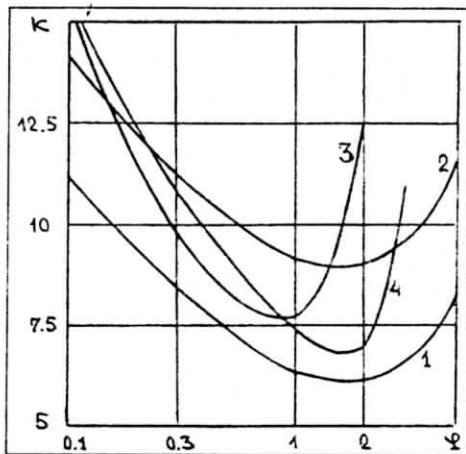


Рис. 2

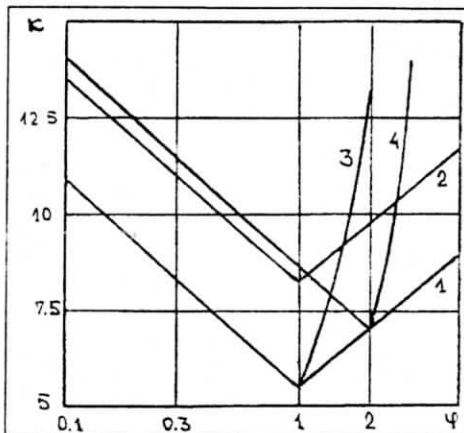


Рис. 3

(14) и прямоугольного (16) спектров мощности шумовой несущей соответственно при $\mu = 10^3$, $p = 10^{-2}$. Кривые 1 построены для $\varepsilon_s = \varepsilon_1 = 3$, $\varepsilon_2 = 0$, $\chi = 11$, $m = 10$; 2 — $\varepsilon_s = \varepsilon_1 = 3$, $\varepsilon_2 = 0$, $\chi = 51$, $m = 50$; 3 — $\varepsilon_s = \varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 0$, $\chi = 11$, $m = 10$; 4 — $\varepsilon_s = 1$, $\varepsilon_2 = 0.5$, $\varepsilon_1 = 1.5$, $\chi = 11$, $m = 10$. Из анализа зависимостей следует, что даже в случае, когда ЭП (6) является состоятельным, для достижения заданных характеристик обнаружения необходимо значительно увеличить мощность шумовой несущей по сравнению с МП обнаружителем. Действительно, например, при $\varepsilon_s = 3$, $\varepsilon_2 = 0$, $\chi = 11$,

$m = 10$ входное ОСШ при использовании ЭП должно быть как минимум на (7,5...8) дБ (при $\varphi = 1$) больше, чем в случае МП обнаружителя. Кроме того, скрытность факта передачи информации возрастает с ростом параметра χ , с уменьшением параметра $|\varepsilon_s|$, с увеличением отклонения параметра φ от 1, но слабо зависит от формы спектра мощности шумовой несущей и величины параметра μ . Следовательно, соответствующий выбор перечисленных параметров позволяет обеспечить требуемый уровень скрытности передачи информации на основе ИЧВМ ШН.

- Установлено, что применение импульсной частотно-временной модуляции шумовой несущей обеспечивает высокую степень скрытности факта передачи информации радиоэлектронной системой.

Приведенные результаты получены при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований

Литература

1. Семенов А.М., Сикарев А.А. Широкополосная радиосвязь. — М.: Воениздат, 1970.
2. Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И. и др. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / Под ред. Г.И. Тузова. — М.: Радио и связь, 1985.
3. Борисов В.И., Зинчук В.М. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. — М.: Радио и связь, 1999.
4. Защита от радиопомех / Под ред. В.М. Максимова. — М.: Сов.радио, 1976.
5. Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals. — Proc. IEEE, 1967, v. 55, N4.
6. Трифонов А.П., Парфенов В.И. Импульсная частотно-временная модуляция шумовой несущей. — Радиотехника и электроника, 1988, т. 33, № 1.
7. Трифонов А.П., Парфенов В.И. Теоретическое и экспериментальное исследования квазиправдоподобного приемника случайного сигнала. — Радиотехника и электроника, 1991, т. 36, № 4.
8. Трифонов А.П. Обнаружение сигналов с неизвестными параметрами. В кн.: Теория обнаружения сигналов. — М.: Радио и связь, 1984.

Поступила после доработки 4 декабря 2000 г.