РАДИОТЕХНИКА

Н.Н. Оськин,
Департамент информационных технологий, связи и защиты информации МВД России

Н.С. Хохлов,
доктор технических наук, профессор

О.В. Четкин,
кандидат технических наук, Воронежский институт ФСИН России

РЕАКЦИЯ ТАНДЕМНЫХ ЦИФРОВЫХ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА ПАРАЗИТНЫЕ ПРИРАЩЕНИЯ ФАЗЫ СИГНАЛА В ОПОРНОМ КАНАЛЕ

REACTION OF TANDEM DIGITAL SYNTHESIZERS OF FREQUENCIES ANGULAR MODULATION ON PARASITIC INCREMENTS OF THE PHASE SIGNAL IN THE BASIC CHANNEL

Рассмотрен метод компенсации паразитных приращений фазы на выходе ИФМ тандемного частотно-модулированного цифрового синтезатора частот с двухточечной угловой модуляцией. Описана структурная схема синтезатора, получена передаточная функция и проведен анализ амплитудно-частотных характеристик в зависимости от параметров узлов синтезатора.

The method of compensation for spurious increments of output phase IPM tandem frequency-modulated digital frequency synthesizer with a two-point angular modulation. A block diagram of the synthesizer is described, the transfer function is obtained and the analysis of amplitude-frequency characteristics depending on the parameters of the synthesizer units is made.

В системах подвижной радиосвязи в качестве диапазонных частотно-модулированных возбудителей передатчиков ОВЧ и УВЧ диапазонов наряду с однокольцевыми стали использоваться двухкольцевые, или тандемные, частотно-модулированные цифровые синтезаторы частот (ЧМЦСЧ) с последовательным включением двух колец импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ).

В [2] была рассмотрена структурная схема тандемного ЧМЦСЧ с частотной модуляцией управляемых генераторов первого кольца ИФАПЧ1 методом ЧМ12АК и второго кольца ИФАПЧ2 методом ЧМ2, которая представлена на рис. 1.

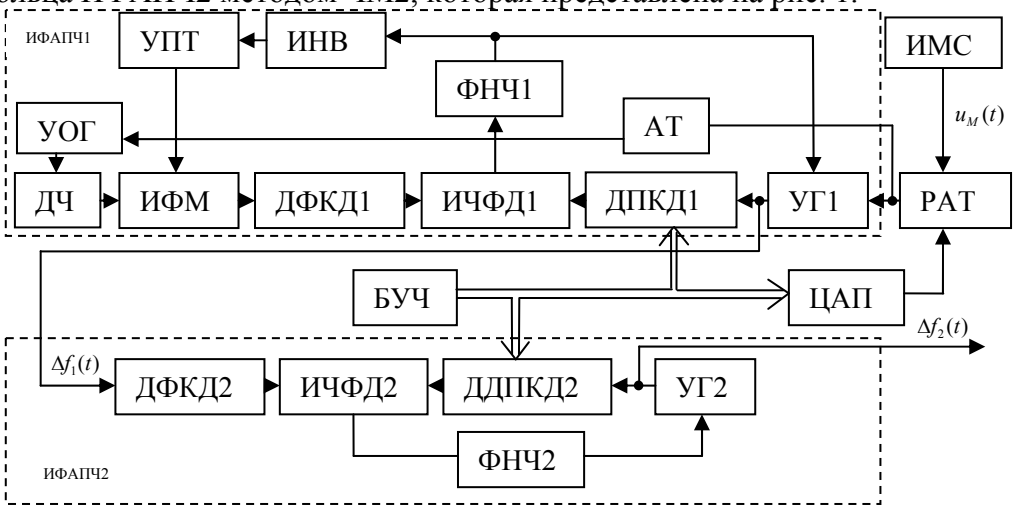


Рис. 1. Структурная схема тандемного ЧМЦСЧ с частотной модуляцией УГ1 и УОГ первого кольца ИФАПЧ1 методом ЧМ12АК и второго кольца ИФАПЧ методом ЧМ2

На этом рисунке введены следующие условные обозначения: УГ1, УГ2 — управляемые генераторы; ФНЧ1, ФНЧ2 — фильтры нижних частот; УОГ — управляемый опорный кварцевый генератор; ДЧ — дополнительный делитель частоты с фиксированным коэффициентом деления; РАТ — регулируемый аттенюатор; БУЧ — блок установки частоты; ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь; ДФКД1, ДФКД2 — делители частоты с фиксированным коэффициентом деления; ДПКД1 — делитель частоты с переменным коэффициентом деления; ДДПКД2 — дробный делитель частоты с переменным коэффициентом деления; АТ − аттенюатор; ИМС — источник моделирующего сигнала; ИЧФД1, ИЧФД2 — импульсные частотно-фазовые детекторы; ИНВ — инвертор; УПТ — усилитель постоянного тока; ИФМ — импульсно-фазовый модулятор.

Как следует из [2], представленная структурная схема эффективно ослабляет частотные искажения на нижних модулирующих частотах.

Однако введение второй точки модуляции с помощью ИФМ в опорный канал помимо преимуществ по ослаблению частотных искажений приводит к тому, что на ИФМ могут воздействовать различные дестабилизирующие факторы (пульсации питающих напряжений, паразитные связи между каскадами и т.п.), в результате чего на выходе ИФМ могут иметь место паразитные приращения фазы, что приведет в свою очередь к возникновению паразитной фазовой модуляции (ПФМ) на выходе первого кольца ИФАПЧ1 и как следствие ПФМ на выходе тандемного ЧМЦСЧ.

Поэтому целесообразно провести исследование реакции тандемного ЧМЦСЧ с частотной модуляцией УГ1 и УОГ первого кольца ИФАПЧ1 методом ЧМ12АК и второго кольца ИФАПЧ2 методом ЧМ2 на паразитные уходы фазы сигнала формирующегося на выходе ИФМ.

Для исследования реакции тандемного ЧМЦСЧ на паразитные уходы сигнала ИФМ составим эквивалентную схему этого синтезатора (рис. 2).

На этом рисунке приняты следующие обозначения:

$\Delta\varphi_M(p)$ — операторное изображение паразитных приращений фазы с выхода ИФМ;

$\Delta\varphi_1(p)$ — операторное изображение паразитных приращений фазы с выхода первого кольца ИФАПЧ1;

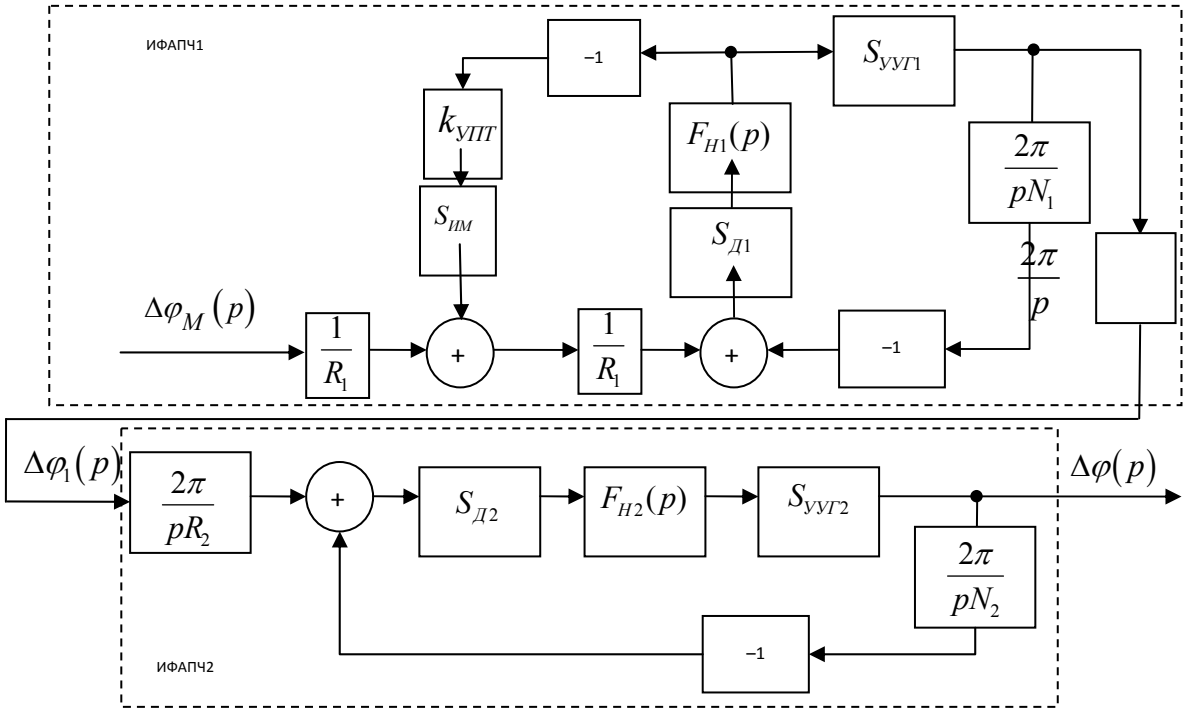


Рис. 2. Эквивалентная схема тандемного ЧМЦСЧ при частотной модуляции первого кольца ИФАПЧ1 методом ЧМ12АК и второго кольца ИФАПЧ2 методом ЧМ2 для исследования паразитных приращений фазы выходного сигнала ИФМ

$\Delta\varphi(p)$ — операторное изображение паразитных приращений фазы с выхода синтезатора;

$k_{УПТ}$ — коэффициент усиления УПТ;

$S_{ИМ}$ — крутизна модуляционной характеристики ИФМ;

$S_{УУГ1}$ — крутизна характеристики управления УГ1 по управляющему входу;

$S_{УУГ2}$ — крутизна характеристики управления УГ2 по управляющему входу;

$F_{н1}(p)$, $F_{н2}(p)$ — передаточные функции ФНЧ1 и ФНЧ2;

$S_{Д1}$, $S_{Д2}$ — крутизны детекторных характеристик ИЧФД1 и ИЧФД2.

На основании этой эквивалентной схемы передаточная функция (ПФ) «фаза-фаза» этого тандемного ЧМЦСЧ выразится следующим образом:

$$\mathrm{E}_{\Delta\varphi,\Delta\varphi_M}(p) = \mathrm{E}_{\Delta\varphi_1,\Delta\varphi_M}(p) \cdot \mathrm{E}_{\Delta\varphi,\Delta\varphi_1}(p) = \frac{\Delta\varphi(p)}{\Delta\varphi_M(p)}, \quad (1)$$

где $\mathrm{E}_{\Delta\varphi 1,\Delta\varphi_M}(p)=\dfrac{\Delta\varphi_1(p)}{\Delta\varphi_M(p)}$, $\mathrm{E}_{\Delta\varphi,\Delta\varphi 1}(p)=\dfrac{\Delta\varphi(p)}{\Delta\varphi_1(p)}$;

причем $\mathrm{E}_{\Delta\varphi 1,\Delta\varphi_M}(p)$ и $\mathrm{E}_{\Delta\varphi,\Delta\varphi 1}(p)$ — ПФ соответственно первого и второго колец ИФАПЧ, включенных последовательно в схеме на рис. 2.

После преобразований и нормировки на N_1/R_1 и N_2/R_2 соответственно получим:

$$\mathrm{E}^{н}_{\Delta\varphi 1,\Delta\varphi_M}(p)=\frac{1}{1+pT_1\cdot\dfrac{1}{F_{н1}(p)}(1+N_1\cdot F_{н1}(p))}; \tag{2}$$

$$\mathrm{E}^{н}_{\Delta\varphi,\Delta\varphi 1}(p)=\frac{1}{1+pT_2\cdot\dfrac{1}{F_{н2}(p)}}. \tag{3}$$

В выражениях 2 и 3 приняты следующие обозначения:

$T_1=\dfrac{N_1}{2\pi\cdot S_{УУГ1}\cdot S_{Д1}}$ — постоянная времени кольца ИФАПЧ1;

$T_2=\dfrac{N_2}{2\pi\cdot S_{УУГ2}\cdot S_{Д2}}$ — постоянная времени кольца ИФАПЧ2;

$N_1=k_{УПТ}\cdot\dfrac{1}{R_1}\cdot S_{Д1}\cdot S_{ИМ}$ — коэффициент регулирования.

При использовании в качестве ФНЧ1 и ФНЧ2 в цепях управления колец ИФАПЧ1 и ИФАПЧ2 интегрирующих фильтров, имеющих передаточные функции соответственно

$$F_{н1}(p)=\frac{1}{1+pT_{н1}}, \tag{4}$$

$$F_{н2}(p)=\frac{1}{1+pT_{н2}}, \tag{5}$$

выражения для нормированных ПФ тандемного ЧМЦСЧ запишутся следующим образом:

$$\mathrm{E}^{н}_{\Delta\varphi 1,\Delta\varphi_M}(p)=\frac{1}{1+pT_1\cdot\dfrac{1}{F_{н1}(p)}(1+N_1\cdot F_{н1}(p))}=\frac{1}{1+pT_1\left(1+\dfrac{N_1}{1+pT_{н1}}+pT_{н1}+\dfrac{pT_{н1}\cdot N_1}{1+pT_{н1}}\right)}= \tag{6}$$

$$=\frac{1}{1+p^2\cdot T_1\cdot T_{н1}+p\cdot T_1(1+N_1)};$$

$$\mathrm{E}^{н}_{\Delta\varphi,\Delta\varphi 1}(p)=\frac{1}{1+pT_2\cdot\dfrac{1}{F_{н2}(p)}}=\frac{1}{1+pT_2(1+pT_{н2})}. \tag{7}$$

Нормированная ПФ тандемного ЧМЦСЧ при паразитных приращениях фазы выходного сигнала ИФМ примет вид:

$$\mathrm{E}^{н}_{\Delta\varphi,\Delta\varphi_{м}}(p)=\frac{1}{1+p^2\cdot T_1\cdot T_{н1}+p\cdot T_1(1+N_1)}\cdot\frac{1}{1+pT_2(1+pT_{н2})}. \quad (8)$$

Проверка устойчивости исследуемой схемы с использованием критерия Гурвица сводится к вычислению по коэффициентам характеристического уравнения определителей Гурвица, которые для устойчивой системы должны быть положительными.

В общем случае характеристическое уравнение линейной системы *n*-й степени имеет вид:

$$a_0p^n+a_1p^{n-1}+a_2p^{n-2}+\ldots+a_{n-1}p+a_n=0. \quad (9)$$

В данном случае следует учитывать, что в рассматриваемом тандемном ЧМЦСЧ кольца ИФАПЧ включены последовательно, поэтому необходимо составить характеристическое уравнение для обоих колец отдельно.

Таким образом, для схемы на рис. 1 характеристическое уравнение для первого кольца ИФАПЧ1 имеет вид:

$$1+p\cdot T_1(1+N_1)+p^2\cdot T_1\cdot T_{н1}=0. \quad (10)$$

Что касается характеристического уравнения для второго кольца ИФАПЧ2, то оно имеет вид:

$$1+pT_2+p^2\cdot T_2\cdot T_{н2}=0. \quad (11)$$

Таким образом, все характеристические уравнения представляют собой уравнение 2-й степени

$$a_0p^2+a_1p+a_2=0, \quad (12)$$

причем для уравнения (10)

$$a_0=T_1T_{н1};\ a_1=T_1(1+N_1);\ a_2=1;$$

для уравнения (11)

$$a_0=T_2T_{н2};\ a_1=T_2;\ a_2=1.$$

Для получения определителей Гурвица составляется таблица из коэффициентов характеристического уравнения *n*-й степени. В нашем случае для характеристических уравнений 2-й степени находятся два определителя.

Для уравнения (10)

$$\Delta_1=a_1=T_1(1+N_1),$$

$$\Delta_2=\begin{vmatrix}a_1 & a_3\\ a_0 & a_2\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}T_1(1+N_1) & 0\\ T_1T_{н1} & 1\end{vmatrix}=T_1(1+N_1).$$

Для уравнения (11)

$$\Delta_1=a_1=T_2,$$

$$\Delta_2=\begin{vmatrix}a_1 & a_3\\ a_0 & a_2\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}T_2 & 0\\ T_2T_{н1} & 1\end{vmatrix}=T_2.$$

Согласно критерию устойчивости Гурвица, система устойчива при положительных определителях (при $a_0\rangle 0$), следовательно, исследуемая схема тандемного ЧМЦСЧ в режиме паразитных приращений фазы выходного сигнала ИФМ устойчива, т.к. определители $\Delta_1\rangle 0$, $\Delta_2\rangle 0$.

Для анализа АЧХ «фаза-фаза» тандемного ЧМЦСЧ, отражающей реакцию синтезатора на паразитные приращения фазы на выходе ИФМ, воспользуемся нормированной ПФ, выражаемой формулой (8).

Заменив в (8) p на $i\Omega$, получим нормированную комплексную передаточную функцию «фаза-фаза» тандемного ЧМЦСЧ

$$\mathrm{E}^{н}_{\Delta\varphi,\Delta\varphi_м}(i\Omega)=\frac{1}{1+\Omega^2\cdot T_1\cdot T_{н1}+i\Omega\cdot T_1(1+N_1)}\cdot\frac{1}{1+i\Omega T_2-\Omega^2\cdot T_2\cdot T_{н2})}. \quad (13)$$

Разделяя нормированную комплексную ПФ на действительную и мнимую составляющие и находя модуль (13), получим выражение для АЧХ «фаза-фаза» тандемного синтезатора

$$\mathrm{E}^{н}_{\Delta\varphi,\Delta\varphi_м}(\Omega)=\frac{1}{\sqrt{1+\Omega^4\cdot T_1{}^2\cdot T_{н1}{}^2+\Omega^2\cdot T_1{}^2+\Omega^2\cdot T_1^2N_1^2)}}\cdot\frac{1}{\sqrt{1-\Omega^4\cdot T_2^2\cdot T_{н2}^2+\Omega^2T_2^2}}. \quad (14)$$

При условии, что $\Omega=2\pi\cdot F$, получим:

$$A^{н}_{\Delta\varphi,\Delta\varphi_м}(F)=\frac{1}{\sqrt{1+(2\pi\cdot F)^4\cdot T_1{}^2\cdot T_{н1}{}^2+(2\pi\cdot F)^2\cdot T_1{}^2+(2\pi\cdot F)^2\cdot T_1^2N_1^2)}}\cdot$$
$$\cdot\frac{1}{\sqrt{1-(2\pi\cdot F)^4\cdot T_2^2\cdot T_{н2}^2+(2\pi\cdot F)^2T_2^2}}. \quad (15)$$

На рис. 3 представлены графики $A^{H}_{\Delta\varphi,\Delta\varphi_м}(F)$ при $T_{н1}=1,6\cdot10^{-3}$ с и $T_{н2}=0,16\cdot10^{-5}$ с, причем сплошная линия соответствует $N_1=0$, штриховая — $N_1=10$, штрихпунктирная — $N_1=100$.

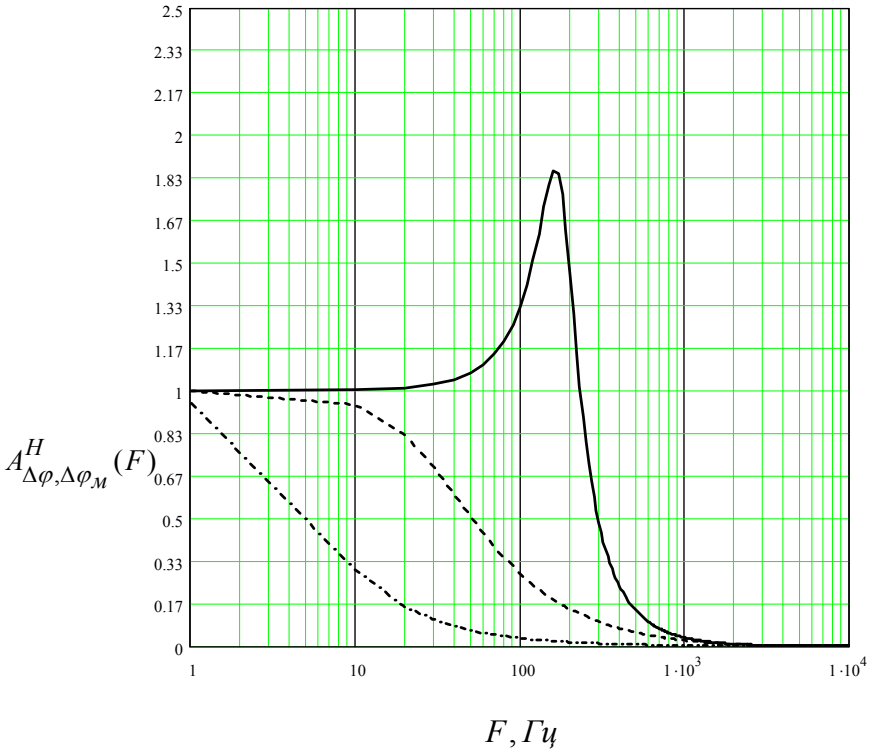


Рис. 3. АЧХ «фаза-фаза» тандемного ЧМЦСЧ, отражающая реакцию синтезатора на паразитные приращения фазы на выходе ИФМ при различных значениях N_1

Сравнительный анализ графиков АЧХ на рис. 3 показывает, что увеличение N_1 при действии паразитных приращений фазы, особенно если модуляция осуществляется цифровым сигналом с ограниченным спектром $F_н...F_в = (10...10^4)Гц$, значительно уменьшает паразитную угловую модуляцию выходного сигнала синтезатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хохлов Н.С., Хандога А.Г. Реакция частотно-модулированных цифровых синтезаторов частот с компенсацией и автокомпенсацией частотных искажений на паразитные приращения фазы сигнала в опорном канале // Вестник Воронежского института МВД России. — 2008. — №2. — С. 120—124.

2. Попов П.А., Четкин О.В. Компенсация частотных искажений в тандемных цифровых синтезаторах частот с угловой модуляцией // Вестник Воронежского института МВД России. — 2010. — №1. — С. 138—143.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ СТАТЬИ:

Оськин Николай Николаевич. Начальник отдела организации связи Управления связи.

Департамент информационных технологий, связи и защиты информации МВД России .

E-mail: osn007@mail.ru

Россия, 119049, г. Москва, ул. Житная, 16. Тел. 8(495) 667-00-37.

Хохлов Николай Степанович. Профессор кафедры ИКС и Т. Доктор технических наук, профессор.

Воронежский институт МВД России.

Россия, 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. 8(473)2476-485.

Четкин Олег Викторович. Старший преподаватель кафедры ТКОС. Кандидат технических наук.

Воронежский институт ФСИН России.

Россия, 394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, 1а. Тел. 8(473)2224-168.

Oskin Nikolay Nikolaevich. Chief of the division of organisation of communication.

Department of Information Technologies, Communication and Information Protection of the Ministry of the Interior of Russia .

Work address: Russia,119049, Moscow, Zhitnaya Str., 16. Tel. 8(495) 667-00-37.

Khokhlov Nikolay Stepanovich. Professor of the of ICS and T chair. Doctor of technical sciences, professor.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. 8(473) 2476-485.

Chetkin Oleg Viktorovich. Senior lecturer of the chair of technical complexes of security. Candidate of technical sciences.

Voronezh Institute of Federal Penitentiary Service of Russia.

Work address: Russia, 394072, Voronezh, Irkutskaya Str., 1a. Tel. 8(473)2224-168.

Ключевые слова к статье: тандемный синтезатор частот; угловая модуляция; паразитные приращения фазы.

Key words: tandem synthesizer of frequency; angular modulation; spurious phase increments.

УДК 621.396.42

А.Н. Лукин,
доктор физико-математических наук, профессор, Воронежский институт ФСИН

Г.В. Степанов,
НИИ «Вега»

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЁМНИКА-ОБНАРУЖИТЕЛЯ СИГНАЛА УПРАВЛЯЕМОГО ПАССИВНОГО РАССЕИВАТЕЛЯ С ИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ

SYNTHESIS OF OPTIMUM RECEIVER-DETECTING SIGNAL OF CONTROLLING PASSIVE SCATTERING WITH KNOWN CHARACTERISTICS OF THE PHASE MODULATION

Выполнен синтез оптимального приёмника-обнаружителя сигнала управляемого пассивного рассеивателя с фазовой модуляцией, приём которого осуществляется на фоне переотражений зондирующего сигнала и случайных помех. Использован метод максимального правдоподобия при известных параметрах модуляции сигнала управляемого пасссивного рассеивателя. Составлена блок-схема приёмника из типовых блоков радиоприёмных устройств.

Synthesis of receiver-detecting signal of controlling passive scattering with the phase modulation was made. At input of receiver-detecting the signal come from the back scattering and noise. The common method likelihood was used for synthesis receiver-detecting signal controlling passive scattering with known characteristics of the phase modulation. Block-diagram was constructed from the typist block of receiver.

Управляемые пассивные рассеиватели достаточно давно применяются для регистрации распределения электромагнитных полей [1, 2], а также в качестве радиомаяков [3]. Однако вопросы, связанные с оптимальными методами приёма сигналов от управляемых пассивных рассеивателей и синтезом оптимальных приёмных устройств, до последнего времени в известной литературе не обсуждались. В работе [4] выполнен синтез приёмника-обнаружителя амплитудно-модулированного сигнала управляемого пассивного рассеивателя с учётом особенностей, присущих этой схеме регистрации, а именно наличию когерентного фонового сигнала с несущей частотой. В оптимальном алгоритме обработки сигнала, синтезированном в [4], фоновый сигнал компенсируется в приёмном устройстве. Способы компенсации зависят от априорной информации о фоновом сигнале. Кроме управляемых пассивных рассеивателей, осуществляющих амплитудную моду-

ляцию, на практике используются рассеиватели, сигнал от которых имеет фазовую модуляцию. В частности, известно применение в качестве управляемых пассивных рассеивателей газоразрядных приборов [5—7], сигнал от которых имеет фазовую модуляцию. В то же время известно, что фазовым модулятором сигнала является любой движущийся объект вследствие эффекта Доплера. В связи с этим в литературе описано достаточно большое количество синтезированных приёмных устройств, рассчитанных на приём сигнала с таким видом модуляции. Созданы приёмники с селекторами движущихся целей в радиолокационных системах с непрерывным и импульсным излучением [8]. Применяемые в этих системах приёмники содержат блоки компенсации фоновых переотражений, которые рассчитаны на минимальное количество априорных сведений о параметрах сигнала и фона. При использовании в качестве фазового модулятора управляемых пассивных рассеивателей комбинаций априорных сведений о параметрах сигнала и фона гораздо больше. Так, при использовании газоразрядного прибора для измерения распределения поля модуляционные параметры сигнала — индекс модуляции, частота и фаза управляющего сигнала могут быть известны [5—7]. Трудно определяемые величины — это абсолютное значение амплитуды модулирующего сигнала, фаза несущего колебания и абсолютное значение амплитуды и фазы фонового сигнала. В то же время отношение амплитуд сигнала газоразрядного прибора и фона, а также разность фаз, как показывает практика измерений [5—7], остаются неизменными и определяются отражающими свойствами газоразрядного прибора и окружающих его предметов.

Цель работы состоит в синтезе оптимального приёмника-обнаружителя сигнала управляемого пассивного рассеивателя с фазовой модуляцией при большом количестве априорных сведений о параметрах сигнала и фона.

Итак, пусть имеется сигнал управляемого пассивного рассеивателя, осуществляющего фазовую модуляцию сигнала с известными параметрами, и фоновый сигнал, который запишем в виде

$$s_1(t) = A\cos(\omega_0 t - \varphi) = x\cos\omega_0 t + y\sin\omega_0 t, \qquad (1)$$

где $x = A\cos\varphi$, $y = A\sin\varphi$, а A, φ — неизвестные амплитуда и фаза фонового сигнала.

Сигнал от газоразрядного прибора, используя результаты работ [5—7], запишем в виде $s_2(t) = nAF(t)\cos(\omega_0 t - \chi(t) - \psi - \varphi)$, где n, ψ — отношение амплитуд и разность фаз сигнала от газоразрядного прибора и фонового сигнала, $F(t), \chi(t)$ — функции амплитудной и фазовой модуляции переизлученного рассеивателем сигнала, соответственно. Эти сигналы одновременно поступают на вход приёмного устройства

$$\begin{gathered} s(t) = s_1(t) + s_2(t) = \\ x\{\cos\omega_0 t + nF(t)\cos[\omega_0 t - \chi(t) - \psi]\} + y\{\sin\omega_0 t + nF(t)\sin[\omega_0 t - \chi(t) - \psi]\} = \\ x\sum_{i=1}^{p} F_i(t)\cos[\omega_0 t - \psi_i(t)] + y\sum_{i=1}^{p} F_i(t)\sin[\omega_0 t - \psi_i(t)] \end{gathered} \qquad (2)$$

где $F_1(t) \equiv 1$, $F_2(t) \equiv nF(t)$, $\psi_1(t) \equiv 0$, $\psi_2(t) \equiv \chi(t) - \psi, p = 2$.

В приёмнике, помимо двух сигналов от газоразрядного прибора и фонового переизлучения, присутствуют шумы как внутренние, так и внешние, поступающие на вход приёмной антенны и представляющие собой, как правило, белый гауссовский шум n(t) с односторонней спектральной плотностью N_0. Отсюда, полный сигнал, поступающий на вход приёмника, можно записать в виде $\xi(t) = s(t) + n(t)$. Построим алгоритм обработки случайного сигнала с целью выяснения присутствия или отсутствия сигнала $s_2(t)$ в реализации $\xi(t)$. Для построения оптимального приёмника-обнаружителя сформулируем задачу различения гипотез H_1 и H_2. Согласно гипотезе H_1 в реализации $\xi(t)$ присутствует сигнал $s_1(t)$, согласно гипотезе H_2 в реализации $\xi(t)$ присутствует сигнал $s(t)$.

При наличии неизвестных параметров x, y выполним синтез приёмника-обнаружителя обобщенным методом максимального правдоподобия [9]. Суть метода состоит в том, что решение по гипотезам H_1 и H_2 выносится на основании не обычного отношения правдоподобия , а отношения максимальных значений функционалов отношения правдоподобия по неизвестным параметрам по каждой гипотезе

$$l(\xi) = \frac{\max_{\pi} W_2(\xi/\pi)}{\max_{\pi} W_1(\xi/\pi)}, \quad (3)$$

где $W_2(\xi/\pi)$ — функция правдоподобия, соответствующая гипотезе H_2; $W_1(\xi/\pi)$ — функция правдоподобия, соответствующая гипотезе H_1; $\pi=(x,y)$ — матрица-строка 1x 2 неизвестных параметров.

На фоне аддитивного белого гауссовского шума функция правдоподобия для гипотез H_1 и H_2 будет иметь вид [9]

$$\max_{\pi} W_p(\xi/\pi) = K \exp\left\{\frac{2}{N_0}\int_0^T \xi(t)\sum_{i=1}^{p} s_i(t)dt - \frac{1}{N_0}\int_0^T\left[\sum_{i=1}^{p} s_i(t)dt\right]^2 dt\right\}, \quad (4)$$

где для гипотезы H_1 p=1, а для гипотезы H_2 p=2, K — постоянная величина.

Воспользуемся для (4) матричной формой записи и получим

$$W_p(\xi/\pi) = K \exp\left\{\eta_p \pi^T - \frac{\pi \hat{Q}_p \pi^T}{2}\right\}, \quad (5)$$

$\eta_p = \left\{\sum_{i=1}^{p} X_i, \sum_{i=1}^{p} Y_i\right\}$ — матрица 1×2 с элементами

$$\begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \end{Bmatrix} = \frac{2}{N_0}\int_0^T \xi(t) F_i(t) \begin{Bmatrix} \cos \\ \sin \end{Bmatrix}[\omega_0 t - \psi_i(t)]dt, \quad (6)$$

$$\hat{Q}_p \equiv \hat{e}^2 Q_p = \hat{e}^2 \begin{Vmatrix} \sum_{i,j=1}^{p} Q_{cij} & 0 \\ 0 & \sum_{i,j=1}^{p} Q_{cij} \end{Vmatrix} \text{ — матрица } 2\times 2, \quad (7)$$

$$Q_{cij} = \frac{1}{T}\int_0^T F_i(t) F_j(t) \cos\left[\psi_i(t) - \psi_j(t)\right] dt, \quad (8)$$

$$\hat{e}^2 = \frac{T}{2N_0}.$$

Используя формулы скалярно-матричного дифференцирования [10], максимизируем функционал правдоподобия (4) по матрице π, в результате получим

$$\max_{\pi} W_p(\xi/\pi) = W_p(\xi) = K \exp\left\{\frac{1}{2}\eta_p \hat{Q}_p^{-1} \eta_p^T\right\}. \quad (9)$$

Подставим (9) в (3) и запишем (3) так:

$$l(\xi) = \exp\left\{\frac{1}{2}\eta_2 \hat{Q}_2^{-1} \eta_2^T - \frac{1}{2}\eta_1 \hat{Q}_1^{-1} \eta_1^T\right\}. \quad (10)$$

Прологарифмируем (10) и получим достаточную статистику, представляющую собой разность билинейных форм, образованных из квадратурных составляющих корреляционного интеграла, которую необходимо сравнить с порогом h.

$$q=\ln l(\xi) = \eta_2 \hat{Q}_2^{-1} \eta_2^T - \eta_1 \hat{Q}_1^{-1} \eta_1^T \underset{H_1}{\overset{H_2}{\gtrless}} 2h. \quad (11)$$

При превышении порогового значения напряжением q выносится решение в пользу гипотезы H_2 — в реализации ξ(t) присутствует сигнал управляемого пассивного рассеивателя, при непревышении порога напряжением q выносится решение в пользу гипотезы H_1 — в реализации ξ(t) сигнал управляемого пассивного рассеивателя отсутствует.

Конкретизируем алгоритм обработки реализации (11), определив явные выражения для η_p и $\hat{Q}_p$. Согласно [5—7], в качестве управляемого пассивного рассеивателя

используется газоразрядный прибор — неоновая лампа, через которую пропускается гармонический ток. Сигнал, переизлученный плазмой неоновой лампы, приобретает фазовую модуляцию так , что $\psi(t) = m\sin(\Omega t - \Phi) - \psi$, где Φ, ψ — фаза управляющего и переизлученного сигналов соответственно, m — индекс модуляции, а $F(t) \equiv 1$. Подставим конкретные значения $\psi(t)$ и F(t) в (8) и (7) и, вычислив интегралы, получим

$$Q_2 = \sum_{i,j=1}^{2} Q_{cij} \left\| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \right\|, \quad (12)$$

где $Q_{c11} = 1, Q_{c22} = n^2, Q_{c12} = Q_{c21} = 0.$

$$Q_1 = \left\| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \right\|. \quad (13)$$

Обратные матрицы к (12) и (13) имеют вид

$$Q_2^{-1} = \frac{1}{1+n^2} \left\| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \right\|, \quad Q_1^{-1} = Q_1 . \quad (14)$$

Подставим (14) в (11) и, раскрывая значения η_1 и η_2, получим

$$\frac{1}{\delta^2}\left(\frac{1}{1+n^2}\right)[(X_1 + X_2)^2 + (Y_1 + Y_2)^2] - \frac{1}{\delta^2}(X_1^2 + Y_1^2) \gtrless_{H_1}^{H_2} 2h . \quad (15)$$

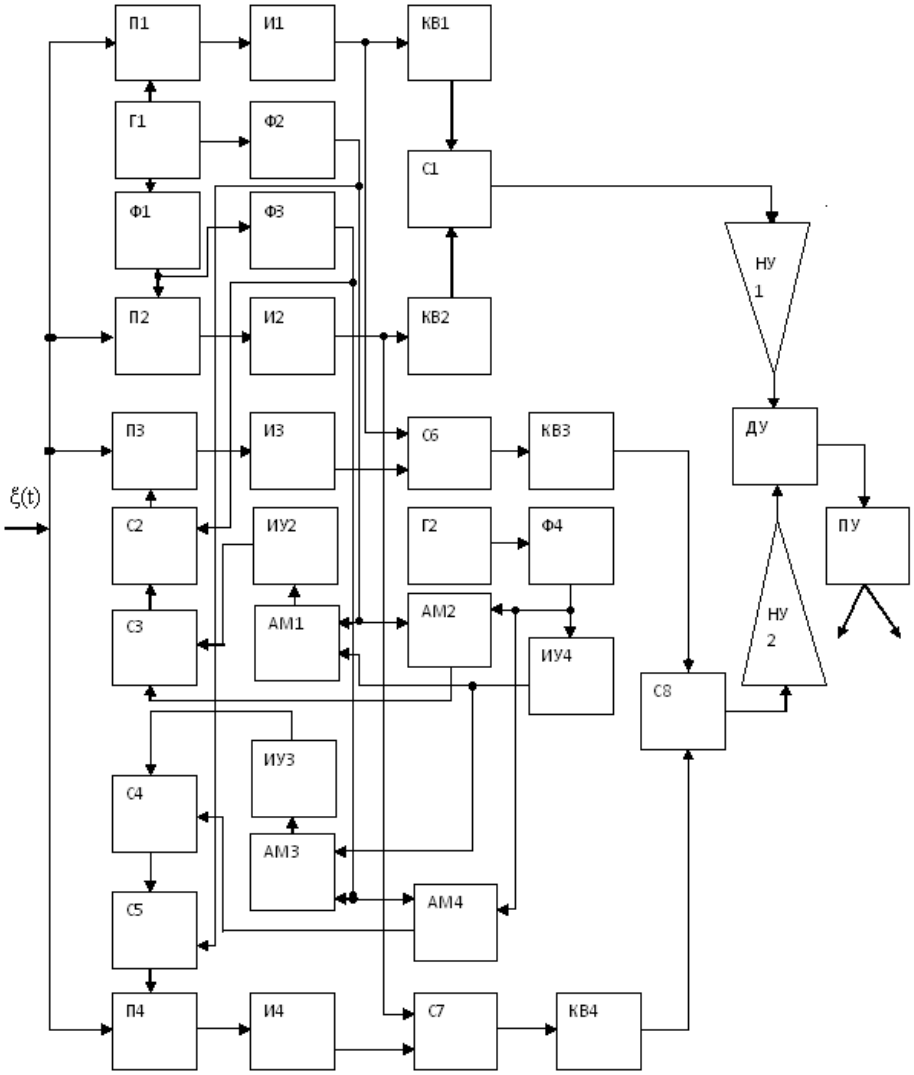
Алгоритм (15) состоит в формировании квадратур корреляционного интеграла для нулевой и первой гипотез, возведении их в квадрат и компенсации фонового сигнала. Если получившийся остаток больше порога, то принимается решение о наличии сигнала от газоразрядного прибора в реализации, если напряжение на выходе приёмника не превосходит порог, то принимается решение об отсутствии сигнала от газоразрядного прибора в реализации $\xi(t)$.

Блок-схема приёмника, построенного по алгоритму (15), приведена на рисунке. Она состоит из перемножителей П1—П4, интеграторов И1—И4, нормирующих усилителей НУ1, НУ2, устройств возведения сигнала в квадрат КВ1— КВ4, сумматоров С1—С8, генератора высокочастотного сигнала Г1, генератора низкочастотного сигнала Г2, фазовращателей Ф1— Ф4, амплитудных модуляторов АМ1—АМ4, инвертирующих усилителей ИУ1—ИУ3, дифференциального усилителя ДУ и порогового устройства ПУ. Схема функционирует следующим образом. Сигнал $\xi(t)$ поступает на перемножители П1—П4. Одновременно на вход перемножителей поступают опорные сигналы. На вход первого перемножителя — сигнал с высокочастотного генератора Г1, на вход второго перемножителя поступает сигнал от того же генератора, но через фазовращатель, осуществляющий изменение его фазы на 90°.

Далее сигналы с первого и второго перемножителей поступают на интеграторы И1, И2 соответственно, на устройства возведения сигнала в квадрат КВ1 и КВ2, а затем через инвертирующий усилитель ИУ1 на сумматор С1, с него на вход нормирующего усилителя НУ1 и затем на вход дифференциального усилителя ДУ.

На вход перемножителей П3, П4 поступает сигнал с фазовых модуляторов, построенных по схемам Армстронга. Высокочастотные сигналы от генератора Г1через фазовращатели Ф1— Ф3 поступают на входы амплитудных модуляторов АМ1—АМ4. На вторые входы модуляторов через фазовращатель Ф4 поступает низкочастотный сигнал, аналогичный сигналу управления плазмой газоразрядного прибора. На модуляторы АМ1 и АМ3 низкочастотный сигнал поступает через инвертирующий усилитель ИУ1. Сигнал с выходов модуляторов АМ1, АМ3 через инвертирующие усилители ИУ 2 и ИУ3 поступает на вход сумматоров С3,С4. На второй вход этих сумматоров поступают сигналы с амплитудных модуляторов АМ2, АМ4. Сигналы с выходов сумматоров

С3,С4 поступают на сумматоры С2 и С5 соответственно. На второй вход этих сумматоров поступают высокочастотные сигналы от генератора Г1через фазовращатель Ф2 и через фазовращатели Ф1 и Ф3, соответственно.



Блок-схема приёмника сигнала управляемого пассивного рассеивателя
с известными параметрами фазовой модуляции

Сформированные опорные сигналы с выхода сумматоров С2 и С5 поступают на перемножители П3 и П4. Далее сигналы с этих перемножителей поступают на интеграторы И3, И4, сумматоры С6, С7 и устройства возведения в квадрат КВ3, КВ4 и на сумматор С8.Сигнал с выхода сумматора поступает на нормирующий усилитель НУ2, а с его выхода на второй вход дифференциального усилителя ДУ. С выхода дифференциального усилителя сигнал поступает на пороговое устройство ПУ, на котором сигнал сравнивается с пороговым значением напряжения h.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cullen A.L., Parr J.C. A new perturbation method for measuring microwave field in free space. Proc.IEEE, 1955, v.102B, №2, p.836—844.

2. Strait B.I., Cheng D.K. Microwave magnetic field measurements by a modulated scattering technique. “Proc.IEEE”,1962,v.109B,№43,p.33—40.

3. Zaleski J.E. Passive beacon. USA – Patent, cl.343—18, №3159836,filed 1960, patented 1964.

4. Мальцев А.В. Оптимальный приёмник-обнаружитель сигнала управляемого пассивного рассеивателя с амплитудной модуляцией: дис. … канд. техн. наук. — Воронеж, 2011. — 178 с.

5. Струков И.Ф. Оперативный анализ пространственных характеристик электромагнитных полей с помощью управляемых рассеивателей: дис. … канд. физ.-мат. наук. — Воронеж, 1983. — 204 с.

6. Сенцов А.Н., Струков И.Ф. Фазовый модулятор на полупроводниковых приборах // Преступность в Центральном федеральном округе России: состояние, проблемы предупреждения и раскрытия преступлений: сборник материалов Международной научно-практической конференции. — Воронеж, 2008. — С.156—158.

7. Сенцов А.Н., Струков И.Ф. Экспериментальные исследования фазового модулятора на газоразрядных приборах // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС: материалы открытой конференции преподавателей и сотрудников Воронежского института ФСИН России. — Воронеж, 2008. — С.13—15.

8. Справочник по радиолокации / под ред. М. Сколника. — Нью-Йорк,1970: пер. с англ. (в четырех томах) / под общей ред. К.Н. Трофимова. — Т. 3.— М.: Сов. радио, 1978. — 528 с.

9. Тихонов В.И. Оптимальный приём сигналов. — М.: Радио и связь,1983.— 320 с.

10. Амосов А.А., Колпаков В.В. Скалярно-матричное дифференцирование и его применение к конструктивным задачам теории связи // Проблемы передачи информации. — 1972.— Т. 8. — Вып. 1. — С. 3—15.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ СТАТЬИ:

Лукин Александр Николаевич. Заместитель начальника. Доктор физико-математических наук, профессор.

Воронежский институт ФСИН России.

E-mail: alukin73@mail.ru

Россия, 394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, 1а. Тел. (473)2224209.

Степанов Геннадий Васильевич. Начальник отдела НИИ «Вега».

E-mail: box@vega.techno-r.ru

Россия, 394000, г. Воронеж, Московский проспект, 7 б. Тел. (473)2622703.

Lukin Alexander Nicolayevich. Deputy head of Voronezh Institute of Russian Federal Penitentiary Service. Doctor of physics-mathematical sciences, professor.

Work address: Russia, 394072, Voronezh, Irkutskaya, 1a. Tel. (473)2224209.

Stepanov Gennady Vasiliyevich. Chief of division of Science Investigation Institute “Vega”.

Work address: Russia, 394000, Voronezh, Moscow prospect, 7b. Tel. (473)2622703.

Ключевые слова к статье: управляемый пассивный рассеиватель; фазовая модуляция; фоновый сигнал; оптимальный приёмник-обнаружитель.

Key words: controlling passive scattering; the phase modulation; the back scattering signal; optimum receiver-detecting.

УДК 621. 313. 292

А.В. Аврамов,
кандидат технических наук, доцент,
Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж)

А.В. Леньшин,
доктор технических наук,
Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж)

ГИБРИДНАЯ БОРТОВАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ КАК СОСТАВНОЙ ЭЛЕМЕНТ АППАРАТНО-ИНТЕГРИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА БОРТОВОГО РЭО ПЕРСПЕКТИВНОГО ВЕРТОЛЕТА

HYBRID ONBOARD EXPERT SYSTEM OF DETECTION, DEFINITIONS OF COORDINATES AND IDENTIFICATION OF OBJECTS AS THE COMPONENT OF THE HARDWARE-INTEGRATED COMPLEX OF THE ONBOARD RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT OF THE PERSPECTIVE HELICOPTER

Рассмотрены подходы и особенности построения гибридной бортовой экспертной системы обнаружения, определения координат и принадлежности объектов перспективных воздушных судов на основе концепций построения аппаратно-интегрированных комплексов бортового радиоэлектронного оборудования и интегрированных систем опознавания.

Approaches and features of construction of hybrid onboard expert system of detection, definition of coordinates and an accessory of objects of perspective aircrafts on the basis of concepts of construction of the hardware-integrated complexes of the onboard radio-electronic equipment and the integrated systems of the identification are considered.

Опыт ведения боевых действий и локализации чрезвычайных ситуаций последних десятилетий показал высокую значимость применения вертолетов различных типов. От современного вертолета требуется обеспечение его применения круглосуточно в любых

метеоусловиях, как правило, на малых и предельно малых высотах. При этом должна обеспечиваться максимальная безопасность полетов, точность и своевременность выполнения поставленной задачи, а также полное взаимодействие с воздушными и наземными командными (диспетчерскими) пунктами, с другими воздушными судами и т.д.

Эффективное решение поставленных перед вертолетом задач во многом определяется качеством функционирования бортового радиоэлектронного оборудования (РЭО), достоверностью получаемой с помощью РЭО информации и своевременностью принятия экипажем соответствующих решений. Необходимость обеспечения наилучшей ситуационной осведомленности экипажа о внутри- и внешнебортовой обстановке, облегчения экипажу вертолета решения маршрутных и других задач, а также своевременного информирования экипажа о наступающей опасности и рекомендации гарантированных способов ее преодоления достигается созданием и внедрением на борту вертолета комплекса бортового радиоэлектронного оборудования (КБРЭО).

Международный и отечественный опыт создания КБРЭО показывает, что перспективной является структура аппаратурно-интегрированного комплекса [1]. Архитектура такого КБРЭО базируется на создании основных аппаратурных элементов, образующих интегрированную многодатчиковую информационную среду, в которой выделяются [2]: интегрированная приемопередающая система, обеспечивающая функционирование комплекса во всем диапазоне частот; интегрированная система обработки сигналов и информации на основе применения единой высокопроизводительной информационно-вычислительной системы (ИВС); интегрированные каналы передачи информации на основе применения высокоскоростных систем информационного обмена, позволяющих передавать информацию от датчиков различной физической природы и различных диапазонов длин волн в едином представлении.

В данной архитектуре разделение комплекса на аппаратурно завершенные компоненты осуществляется по виду операций с сигнальными полями [1]. Этим обеспечивается прием и обработка сигналов во всем частотном диапазоне действия радиоэлектронного оборудования в интересах решения всех функциональных задач, возлагаемых на комплекс. Объединение и обработки информации осуществляются по иерархическому принципу по специализированным алгоритмам оценки, принятия решений и управления. Такая структура построения КБРЭО вертолета позволяет в полной мере использовать принцип модульности аппаратурной реализации и динамической реконфигурации его ресурсов в условиях эксплуатации в зависимости от поставленной задачи.

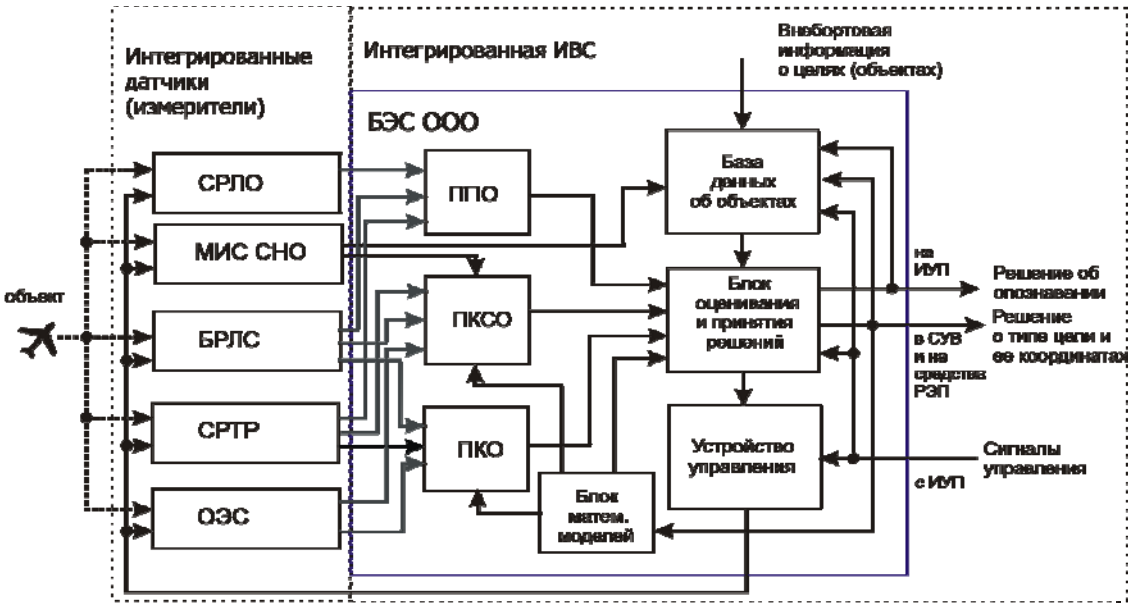
Однако в современных условиях полета от летчика (экипажа) вертолета требуется проведение анализа очень большого объема информации и принятия в короткий промежуток времени адекватных решений по выполнению поставленной задачи. При этом физиологические возможности летчика (-ов) как элемента (-ов) контура управления воздушного судна в экстремальной и интенсивно меняющейся ситуации ограничены [3]. Все это приводит к снижению эффективности выполнения поставленных задач.

В таких условиях максимально полное представление непротиворечивой информации о наземных и воздушных объектах и их характеристиках, максимально точное исполнение принятых решений в пилотировании воздушного судна, наведении средств поражения и управлении измерителями может быть обеспечено бортовыми экспертными системами измерительной и исполнительной аппаратуры (БЭС ИИА). Подобные бортовые экспертные системы представляют собой специализированные программные модули, обеспечивающие решение определенного круга задач автоматического поиска способов достижения поставленных целей управления [2, 3].

Одними из важных задач, требующих решения в экстремальных условиях полета, навигации и применения воздушного судна, являются задачи обнаружения воздушных и наземных объектов, определения их пространственных координат, типа и государственной принадлежности, оценки степени их опасности и угрозы для воздушного судна и т.д. Результатом их решения могут являться рекомендации по выполнению мероприятий, связанных с преодолением угрозы воздушному судну: определение и подготовка средств поражения объекта в соответствии с его типом и опасностью, обмен полученной информацией о наличии и характеристиках наблюдаемых объектов между взаимодействующими объектами (воздушными судами, пунктами наведения, позициями артиллерии и т.д.).

Повышение эффективности принятия решений об обнаружении, определении координат и принадлежности объектов, а также в экстремальных условиях формирование управлений для исполнительных систем видится возможным с применением разновидности БЭС ИИА, а именно бортовой экспертной системы обнаружения, определения координат и принадлежности объектов (БЭС ООО) [2, 3]. Функционирование данной системы основано на использовании всей доступной на борту вертолета (воздушного судна) информации об объектах: текущей количественной и качественной информации от бортовых радиолокационных, оптико-электронных, радиотехнических измерителей и внебортовых источников; априорной информации о типах объектов и их характеристиках, имеющейся в бортовой базе данных от экспертов на основе предполетной подготовки и оперативно передаваемой информации по каналам систем обмена данными.

Анализ требований к облику БЭС ООО [2, 3], а также структуры и принципов функционирования прорабатываемой с середины 90-х годов интегрированной системы опознавания (ИСО) [4, 5] позволяет сделать выводы о возможности создания гибридной бортовой экспертной системы обнаружения, определения координат и принадлежности объектов (ГБЭС ООО). Обобщенную структуру данной ГБЭС ООО можно представить в виде рисунка.



Структура гибридной бортовой экспертной системы обнаружения, определения координат и принадлежности объектов

В качестве бортовых измерительных средств для решения задач обнаружения, определения координат и принадлежности объектов могут использоваться: система радиолокационного опознавания (СРЛО); терминал многофункциональной интегрированной системы связи, навигации и обмена данными (МИС СНО) [6]; бортовая распознающая радиолокационная станция (БРЛС); система радиотехнической разведки (СРТР) или пассивная РЛС (ПРЛС); бортовая распознающая оптико-электронная система (ОЭС), состоящая из оптико-локационной, телевизионной и тепловизионной станций, нашлемной системы целеуказания и индикации, системы ночного видения.

Данные средства обеспечивают формирование на борту воздушного судна избыточной количественной и качественной информации о наличии объектов во всем диапазоне дальностей действия используемых измерителей, о пространственных координатах наблюдаемых объектов и их типах.

Для обеспечения решения поставленных задач на основе аппаратно-функциональной интеграции данные измерители сгруппированы в составе ГБЭС ООО в подсистемы, представляющие программные субмодули обработки информации и принятия в масштабе ГБЭС ООО частных решений.

Подсистема прямого опознавания (ППО) основана на аппаратно-функциональной взаимосвязи системы радиолокационного опознавания и бортовой РЛС для решения задач радиолокационного обнаружения и опознавания обнаруженных целей. Использование в составе БРЛС фазированной антенной решетки и введение в ее состав специальных модулей позволяет обеспечить совместную работу запросчика СРЛО, а также системы радиотехнической разведки в пассивных режимах работы БРЛС [6]. В этих условиях реализация алгоритмов отождествления информации СРЛО, БРЛС и СРТР позволит существенно повысить достоверность прямого опознавания обнаруженных объектов в этой подсистеме.

Подсистема координатно-связного опознавания (ПКСО) основана на аппаратно-функциональной взаимосвязи каналов МИС СНО, БРЛС, ОЭС и, возможно, ПРЛС (или РЛС с ФАР в пассивном режиме) для решения задач координатно-связного опознавания воздушных целей на всех дальностях действия БРЛС, ОЭС и ПРЛС [4]. Взаимосвязь задействованных в этой подсистеме информационных каналов обеспечивается алгоритмами оптимального оценивания, идентификации и отождествления результатов измерений информационных каналов в соответствии с условиями выполнения задачи.

Подсистема косвенного опознавания (ПКО) основана на аппаратно-функциональной взаимосвязи БРЛС, ОЭС и СРТР (ПРЛС). Данные измерители обеспечивают решение задач определения типов наблюдаемых объектов на основе реализации алгоритмов распознавания по характерным для каждого измерителя информационным признакам. Использование разнотипных распознающих систем позволяет увеличить объем признакового пространства, на языке которого возможно более детальное описание типов и классов распознаваемых целей. Тем самым обеспечивается более высокая достоверность классификации целей по типам. В свою очередь, классификация целей по типам при наличии априорной информации о целях, имеющейся в базе данных, позволяет решить задачу определения принадлежности (опознавания) объекта косвенным образом.

База данных содержит данные и правила, использующие эти данные для принятия решений. Примерное содержание получаемых данных для решения поставленных задач может быть следующим [3]:

- из внешней среды принимается априорная информация о: задаче вылета, способе ее выполнения и результатах; рубежах выполнения задачи; ранге данного борта; типе и количестве объектов на участке выполнения задачи и т.д.;

• по каналам МИС СНО принимается текущая информация: о своем воздушном судне и воздушных судах группы, взаимодействующих с данным бортом по сети межбортового обмена; об объектах (наличие, координаты, типы, количество, признаки групповых объектов, наличие и типы помех, вероятности определения типов объектов, помех, количество объектов в группах, признаки измерителя объектов, признаки отождествления информации от разных источников, ошибки оценивания координат, признаки достоверности измерения отдельных координат).

Таким образом, полученный объем информации позволяет сформировать априорные сведения, необходимые для всестороннего анализа и интеллектуального принятия решений в ГБЭС.

Блок математических моделей включает ряд алгоритмов и моделей. Модели осуществляют прогноз фазовых координат, с помощью которых может вестись описание поведения объектов в каждом измерителе. Как правило, это дифференциальные уравнения изменения фазовых координат. С помощью таких моделей по соответствующим алгоритмам могут рассчитываться оценки моментов времени наступления характерных для принятия решений событий. Специализированные алгоритмы и модели позволяют получить недостающую информацию о текущем состоянии и условиях наблюдения объектов, провести анализ сложившейся обстановки с необходимой глубиной и выработать рекомендации на разрешение возникших проблем в принятии решений.

Окончательное решение о типе обнаруженного объекта, его координатах и принадлежности принимается в блоке оценивания и принятия решения. Здесь может формироваться логический вывод правила о нахождении и распознавании объектов, выбор траектории и управления вертолетом, принятие решения на применение оружия, управление бортовыми информационными системами, выбор тактики и приемов боя и выполнения полета, подготовка систем оружия и средств информационного противодействия и т.д. Его функционирование должно быть основано на детальном и всестороннем анализе всей имеющейся информации на борту с учетом всей совокупности математических моделей, априорной и текущей информации. При этом алгоритмы принятия решений должны адаптироваться к окружающей обстановке и с максимальной достоверностью представляться на индикаторы, обеспечивать принятие летчиком адекватных действий в сложившейся воздушной обстановке. В таком случае функционирование блока оценивания и принятия решения основывается на интеллектуальной обработке информации для ее достоверного представления летчику и управления системами воздушного судна.

При таком построении ГБЭС ООО предполагается повышение достоверности принятия решений о наблюдаемых объектах и эффективности применения вертолетов (воздушных судов) в современных условиях решения поставленных задач. Проведенные ранее исследования по созданию интегрированной системы опознавания перспективных воздушных судов могут послужить теоретической основой для создания гибридной бортовой экспертной системы обнаружения, опознавания и определения государственной принадлежности воздушных объектов. Дальнейшая углубленная проработка разработанных алгоритмов принятия решений в ГБЭС ООО с учетом перспектив развития бортовых информационных систем позволит реализовать современные требования к гибридной бортовой экспертной системе обнаружения, определения координат и принадлежности объектов. Поэтому одной из основных задач при создании ГБЭС ООО является разработка алгоритмов оптимальной комплексной обработки информации, интеллектуального принятия решений и управления информационными системами с учетом особенностей их построения и реальных условий выполнения полетных заданий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андросов В. А., Кутахов В. П. Архитектура аппаратно интегрированного радиоэлектронного комплекса // Радиотехника. — 1996. — № 9. — С. 49—54.

2. Канащенков А.И., Самарин О.Ф., Татарский Б.Г. Искусственный интеллект и бортовой радиоэлектронный комплекс летательного аппарата // Бортовые интеллектуальные системы. Ч.1. Авиационные системы: сборник статей. — М.: Радиотехника, 2006. — С. 17—25.

3. Интеллектное управление динамическими системами / С.Н. Васильев [и др.]. — М.: Физ.-мат. лит., 2000. — 352 с.

4. Жиронкин С.Б., Аврамов А.В., Быстраков С.Г. Построение интегрированных систем опознавания на основе координатно-связного метода // Зарубежная радиоэлектроника. — 1997. — № 5. — С. 71—74.

5. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т.1. РЛС — информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов / под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова. — М.: Радиотехника, 2006. — 656 с.

6. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы. Том XIII / под общей редакцией С. Иванова. — М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2006. — 696 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ СТАТЬИ:

Аврамов Андрей Викторович. Начальник кафедры авиационных радиоэлектронных комплексов. Кандидат технических наук, доцент.

Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж).

E-mail andry_a@inbox.ru

Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 153. Тел. 8-980-347-12-96.

Леньшин Андрей Валентинович. Профессор кафедры. Доктор технических наук.

Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж).

E-mail: andrey-lenshin@yandex.ru

Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 153. Тел. 8-920-229-09-95.

Avramov Andrey Victorovich. The chief of chair of Aviation radio-electronic complexes. Candidate of technical sciences, assistant professor.

Military Aviation Engineers University (Voronezh).

Work address: Russia, 394052, Voronezh, Krasnoznamennaya Str., 153.Tel. 8-980-347-12-96.

Lenshin AndreyValentinovich. Professor of chair. Doctor of sciences (technical).

Military Aviation Engineers University (Voronezh).

Work address: Russia, 394052, Voronezh, Krasnoznamennaya Str., 153. Tel. 8(920) 229-09-95.

Ключевые слова к статье: гибридная бортовая экспертная система; интегрированная система опознавания; комплекс бортового радиоэлектронного оборудования.

Key words: hybrid onboard expert system; the integrated system of the identification; a complex onboard radio-electronic equipment.

УДК 629.7.05

А.В. Леньшин,
доктор технических наук,
Военный авиационный
инженерный университет (г. Воронеж)

Е.Т. Дюндиков,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, Военный
авиационный инженерный университет
(г. Воронеж)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF PROCESS OF FUNCTIONING OF SYSTEM OF COMPLEX MONITORING

Рассматриваются методические основы и последовательность выполнения процедур для определения значения эффективности средств и систем комплексного мониторинга.

Methodical bases and sequence of performance of procedures for definition of value of efficiency of means and systems of complex monitoring are considered.

Основой концептуального развития систем мониторинга, контроля и диагностики различного назначения является внедрение технологий предупреждения о возможных угрозах и их последствиях [1]. Использование технологий такого рода существенно повышает эффективность управления силами, средствами, состоянием контролируемых динамических систем и процессов. В соответствии с положениями нормативных документов на системы мониторинга возложены следующие функции:

1) периодическое или постоянное наблюдение за природными и антропогенными факторами воздействия $F_i(t) \supset \left\{ f_i^{A}(t); f_i^{\Pi}(t) \right\}$ и параметрами состояния $S_i(t) \supset \left\{ \text{€}_j \right\} \Big| \text{€}_j = f(y_{jk})_{j^* \times k_j^*}$ объектов *i*-го типа;

2) оценка соответствия установленным нормам фактического состояния $S_i(t)\big|_{t=t_n}$ объектов в требуемый момент времени t_n;

3) прогноз изменения состояния $S_i(t)$ объектов мониторинга в заданном интервале времени, при этом основной целью функционирования любой системы мониторинга является своевременное и достоверное информирование органов управления о состоянии объектов и происходящих на них изменениях и возможных последствиях.

В результате комплексирования средств и систем мониторинга возникает ряд проблем, из-за которых эффективность выполнения интегрированной системой функций имеет значение ниже ожидаемого или заданного. К доминирующим проблемам при этом можно отнести:

- несогласованность моделей представления знаний о состоянии и динамичности объектов (результатов мониторинга), сформированных в процессе функционирования подсистем системы комплексного мониторинга (СКМ) различной организационной принадлежности;
- неприемлемую длительность интервала доставки данных о результатах некоторых видов мониторинга и команд управления (из-за отсутствия или низких значений ТТХ аппаратуры приемопередачи);
- большую размерность передаваемых массивов разнородных данных о значениях контролируемых параметров (Тбайт÷Пбайт) [2] в процессе информационного обмена между средствами и системами;
- отсутствие унифицированных для всех систем мониторинга форматов передачи разнородных данных;
- отсутствие в методическом обеспечении функционирования средств и систем процедур, осуществляющих представление данных в компактной форме, обеспечивающей единую интерпретацию циркулирующих в конкретной системе и между системами сообщений о состоянии и динамичности характеристик объектов;
- отсутствие методического обеспечения выявления с заданным уровнем достоверности возможных синергетических эффектов и, как следствие, случаев перехода объектов в терминальные состояния;
- несогласованность методик, вида и состава показателей для определения значения эффективности средств, подсистем и СКМ в целом.

Перечисленные проблемы являются основными причинами значительных не всегда оправданных затрат временных и финансовых ресурсов на обработку информации, интеграцию данных и представление результатов мониторинга. В связи с этим значение эффективности функционирования СКМ по основному назначению может формироваться по фактическим показателям, совокупность которых можно представить в виде $\left\langle D_{\Phi}, \tau_{\Phi}, \Delta^{\text{КМ}}, \gamma_{\Phi}, t \right\rangle$, где D_{Φ} — достоверность результатов КМ; τ_{Φ} — оперативность проведения КМ (длительность цикла «измерение — представление»); своевременность $\Delta^{\text{КМ}}$ и γ_{Φ} — число проверенных объектов группировкой $\{CK_{\eta}\}$ средств.

Задача обеспечения требуемых характеристик по оперативности функционирования СКМ может быть решена на основе использования метода динамической интеграции разнородных данных [3]. Метод позволяет за счет формирования и передачи матриц состояния, содержащих показатели соответствия установленным нормам по каждому параметру и виду мониторинга, существенно сократить объемы информации, необходимой для комплексной оценки состояния объектов и формализовать результаты КМ в виде образов состояния объектов [4].

Для практического определения $D_Ф$, $\tau_Ф$, $\Delta^{КМ}$, $\gamma_Ф$ случайный процесс функционирования СКМ как динамической системы представляется совокупностью состояний S_i, множеством переходов p_{ij} ($i = 1,...7$; $j = 1,...13$) между состояниями, которые совершаются либо под воздействием совокупности случайных факторов, либо под воздействием управления. Эволюция процесса функционирования СКМ может быть исследована в случае:

1) задания матрицы $Q = \{Q_{ij}\}$ независимых функций распределения времени пребывания СКМ в *i*-м состоянии перед переходом в *j*-е состояние, если бы данный выход из состояния *i* был единственным;

2) задания матрицы $P = \{P_{ij}\}$ возможных переходов и начального состояния $S_i(t)$ $i = 1$ в момент $t = 0$.

Учитывая вероятностно-временной характер и логические особенности процесса функционирования СКМ для определения значений $D_Ф$, $\tau_Ф$, $\Delta^{КМ}$, $\gamma_Ф$, можно сформировать полумарковскую модель, граф состояний которой представлен на рис. 1. Физическая сущность состояний процесса отражена в табл. 1.

Использование метода интеграции разнородных данных позволяет упростить модель за счет исключения состояний, отражающих доставку данных, так как время доставки, составляющее от единиц до десятков секунд, не оказывает существенного влияния на длительность и временную структуру всего процесса.

Особенностями и одновременно преимуществами модели процесса функционирования СКМ являются: возможность оперативного (автоматизированного) вычисления значений переходных вероятностей P_{24}, P_{23}, P_{35}, P_{31}, P_{34}, которые формируются на основе использования характеристик законов распределения измеренных значений контролируемых параметров, ошибок систем измерения средств контроля, интервалов допустимых значений параметров и определяют значения достоверности результатов мониторинга; наличие состояния 6, в котором в случаях подтверждения наличия ошибочных решений, принятых системой мониторинга, осуществляется комплекс мероприятий по совершенствованию методического обеспечения оценивания состояния и/или динамичности характеристик ОК, то есть с целью минимизации значений ошибок уточняются состав и содержание правил в базе знаний СКМ.

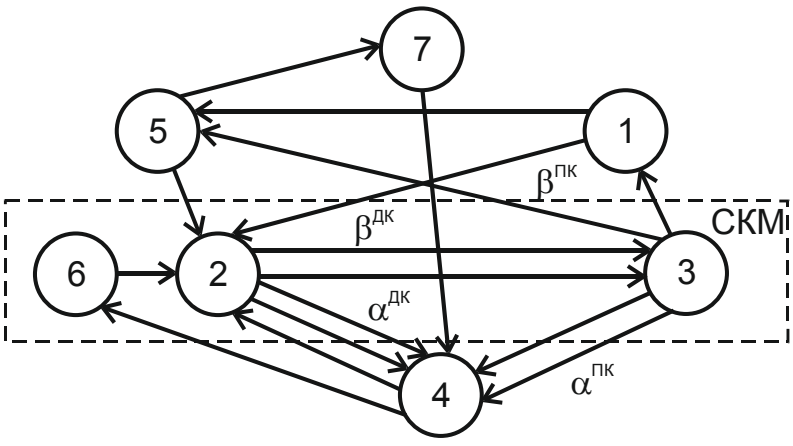


Рис. 1. Граф модели процесса функционирования СКМ

Таблица 1

Физическая сущность состояний процесса функционирования СКМ

№ состояния	Физическая сущность состояний процесса
1	Функционирование объекта в соответствии с установленными нормами
2	Осуществляется контроль соответствия значений параметров ОКМ установленным нормам (допускам)
3	Осуществляется прогнозирующий контроль (контроль динамики изменений параметров состояния) соответствия значений параметров ОКМ установленным нормам (допускам), выявление возможности и определение моментов времени перехода в терминальные состояния
4	Выполнение организационно-технических мероприятий по восстановлению соответствия состояния ОКМ установленным нормам
5	Аномальное функционирование ОКМ
6	Анализ причин возникновения ошибок СКМ и обучение СКМ с целью минимизации значений ошибок контроля
7	Терминальное состояние (состояние, в котором объект угрожает окружающей среде)

Содержание и логические условия осуществления переходов p_{ij} как результата действия случайных факторов или управления из какого-либо *i*-го состояния в другое *j*-е состояние рассматриваемого процесса представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физический смысл и условия возможных переходов

Обозначение и направление перехода	Физический смысл и условия перехода
P_{12}	Объект в соответствии с планом или заявкой подвергается контролю
P_{15}	Объект из-за случайного воздействия возмущающих факторов переходит в состояние несоответствия нормам
P_{23}	Завершен допусковый контроль параметров состояния объекта. Объект правильно признан соответствующим установленным нормам или совершена ошибка 2-го рода $\beta^{ДК}$. Объект допускается к прогнозирующему контролю
P_{24}	Завершен допусковый контроль параметров состояния объекта. Объект правильно признан несоответствующим установленным нормам или совершена ошибка 1-го рода $\alpha^{ДК}$. На объекте требуется проведение организационно-технических мероприятий по обеспечению выполнения норм
P_{31}	Завершен прогнозирующий контроль параметров состояния объекта. Объект правильно признан соответствующим установленным нормам и допускается к применению по основному назначению
P_{34}	Завершен прогнозирующий контроль параметров состояния объекта. Объект правильно признан не соответствующим установленным нормам или совершена ошибка 1-го рода $\alpha^{ДК}$. На объекте требуется проведение организационно-технических мероприятий по обеспечению выполнения норм
P_{35}	Завершен прогнозирующий контроль параметров состояния объекта. Объект неправильно признан соответствующим установленным нормам, совершена ошибка 2-го рода $\beta^{ДК}$. Объект ошибочно допущен к применению по основному назначению
P_{42}	После восстановления объект должен быть проверен на соответствие нормам

P_{46}	В случаях подтверждения в процессе восстановления по результатам анализа наличия ошибочных решений, принятых системой мониторинга, осуществляется комплекс мероприятий по совершенствованию методического обеспечения СКМ с целью минимизации значений ошибок
P_{52}	Объект, не соответствующий нормам, по плану или по заявке должен подвергаться контролю
P_{57}	Объект, не соответствующий нормам, переходит в терминальное состояние из-за несвоевременного выявления возможности такого перехода
P_{62}	После проведения обучения СКМ требуется проверка эффективности выполненных мероприятий по совершенствованию методического обеспечения функционирования СКМ
P_{74}	Объект должен быть переведен в безопасное состояние и определена возможность его дальнейшей эксплуатации

Эффективность функционирования СКМ может оцениваться по интегральному показателю — вероятности выполнения задач мониторинга состояния заданного количества объектов за заданное время с требуемым качеством. Выбор такого показателя обусловлен тем, что эффективность СКМ в целом, исходя из ее назначения, состава группировки СК, условий и порядка их применения, необходимо рассматривать как минимум в трех аспектах: количественном, качественном и временном.

Количественный аспект предполагает чувствительность интегрального показателя к изменению количества $\gamma_\Ф$ фактически проконтролированных объектов (или их элементов) из числа заданных $\gamma_\text{З}$. В качестве такого показателя можно использовать отношение

$$\delta_\gamma^{\text{КМ}} = \left(\frac{\gamma_\Ф}{\gamma_\text{З}} \right) \Bigg|_{\gamma_\Ф \le \gamma_\text{З}}.$$

Качественный аспект предусматривает чувствительность интегрального показателя эффективности к величине соотношения фактического и заданного уровней доверия к результатам мониторинга, сформированным группировкой СК:

$$\delta_D^{\text{КМ}} = \left(\frac{D_\Ф}{D_\text{З}} \right) \Bigg|_{D_\Ф \le 1}.$$

Временной аспект предполагает чувствительность интегрального показателя эффективности к изменениям фактических затрат $\tau_\Ф$ времени на формирование и доставку результатов к заданному органами управления моменту времени $T_\text{З}$:

$$\delta_t^{\text{КМ}} = \left(\frac{\tau_\Ф}{T_\text{З}} \right).$$

По результатам моделирования процесса функционирования СКМ определяются значения $\tau_\Ф$, $\gamma_\Ф$, $D_\Ф$, вычисляются $\delta_\gamma^{\text{КМ}}$, $\delta_D^{\text{КМ}}$, $\delta_t^{\text{КМ}}$. Строится функция, отражающая текущую результативность СКМ (изменение вероятности выполнения задач мониторинга во времени):

$$E(t) = At^B \exp(Ct),\ E = \max E(t).$$

Коэффициенты модели $A,B,C = f(\gamma_{\Phi},\gamma_{Z},\tau_{\Phi},T_{Z},D_{\Phi},t)$ определяют форму зависимости $E(t)$. Вид функции $E(t)$ показан на рис. 2 (сплошная линия). Точками показана форма зависимости $E_{Э}(t)$ для идеального случая.

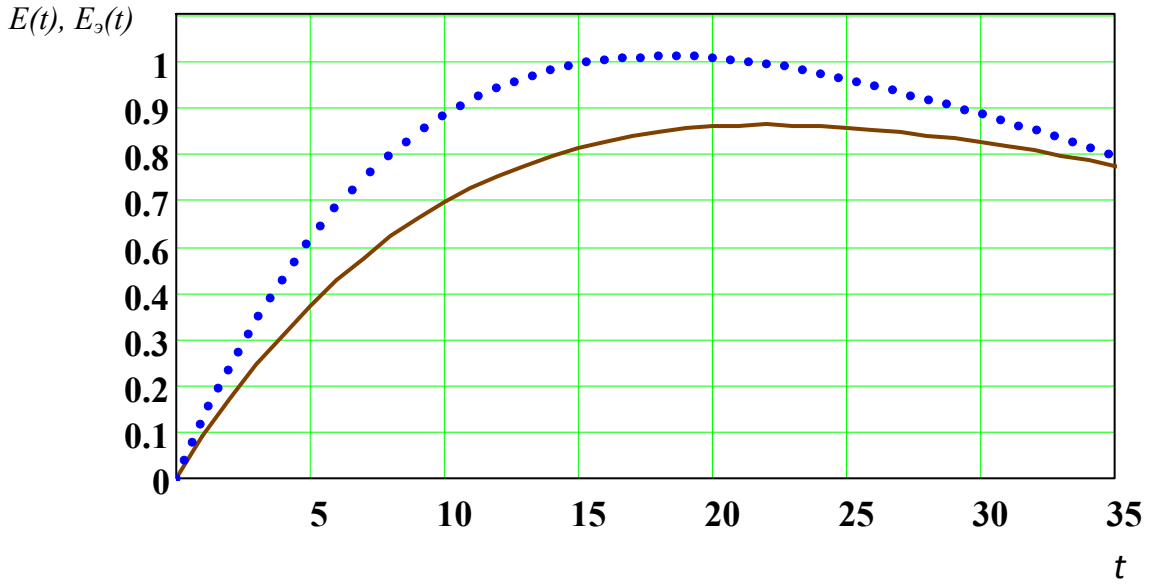


Рис. 2. Вид функции $E(t)$

По максимальному значению $E = \max E(t)$, рассчитанному для конкретной ситуации и варианта применения средств СКМ, делается вывод об эффективности СКМ. Предложенная методика обеспечивает оценку эффективности функционирования СКМ по интегральному показателю (вероятности выполнения задач мониторинга состояния заданного количества объектов за заданное время с требуемым качеством) и повышение оперативности принятия управленческих решений по изменению ТТХ или вариантов применения группировки СК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Острейковский В.А., Швыряев Ю.В. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. — М.: Физматлит, 2008. — 352 с.

2. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие. — М.: Радиотехника, 2009. — 392 с.

3. Патент 2369866 РФ. Способ комплексного мониторинга окружающей среды региона / Дюндиков Е.Т. [и др.]. — № 2008100341; заявл. 09.01.2008; опубл. 10.10.2009.

4. Леньшин А.В., Дюндиков Е.Т., Качкин А.А. Модель процесса преобразования информации в системе комплексного мониторинга // Кибернетика и высокие технологии 21 века: сборник материалов научно-технической конференции (11—12 мая 2011 г.). Том 1. — Воронеж: ОАО «Концерн «Созвездие»—ВГУ. — С. 374—387.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ СТАТЬИ:

Леньшин Андрей Валентинович. Профессор кафедры. Доктор технических наук.
Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж).
E-mail: andrey-lenshin@yandex.ru
Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 153. Тел. 8-920-229-09-95.

Дюндиков Евгений Тимофеевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник.
Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж).
Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 153. Тел. 8-960-124-6330.

Lenshin Andrey Valentinovich. Professor of chair. Doctor of sciences (technical).
Military Aviation Engineers University (Voronezh).
Work address: Russia, 394052, Voronezh, Krasnoznamennaya Str., 153. Tel. 8-920-229-09-95.

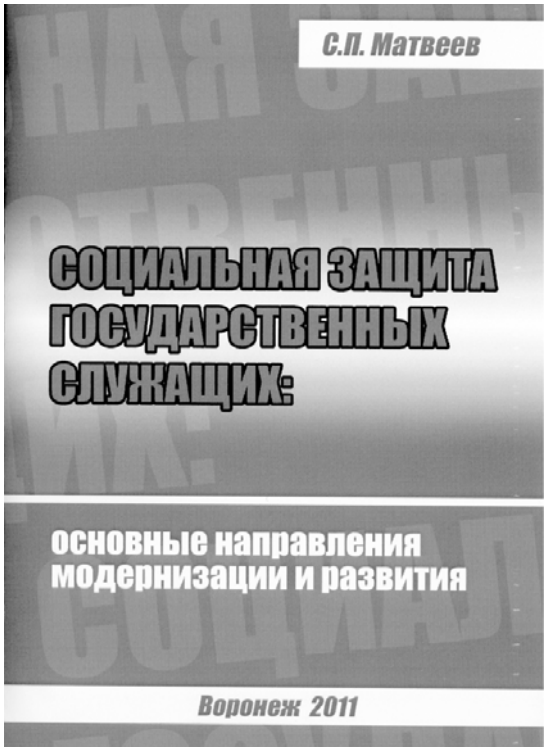
Djundikov Evgeniy Timofeevich. Senior research assistant. Cand.Tech. Sci.
Military Aviation Engineers University (Voronezh).
Work address: Russia, 394052, Voronezh, Krasnoznamennaya Str., 153. Tel. 8-960-124-6330.

Ключевые слова к статье: оценка эффективности; мониторинг.

Key words: value of efficiency; monitoring.

УДК 621

ИЗДАНИЯ ВОРОНЕЖСКОГО ИНСТИТУТА МВД РОССИИ



Матвеев С.П.

Социальная защита государственных служащих: основные направления модернизации и развития: монография / С.П. Матвеев; под науч. ред. д-ра юрид. наук Ю.Н. Старилова. — Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2011. — 172 с.

В монографии рассматривается структура государственного обеспечения социальной защиты государственных служащих, современные механизмы стимулирования эффективной государственной службы, роль и место административных регламентов в осуществлении социальной защиты государственных служащих.
Предназначена для научных работников, преподавателей, аспирантов, адъюнктов юридических вузов, а также для государственных служащих

В.В. Волхонский,
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ПРОНИКНОВЕНИЯ НА ОХРАНЯЕМЫЙ ОБЪЕКТ

ABOUT TASK OF PROBABILITY DETECTION INCREASING DURING UNAUTHORIZED PENETRATION TO GUARDED OBJECT

Предлагается оценивать вероятность обнаружения несанкционированного проникновения на основе плотностей распределения вероятностей продолжительности обнаружения и расстояния обнаружения. Рассматривается влияние на вероятность обнаружения активных и пассивных воздействий, применяемых квалифицированным нарушителем. Анализируются различные функции физических препятствий и их влияние на вероятность обнаружения.

Densities of probability distribution of detection duration and detection distance are proposed as base of probability detection estimation for unauthorized penetration. Influencing onto probability detection of active and passive effects, used by high qualification intruder is considered. Different functions of physical obstacle are analyzed.

В условиях роста конкурентной борьбы, количества и разнообразия преступлений, связанных с несанкционированным проникновением (НП) на объект, в частности для доступа к носителям информации и другим информационным ресурсам, важной представляется задача повышения вероятности обнаружения НП в системе безопасности. Для обеспечения максимальной эффективности системы безопасности необходим учет всех составляющих, влияющих на вероятность обнаружения и их взаимосвязи. Это относится, в частности, к выбору типа средств обнаружения НП и мест их расположения на объекте; взаимному расположению на объекте зон обнаружения НП и элементов технической укрепленности, а также учету возможных воздействий нарушителя на средство обнаружения.

При этом в опубликованных материалах недостаточно внимания уделено рассмотрению ряда вопросов, оказывающих влияние на эффективность системы безопасности. Это относится, в частности, к отсутствию в достаточно полной мере учета статистических характеристик (обычно принимается во внимание в лучшем случае только вероятность обнаружения без учета влияния на нее различных факторов); обоснованно-

сти выбора мест взаимной установки средств обнаружения и принципа их действия; анализа вероятности обнаружения с учетом возможности применения нарушителями различных методов и средств подавления средств обнаружения для снижения их обнаружительной способности и оценки вероятности обнаружения.

Также на вероятность обнаружения НП, наряду с хорошо известной [1] основной функцией задержки, могут влиять элементы технической укрепленности или физические препятствия, что требует дополнительного анализа, поскольку задержка НП без надежного его обнаружения неэффективна. Поэтому надо говорить о комплексе средств обнаружения и препятствий с учетом возможности задержки по повышению вероятности обнаружения.

Рассмотрению этих вопросов и посвящена данная работа.

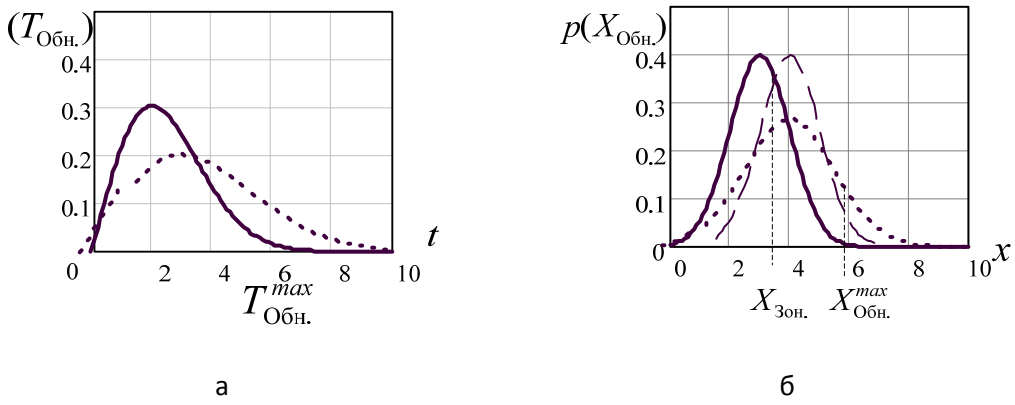
Вероятность обнаружения НП

Обычно при оценке эффективности принято использовать такую числовую характеристику, как значение $P_{\text{Обн.}}$ вероятности обнаружения НП. Эта величина является случайной, зависит от ряда факторов, и поэтому корректнее использовать плотность распределения вероятности. Но при этом возникает ряд сложностей, связанных с оценкой закона распределения и его числовых характеристик; оценкой значения вероятности обнаружения; учетом возможных способов воздействия нарушителя на средства обнаружения и их влияния на вероятность обнаружения.

Очевидно, что $P_{\text{Обн.}}$ будет зависеть от продолжительности нахождения нарушителя в зоне обнаружения, скорости и траектории его движения, условий окружающей среды и других параметров. Будем предполагать, что необходимо обнаружить именно движущийся объект, поскольку большинство средств обнаружения не реагируют на неподвижный. Поэтому можно говорить либо о продолжительности обнаружения $T_{\text{Обн.}}\Big|_{v\approx const}$ от начала воздействия $t_{\text{Возд.}}$ на контролируемый физический параметр зоны обнаружения до момента $t_{\text{Обн.}}$ обнаружения НП, либо о пройденном нарушителем расстоянии $X_{\text{Обн.}}\Big|_{v\approx const}$ от начала зоны обнаружения $x_{\text{Возд.}}$ (когда начинается воздействие на контролируемый физический параметр) до точки обнаружения $x_{\text{Обн.}}$ при квазистационарной, т.е. с близкой к постоянной скорости его движения.

Учесть это в более полной мере можно при использовании плотностей распределения вероятностей $p(T_{\text{Обн.}})$ и $p(X_{\text{Обн.}})$ либо продолжительности обнаружения $T_{\text{Обн.}}$, либо расстояния $X_{\text{Обн.}}$. Если первая характеристика имеет смысл при «хаотичном» движении нарушителя, со сменой направления, то вторая — при квазилинейном. Заметим, что при принятом допущении о квазилинейности движения нарушителя легко устанавливается взаимосвязь между $p(T_{\text{Обн.}})$ и $p(X_{\text{Обн.}})$). Т.е. $p(X_{\text{Обн.}})$ является частным случаем $p(T_{\text{Обн.}})$. В этом случае вероятность обнаружения НП в некоторой зоне можно характеризовать интегралами от плотности распределения вероятности продолжительности обнаружения $P_{\text{Обн.}} = \int_{t_{\text{Возд.}}}^{T_{\text{Обн.}}^{max}} p(T_{\text{Обн.}})dT_{\text{Обн.}}$ в пределах от начала воздействия $t_{\text{Возд.}}$ на контролируемый физический параметр зоны обнаружения до максимально допустимого (с точки зрения эффективности системы безопасности) времени обнаружения $T_{\text{Обн.}}^{max}$

(рис. 1, а) или $P_{\text{Обн.}} = \int_{x_{\text{Возд.}}}^{X_{\text{Обн.}}^{max}} p(X_{\text{Обн.}})dX_{\text{Обн.}}$ от начала зоны обнаружения $x_{\text{Возд.}}$ до максимально допустимого расстояния обнаружения $X_{\text{Обн.}}^{max}$ (рис. 1, б) соответственно.



а б

Рис. 1. Плотности распределения вероятностей
продолжительности обнаружения (а) и расстояния обнаружения (б)

Эти иллюстрации наглядно показывают необходимость увеличения продолжительности нахождения нарушителя в зоне обнаружения и пути, пройденного им по этой зоне.

Очевидно, что разные средства обнаружения будут иметь различный закон распределения и его числовые характеристики. Они будут зависеть от параметров средств обнаружения. Например, увеличение чувствительности приведет к смещению кривой $p(T_{\text{Обн.}})$ влево (к уменьшению среднего значения и дисперсии) с соответствующим увеличением $P_{\text{Обн.}}$ (рис. 1, а). Но, как следствие, возрастет и вероятность ложной тревоги, поскольку при этом уменьшается временной интервал анализа соответствующего физического параметра для принятия решения (сокращается выборка).

Также очевидна зависимость закона распределения и(или) его числовых характеристик от окружающих условий [2], характера движения нарушителя и возможных способов его воздействия (как активных, так и пассивных) на систему безопасности, в частности, на средства обнаружения [3]. Например, использование одного из наиболее эффективных способов избежать обнаружения пассивным инфракрасным (ПИК) датчиком движения с низкой или высокой скоростью (ниже стандартного предела 0,3 м/с или выше 3 м/с). Аналогичная ситуация будет при применении другого пассивного способа «обхода» ПИК датчика — использования плотной одежды, уменьшающей уровень инфракрасного излучения. Применительно к плотности распределения вероятности это приведет к увеличению среднего значения и дисперсии (рис. 1, а, пунктирная кривая). Следствием будет уменьшение вероятности обнаружения.

Заметим, что из этого рисунка следует, что вследствие какого-либо ограничения размеров зоны обнаружения может заметно уменьшиться вероятность обнаружения (увеличиться вероятность пропуска цели), поскольку при этом верхний предел $X_{\text{Обн.}}^{max}$ интегрирования становится фиксированным $X_{\text{Обн.}}^{max} = X_{\text{Зон.}}$ (рис. 1, б), определяемым размером $X_{\text{Зон.}}$ зоны обнаружения, ограниченным, к примеру, размерами помещения. Также из рисунка видно, что для увеличения вероятности обнаружения необхо-

димо стремиться не только к уменьшению среднего значения времени или расстояния обнаружения, но и к уменьшению дисперсии.

Обычно в практических задачах интересует продолжительность обнаружения с заданной вероятностью или путь, пройденный по зоне обнаружения до обнаружения с заданной вероятностью. При определенном законе распределения $p(T_{\text{Обн.}})$ и $p(X_{\text{Обн.}})$ требование обеспечения заданного (минимально допустимого) значения вероятности $P_{\text{Обн.}}^{min}$ обнаружения НП определяет $T_{\text{Обн.}}^{max}$ или $X_{\text{Обн.}}^{max}$. И наоборот, заданные $T_{\text{Обн.}}^{max}$ или $X_{\text{Обн.}}^{max}$ определят значение вероятности $P_{\text{Обн.}}^{min}$.

Воздействия нарушителя на средства обнаружения

Вопросы выбора типа устройств обнаружения и места их взаимного расположения для случая подготовленного нарушителя и пассивных способов воздействия на средства обнаружения проанализированы в работе [3]. Рассмотрим более общий случай НП высококвалифицированным нарушителем и возможности любых воздействий (активных, пассивных) и окружающих условий на средства обнаружения, используя тот же подход.

В общем случае вероятность обнаружения будет зависеть от ряда факторов, к основным из которых можно отнести следующие. Во-первых, совокупность факторов $\mathbf{E}^j = [E_1^j, E_2^j, ..., E_N^j]$, определяющих окружающие условия (ОУ) и влияющие на работоспособность и характеристики *j*-го средства обнаружения (СО). Во-вторых, множество $\mathbf{B}^j = [B_1^j, B_2^j, ..., B_M^j]$ возможных пассивных способов воздействия B_n^j на *j*-е СО (ПВ), назовем условно обходом средств обнаружения. И, в третьих, совокупность $\mathbf{A}^j = [A_1^j, A_2^j, ..., A_L^j,]$ активных способов воздействия A_k^j на *j*-е СО (АВ) будем называть маскированием средств обнаружения.

Вероятность обнаружения *i*-й угрозы T_i *j*-м средством обнаружения можно записать как функцию упомянутых выше факторов $P_i{}^j = P(D_i{}^j / \mathbf{E}, \mathbf{B}, \mathbf{A})$. Множество $\mathbf{S}$ возможных воздействий будет определяться пересечением подмножеств АВ, ПВ и ОУ. Т.е. $\mathbf{S} \subseteq (\mathbf{A} \cap \mathbf{B} \cap \mathbf{E})$. Обычно, имеет место только часть $\mathbf{S}_i$ воздействий, формируемых *i*-й угрозой и определяемых соответствующими подмножествами $\mathbf{E}_i \subset \mathbf{E}$, $\mathbf{B}_i \subset \mathbf{B}$, $\mathbf{A}_i \subset \mathbf{A}$, для которых справедливы соотношения $\mathbf{S}_i \subseteq (\mathbf{A}_i \cap \mathbf{B}_i \cap \mathbf{E}_i)$, $\mathbf{S}_i \subset \mathbf{S}$. Заметим, что в общем случае $\mathbf{A} \bigcap \mathbf{E} \neq \varnothing$, $\mathbf{A} \bigcap \mathbf{B} \neq \varnothing$ и $\mathbf{E} \bigcap \mathbf{B} \neq \varnothing$. Т.е. некоторые факторы АВ, ПВ и ОУ могут частично совпадать.

Ясно, что рассматриваемые воздействия, как правило, приводят к уменьшению вероятности обнаружения и эффективности системы безопасности в целом. Рассматривать крайне редкие случаи повышения вероятности обнаружения при том или ином виде воздействия вряд ли имеет смысл. Поэтому, с точки зрения увеличения надежности обнаружения, необходимо обеспечить, по-возможности, независимость функционирования средств обнаружения от окружающих условий, пассивных и активных воздействий.

Проанализируем, какие требования к типу и структуре средств обнаружения должны предъявляться при использовании модели высококвалифицированного нарушителя.

Анализ влияния воздействий на средства обнаружения

С точки зрения влияния разных воздействий на средства обнаружения имеет смысл рассмотреть разные ситуации их использования (нескольких рубежей охраны) для следующих типов устройств — обычных (с одним каналом обнаружения), совмещенных (т.е. несколько устройств обнаружения в одном корпусе или расположенные в одном месте с

независимыми алгоритмами работы) и двойной (тройной) технологии (т.е. использующие несколько каналов обнаружения с принятием решения по алгоритму «И»).

Будем исходить из предположения, что высококвалифицированный нарушитель может применить любые способы воздействия в сочетании с выбором соответствующих условий НП. Т.е. может практически вывести из строя средства обнаружения (свести к нулю вероятность обнаружения НП). Хорошо известный способ борьбы с этим — использование многорубежной охраны, позволяющей повысить вероятность обнаружения $P_{\text{Обн.}}{}^{I} = 1 - \prod_{i=1}^{I}(1 - P_{\text{Обн.}i})$ при использовании I рубежей обнаружения НП. Но это выражение справедливо для «идеального» случая независимых средств обнаружения и отсутствия воздействий.

Пусть имеется K средств обнаружения и N различных видов воздействий на них. Для повышения вероятности обнаружения необходимо исключить возможность одновременного разного вида воздействия на все средства обнаружения как во времени, так и в пространстве. При этом события любой пары S_n^j и S_l^k должны быть несовместными $S_n^j \cap S_l^k = \varnothing$ для обеспечения невозможности одновременного выполнения этого воздействия, т.е. $\bigcup_{n \in N} S_n^j \cap \bigcup_{l \in N} S_l^k = \varnothing$, $j, k \in K$.

Невыполнение последнего равенства соответствует случаю, когда есть общий(ие) фактор(ы), влияющие одновременно на несколько средств обнаружения. К примеру, малая скорость движения снижает вероятность обнаружения устройств с разными физическими принципами действия, например ПИК и радиоволнового.

Также опасна ситуация с совпадением результата одновременного воздействия на средства обнаружения факторов из разных групп, например закраска оптической системы (АВ) ПИК датчика приводит к уменьшению потока ИК энергии. Подобное происходит, когда нарушитель одевается в плотную одежду (ПВ).

Средства обнаружения с одним каналом обнаружения

ОУ. Очевидно, что в первую очередь нужно использовать требования инструкций по установке и общие рекомендации, например [2].

Отметим также, что во многих случаях по характеру влияние факторов окружающей среды $\mathbf{E}^j$ сходно с возможным пассивным воздействием $\mathbf{B}^j$ на *j*-е средство обнаружения, рассмотренное в [3], поскольку они обычно взаимосвязаны и зависят в первую очередь от принципа действия средства обнаружения и его положения на объекте, а, следовательно, и расположения зоны обнаружения. Например, для ПИК датчика как повышение температуры окружающей среды, так и плотная одежда нарушителя приведут к близкому эффекту — снижению температурного контраста и уменьшению вероятности обнаружения. Более того, квалифицированный нарушитель может выбирать подходящие условия выполнения НП и использовать соответствующие этим условиям воздействия, усугубляя влияние каждого из них. Поэтому должно выполняться требование несовместности влияния одних и тех же факторов ОУ на разные СО, используемые на маршруте НП, что возможно при перекрытии зон обнаружения средств обнаружения разных физических принципов действия. Кроме того, очевидно, что необходима адаптация средств обнаружения к изменению окружающих условий для сведения к минимуму этого влияния.

ПВ. Этот случай рассмотрен в [3]. Там же даны рекомендации по практическому применению. Из основных можно отметить необходимость использования перекрытия зон обнаружения в пространстве, т.е. решение задачи обнаружения угрозы одновре-

менно несколькими средствами обнаружения; правильный выбор физического принципа действия каждого средства обнаружения и их взаимного расположения так, чтобы эффективные пассивные воздействия на средства обнаружения были несовместными для разных СО, контролирующих одну и ту же зону.

АВ. Задача решается, прежде всего, во-первых, уменьшением возможности собственно выполнения АВ и, во-вторых, путем обнаружения этого воздействия различными способами (в первую очередь аппаратными, например, датчик вскрытия или снятия со стены; использование канала антимаскирования и т.п. средств), в том числе и путем взаимного контроля друг друга разными средствами обнаружения, т.е. не просто перекрытия зон обнаружения, а и контроля непосредственно самих средств обнаружения.

Совмещенные средства обнаружения

ОУ. Влияние таких воздействий и соответствующие рекомендации рассмотрены в ряде работ, к примеру в [2]. Здесь целесообразно дополнительно рассмотреть два случая.

1. Использование средств обнаружения разного физического принципа действия для обнаружения одного и того же проявления НП (например, движения) требует правильного выбора типов средств обнаружения. В этом случае можно использовать рекомендации [2,3].

2. При совмещении средств обнаружения разных проявлений НП и разных физических принципов обнаружения, например движения и разбивания стекла, необходим учет зачастую противоречивых требований по установке и учету влияния ОУ на вероятности обнаружения, выполнение чего не всегда возможно. Т.е. возникают дополнительные ограничения на установку.

ПВ. Можно использовать результаты работы [3].

АВ. При использовании совмещенных средств обнаружения будет больше возможность активного воздействия на оба устройства, поскольку в такой ситуации обычно облегчается доступ к обоим из них.

Средства обнаружения двойной технологии

ОУ. Основные особенности влияния ОУ рассмотрены в [2]. В настоящее время используется практически только одно сочетание физических принципов действий каналов обнаружения комбинированных датчиков движения — пассивный инфракрасный и радиоволновой. Действительно, для случая воздействий ОУ на средство обнаружения можно записать выражение, определяющее необходимость выполнения $\bigcup_{n\in N} E_n^j \cap \bigcup_{l\in N} E_l^k = \varnothing, \quad j \in, k \in K$. Это достигается практически в полной мере для упомянутого сочетания, подобранного путем логических рассуждений [2], но не выполняется для других.

ПВ. Это случай, рассмотренный в [3] при ПВ. Такое сочетание рационально и с точки зрения пассивных воздействий. Кроме того, надо отметить следующее.

Рассматриваемый алгоритм эффективен при ОУ, близких (в допустимых пределах) к нормальным. Но при критических ОУ или ПВ он становится малоэффективен. Поясним это. Ясно, что на каждый из каналов могут влиять разные факторы: как ОУ $\mathbf{E}^j$, так и ПВ $\mathbf{B}^j$. Эти факторы будут приводить к снижению значения $P'_{\text{Обн.}j}$ каждого из каналов по сравнению с исходной $P^{'}_{\text{Обн.}j} < P^0_{\text{Обн.}j}$. Соответственно уменьшается и общая вероятность обнаружения $P'_{\text{Обн.}\Sigma} = P'_{\text{Обн.1}} P^0_{\text{Обн.2}}$. Частично это компенсируется более высоким исходным значением чувствительности каналов и, следовательно, значений вероятностей $P^0_{\text{Обн.}j}$.

Однако сильное ПВ может привести к значительному снижению $P_{\text{Обн.}j}$. Алгоритм становится малоэффективным, а в предельном (худшем) случае $P'_{\text{Обн.}j} \to 0$. Следовательно, и $P'_{\text{Обн.}\Sigma}$ будет равна нулю. Таким образом, алгоритм практически перестает работать при полном выходе из строя даже одного из каналов, например при температуре около 37°, плотной одежде нарушителя, малой скорости движения и других воздействий, особенно в их сочетании. Следовательно, во-первых, нужно обязательно использовать устройства с адаптацией к ОУ. И, во-вторых, в такой ситуации можно рекомендовать весовую обработку сигналов отдельных каналов для принятия окончательного решения, т.е. учет в большей степени результатов обнаружения одного из каналов, в пределе только одного. Но это требует дополнительных средств контроля ОУ и обнаружения пассивных воздействий. Иначе теряются преимущества такого типа устройств.

АВ. Возможность активных воздействий в такой ситуации будет, как и для совмещенных устройств, даже проще, поскольку достаточно вывода из строя только одного канала обнаружения. Но есть дополнительные возможности по обнаружению АВ на устройство, в частности за счет более высокой исходной вероятности обнаружения и наличия активного канала. Поэтому, кроме аппаратных средств обнаружения АВ, также возможно использование алгоритмических средств обнаружения АВ. В такой ситуации также можно рекомендовать весовую обработку сигналов отдельных каналов.

Основные функции препятствий

Правильный выбор средств обнаружения и их расположения на объекте увеличивает вероятность обнаружения. Более точная оценка вероятности обнаружения позволяет корректнее оценить эффективность системы безопасности. Но для оценки эффективности нужно сравнить две составляющие [1, 4] — продолжительность выполнения НП и время реакции системы на НП. В свою очередь, продолжительность НП зависит от задержки проникновения, зависящей главным образом от физических препятствий на маршруте НП.

Оценим возможности препятствий по решению задач системы безопасности. Рассмотрим, какие основные функции могут выполнять препятствия с точки зрения общего определения системы безопасности как совокупности методов и средств предупреждения, обнаружения и ликвидации угроз жизни, здоровью, имуществу и информации [4].

1. Предотвращение. Очевидно, что препятствие может выполнять эту задачу. Для этого оно должно быть:

- Визуально видимым, чтобы потенциальный преступник понимал, что может не преодолеть его, т.е. располагаться обычно на внешней границе (периметре) объекта.
- Быть достаточно прочным (или, по крайней мере, выглядеть таковым), требующим значительных времени, средств и квалификации на преодоление.
- Перекрывать все наиболее уязвимые места проникновения так, чтобы другие потенциальные пути проникновения требовали не меньше времени, средств и квалификации на проникновение.

2. Обнаружение. Непосредственно решать задачу обнаружения само препятствие не может, однако в совокупности со средствами обнаружения оно может повысить вероятность обнаружения НП, поскольку его преодоление требует большего времени нахождения в зоне обнаружения (при правильном выборе места установки препятствия). И, как было показано выше, при этом возрастает вероятность обнаружения.

3. Ликвидация. С этой точки зрения возможно несколько особенностей применения.

• Практически непреодолимое (для данного нарушителя с его оснащенностью и квалификацией) препятствие, возникшее на пути НП к цели, может остановить НП и вынудить нарушителя отказаться от поставленной задачи, если требует неприемлемых затрат времени и средств на преодоление.

• Задержка проникновения, создаваемая препятствиями и увеличивающая продолжительность НП, дает возможность своевременно нейтрализовать нарушителя.

Таким образом, препятствие может и должно быть неотъемлемым элементом объединенной системы безопасности. Однако его эффективное применение возможно только при правильном учете и взаимодействии с другими элементами системы безопасности, в первую очередь, средствами обнаружения, т.е. правильно располагаться не только по отношению к потенциальной цели НП, но и по отношению к положению зон обнаружения средств обнаружения. Ну и, естественно, обладать достаточной стойкостью к преодолению.

Задержка, создаваемая препятствиями

В общем случае можно говорить о двух вариантах такого параметра, как задержка $T_{\text{Зад.}}$ проникновения: во-первых, в буквальном смысле слова как время $T_{\text{Зад.}}$, которое требуется для преодоления препятствия и, во-вторых, как задержка $T_{\text{Зад.обн..}}$ обнаруженного проникновения, как частный случай общей задержки.

Общая задержка может сделать бесполезным НП, т.е. предотвратить его, если время преодоления препятствия делает нерешаемой задачу несанкционированного проникновения. Например, если продолжительность проникновения на объект больше, чем нерабочее время, то нет смысла пытаться это сделать, по крайней мере, тайно. Более важной является функция препятствия по формированию задержки обнаруженного проникновения. Известно, что эта функции выполняется, только если препятствие находится после устройств обнаружения [1]. В этом случае она позволяет увеличить допустимое время для реагирования на НП.

С учетом выполняемых препятствиями функций их использование для искусственного создания задержки может применяться не только для увеличения времени пребывания преступника на маршруте проникновения, но и для увеличения продолжительности пребывания в зоне обнаружения, что приводит к увеличению вероятности обнаружения. Поэтому необходимо устанавливать препятствия не просто после средств обнаружения, а в конце зоны обнаружения, что увеличивает значения $T_{\text{Обн.}}$ и $X_{\text{Обн.}}$, а, следовательно, и вероятность $P_{\text{Обн.}}$.

Рис. 2 иллюстрирует различные функции, выполняемые препятствиями в зависимости их расположения на объекте относительно зоны обнаружения:

• первое препятствие — предотвращение НП и общая задержка;

• второе препятствие — задержка обнаруженного проникновения и увеличение вероятности обнаружения;

• третье препятствие — задержка обнаруженного проникновения.

Рассмотрим, для примера, два однотипных объекта: один оборудован деревянной дверью с простым замком, а другой — металлической со сложным замком, т.е. создающей сложности с ее вскрытием и, следовательно, обеспечивающей задержку при НП. Также предположим типичный вариант оснащения этих дверей магнитоконтакными датчиками в качестве средства обнаружения. В данной ситуации имеет место создание препятствия (и, следовательно, задержки $T_{\text{Зад.}}$) до устройства обнаружения. С точки зрения возможности реагирования на проникновение через дверь оба объекта будут

идентичны. Действительно, и в том, и в другом случае сигнал тревоги поступит только после открывания двери независимо от того, сколько времени предварительно потребовалось на ее вскрытие. Отличия будут в следующем. Лучше укрепленная технически металлическая дверь предотвратит проникновение неподготовленного преступника (первое препятствие на рис. 2). Например, наркоман, даже с помощью простейших инструментов или подручных средств (металлический прут и т.п.), быстро взломает деревянную дверь, чего он не сможет сделать во втором случае. Однако высококвалифицированный преступник, оснащенный соответствующим инструментом, сможет достаточно быстро открыть дверь и во втором примере.

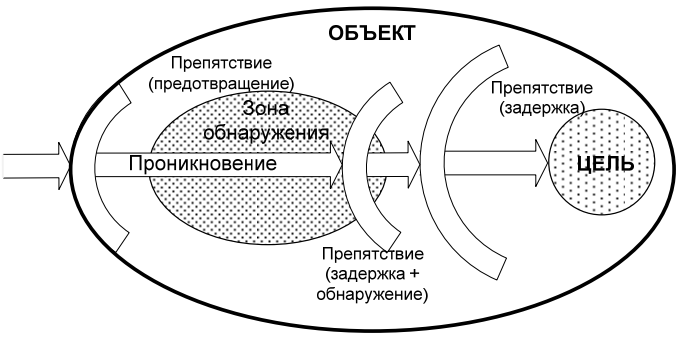


Рис. 2. Функции препятствий

Т.е. с точки зрения своевременности реакции на НП в данном примере не имеет значения, хорошая или плохая дверь: продолжительность $T_{\text{Зад.обн.}}$ обнаруженного проникновения не меняется, и время на реагирование остается тем же самым, поскольку задержка создается до зоны обнаружения, и поэтому решается только задача предупреждения части угроз.

Другое дело, если на металлической двери стоит, к примеру, вибрационный или емкостный датчик. Тогда обнаружение происходит до препятствия. А само препятствие находится в конце зоны обнаружения. Следовательно, можно обнаружить попытку проникновения до открывания двери. Большую задержку обеспечит стальная дверь, соответственно времени на реагирование будет больше.

Другим примером сказанного может служить защитная пленка на витрине, контролируемой на разбивание. В этом случае после разбивания стекла (которое будет обнаружено акустическим датчиком) преступник затратит еще время на то, чтобы разрушить и пленку, чего не потребовалось бы при использовании незащищенного стекла. Т.е. препятствие находится в зоне обнаружения, поэтому создается задержка обнаруженного проникновения.

Заключение

В работе выполнено следующее.

1. Предложено оценивать вероятность обнаружения НП с учетом плотности распределения вероятности продолжительности обнаружения при «хаотичном» движении нарушителя, со сменой направления или расстояния обнаружения при квазилинейном движении.

2. Показано, что при физическом ограничении зоны обнаружения конструктивными элементами объекта происходит уменьшение вероятности обнаружения НП. Это требует выбора средств обнаружения с более высокой исходной вероятностью обнаружения НП или установки его параметров с большим значением чувствительности. Также показано, что для увеличения вероятности обнаружения необходимо стремиться не только к уменьшению среднего значения времени или расстояния обнаружения, но и к уменьшению дисперсии.

3. Проанализировано влияние на вероятность обнаружения разными типами средств обнаружения (одноканальными, совмещенными и двойной технологии) комплекса пассивных и активных воздействий, применяемых нарушителем. Показана целесообразность перекрытия

зон обнаружения, взаимного контроля средств обнаружения и применения весовой обработки сигналов каналов обнаружения средств обнаружения двойной технологии.

4. Проанализированы основные функции физических препятствий, создающих задержку обнаруженного НП. Показана целесообразность использования физических препятствий в конце зоны обнаружения, что не только создает задержку обнаруженного НП, но и повышает вероятность обнаружения нарушителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарсиа М. Проектирование и оценка систем физической защиты. — М.: Мир, 2003. — 388 с.

2. Волхонский В.В. Извещатели охранной сигнализации. — 4-е изд., доп. и перераб. — СПб.: Экополис и культура, 2004. — 272 с.

3. Волхонский В.В., Крупнов А.Г. Особенности разработки структуры средств обнаружения угроз охраняемому объекту // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. — 2011. — №4 (74). — С. 131—136.

4. Волхонский В.В. Системы охранной сигнализации. — 2-е изд., доп. и перераб. — СПб.: Экополис и культура, 2005. — 204 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ СТАТЬИ:

Волхонский Владимир Владимирович. Профессор кафедры твердотельной оптоэлектроники. Кандидат технических наук, доцент.

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

E-mail: volkhonski@mail.ru

Россия, 197101, Санкт-Петербург, проспект Кронверкский, 49. Тел. +7 (812) 595-41-38.

Volkhonskiy Vladimir Vladimirovich. Professor of the chair of Solid State Optoelectronics. Candidate of Science (technical), assistant professor.

Saint-Petersburg National Research University of Information Technology, Mechanics and Optics.

Work address: Russia, 197101, Saint-Petersburg, Kronverkskiy prospect, 49. Tel. +7(921)964 97 10.

Ключевые слова к статье: вероятность обнаружения; несанкционированное проникновение; физические препятствия; система безопасности.

Key words: detection probability; unauthorized penetration; physical obstacles; security system.

УДК 654.924

С.Н. Ляшенко,
Департамент информационных технологий, связи и защиты информации МВД России

Н.Н. Оськин,
Департамент информационных технологий, связи и защиты информации МВД России

ОЦЕНКА ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДВОИЧНЫХ КОДОВ НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ УОЛША

EVALUATION OF NOISE IMMUNITY OF DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS FOR USE BINARY CODES BASED ON THE CONSISTENT WALSH

Рассматриваются вопросы оценки помехозащищенности цифровых систем связи при применении двоичных кодов на основе последовательностей Уолша.

Addresses the assessment of noise immunity of digital communication systems in the application of binary sequences based on Walsh.

В системах связи для повышения помехоустойчивости широко используется кодирование передаваемой информации [1,2]. В большинстве случаев, если не используется обратная связь, на приёмной стороне в демодуляторе выделяются элементы передаваемых кодированных сообщений (логические 0 или 1), а затем в декодере осуществляется исправление возникающих ошибок. При этом часть обнаруженных ошибок исправляется правильно, а если их кратность велика, то происходит ошибочное исправление, приводящее к размножению ошибок по сравнению с их исходным количеством.

Исправляющая способность коротких двоичных кодов сравнительно невелика, и для повышения помехоустойчивости необходимо значительно увеличивать длину кода до десятков тысяч элементов и использовать итеративные процедуры декодирования с «мягкими» решениями, как, например, в турбо-кодах [3].

В теории систем передачи дискретной информации известно [1,2], что наиболее помехоустойчивой является обработка кодированных сообщений «в целом». Теорема Финка [1] утверждает, что

$$p_1 \geq p_2 \geq p_3 \geq p_4, \quad (1)$$

где p_1 — вероятность того, что при поэлементном приеме кодовая комбинация принята с ошибкой; p_2 — вероятность того, что при поэлементном приеме произошла неисправленная ошибка; p_3 — вероятность того, что кодовая комбинация принята ошибочно при оптимальном приеме «в целом»; p_4 —вероятность того, что при поэлементном приеме возникла необнаруженная ошибка.

Таким образом, при использовании декодирования «в целом» всей принятой кодовой последовательности можно реализовать исправляющую способность декодера на уровне обнаруживающей способности кода, что обеспечит существенный рост помехоустойчивости при сравнительно коротких кодах. Последовательности Уолша можно рассматривать как числовые со значениями элементов ± 1 на основе матриц Адамара [4,5], определяемых рекуррентным соотношением

$$W_{2k} = \begin{bmatrix} W_k & W_k \\ W_k & -W_k \end{bmatrix}, \quad k = \overline{2,N}, \quad W_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $N = 2^n$ — длина последовательностей Уолша. В качестве примера для $N = 8$ получим

$$W_8 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Последовательности Уолша $w_{i,j}$ являются строками матрицы Адамара вида (3), i — номер функции (строки матрицы), j — номер элемента (столбца матрицы), $i, j = \overline{0,(N-1)}$, их число равно длине последовательности N. Матрица Адамара удовлетворяет равенству

$$W_N W_N^T = W_N W_N = N \times I, \quad (4)$$

где I — единичная матрица, а W_N^T — транспонированная матрица Адамара, то есть последовательности Уолша ортогональны,

$$\sum_{j=0}^{N-1} w_{i,j} w_{k,j} = \begin{cases} N & при \quad i = k, \\ 0 & при \quad i \neq k. \end{cases} \quad (5)$$

Пусть сигнал $s(t)$ является последовательностью из N двоичных элементов $\{s\} = s_0, s_1, ..., s_{N-1}$, записанных в виде матрицы-строки, $s_i = \pm 1$, $j = \overline{0,(N-1)}$. Ее можно представить в виде взвешенной суммы последовательностей Уолша

$$\{s\} = \frac{1}{N}\{R\} \times W_N , \tag{6}$$

где $\{R\} = R_0, R_1, ..., R_{N-1}$ — матрица-строка коэффициентов разложения, равных

$$\{R\} = \{s\} \times W_N . \tag{7}$$

Прямое и обратное преобразование Уолша можно записать в виде

$$R_i = \sum_{i=0}^{N-1} s_j w_{i,j}, \quad i = \overline{0,(N-1)}. \tag{8}$$

$$s_j = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} R_i w_{i,j}, \quad j = \overline{0,(N-1)}. \tag{9}$$

Совокупность коэффициентов Уолша можно рассматривать как спектр сигнала $\{s\}$, подобный спектру в гармоническом базисе.

Величины R_i, $i = \overline{0,(N-1)}$, являются целыми четными (положительными или отрицательными) числами. Из (8) получим

$$\sum_{i=0}^{N-1} R_i = \sum_{j=0}^{N-1} s_j \sum_{i=0}^{N-1} w_{i,j} = Ns_0 = \pm N . \tag{10}$$

Перемножая матрицу-строку $\{s\}$ и матрицу-столбец $\{s\}^T$, где $(..)^T$ — символ транспонирования, получим

$$\{s\} \times \{s\}^T = N , \tag{11}$$

а с учетом (6)

$$\{s\} \times \{s\}^T = \frac{1}{N}\{R\}W_N \times \frac{1}{N} W_N \{R\}^T = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} R_i^2 . \tag{12}$$

Тогда из (11) и (12)

$$\sum_{i=0}^{N-1} R_i^2 = N^2 . \tag{13}$$

Полученное выражение соответствует известному равенству Парсеваля в теории гармонических спектров, а выражение (12) определяет нормированную мощность сигнала, выраженную через спектр Уолша. Из (13) следует неравенство

$$\left|R_i\right| \le N, \qquad i = \overline{0,(N-1)} . \tag{14}$$

Рассмотрим скалярное произведение двух сигналов $\{s\}_1$ и $\{s\}_2$ в матричной форме

$$\{s\}_1 \times \{s\}_2^T = \frac{1}{N}\{R\}_1 W_N \times \frac{1}{N} W_N \{R\}_2^T = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} R_{1,i} R_{2,i} . \tag{15}$$

С другой стороны,

$$\{s\}_1 \times \{s\}_2^T = N - 2d , \tag{16}$$

где d — расстояние Хэмминга между кодовыми словами $\{s\}_1$ и $\{s\}_2$, тогда с учетом (15)

$$\{R_1\} \times \{R_2\} = \sum_{i=0}^{N-1} R_{1,i} R_{2,i} = N(N-2d) . \tag{17}$$

Как видно, спектры Уолша характеризуют меру различия соответствующих кодовых последовательностей. Если $d = N$ (это максимально возможное значение), то из (16) следует противоположность кодовых слов $\{s\}_1$ и $\{s\}_2$, $\{s\}_1 = -\{s\}_2$. При $d = N/2$ получим

$$\{s\}_1 \times \{s\}_2^T = 0, \tag{18}$$

то есть комбинации $\{s\}_1$ и $\{s\}_2$ ортогональны.

Из (8) при $i = 0$ с учетом того, что в последовательности Уолша w_j все элементы равны 1, получим

$$R_0 = \sum_{j=0}^{N-1} s_j, \tag{19}$$

то есть коэффициент R_0 равен разности числа символов 1 и –1 в кодовой последовательности $\{s\}$. При $i = N/2$ у последовательности Уолша первые $N/2$ элементов равны 1, а последние –1. Тогда

$$R_{N/2} = \sum_{j=0}^{(N/2)-1} s_j - \sum_{j=N/2}^{N-1} s_j. \tag{20}$$

Подобные соотношения можно получить и для других коэффициентов Уолша.

Если сами кодовые комбинации являются последовательностями Уолша, то получим ортогональный код длиной N элементов, у которого $m = \log_2 N$ информационных символов и $d = N/2$. Если же к ним добавить противоположные комбинации, то получим код Рида-Мюллера [4], у которого $m = \log_2 N + 1$, а $d = N/2$ для всех кодовых слов, кроме одного, для которого $d = N$. Это блоковые коды (N, m, d) со скоростью передачи, равной

$$V = \frac{m}{N} = \frac{\log_2 N + 1}{N}, \tag{21}$$

которая быстро падает с ростом длины кодового слова.

Спектры Уолша $\{R\}$ двоичных последовательностей содержат только четные числа. Для полного кода от 00..0 до 11..1 с номерами (десятичными эквивалентами) i от 0 до $(2^N - 1)$, всего 2^N комбинаций, коэффициенты Уолша $R_{i,j}$ (j — номер последовательности) образуют матрицу размера $N \times 2^N$, ее пример при $N = 4$ показан на рис. 1.

$R_{i,j}$ ↓ \ i →	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	-4	-2	-2	0	-2	0	0	2	-2	0	0	2	0	2	2	4
1	0	2	-2	0	2	4	0	2	-2	0	-4	-2	0	2	-2	0
2	0	2	2	4	-2	0	0	2	-2	0	0	2	-4	-2	-2	0
3	0	2	-2	0	-2	0	-4	-2	2	4	0	2	0	2	-2	0

Рис. 1. Матрица коэффициентов Уолша

Если из нее выбрать последовательности Уолша (номера i равны 0, 3, 5, 6, 9, 10, 12 и 15), то получим код Рида-Мюллера (4,3,2).

При $N = 8$ спектр Уолша для кода Рида-Мюллера (8,4,4) показан на рис. 2.

$R_{i,j}$ ↓ \ i →	0	15	51	60	85	90	102	105	150	153	165	170	195	204	240	255
0	-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
1	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-8	0	0
2	0	0	0	0	0	0	-8	0	0	8	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	-8	0	0	0	0
4	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-8	0
5	0	0	0	-8	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	8	-8	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	-8	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0

Рис. 2. Спектр Уолша для кода Рида-Мюллера

Кроме того, имеются спектры Уолша, содержащие числа 4, 4, 4, и –4 и четыре нуля в различных комбинациях, всего 112 вариантов. Если к ним добавить коды Рида-Мюллера, то получим 128 комбинаций блочного кода (8,7,2). Кроме того, имеется еще 128 комбинаций, в которых один из коэффициентов Уолша равен 6 или – 6, а остальные равны ± 2. Они также образуют блочный код (8,7,2). Спектры Уолша должны удовлетворять условию (10).

Таким образом, анализ спектров Уолша двоичных кодовых последовательностей позволяет выбрать подходящие комбинации, из которых особый интерес для решения задачи декодирования «в целом» представляют ортогональные и биортогональные коды.

Двоичные коды на основе последовательностей Уолша позволяют реализовать цифровые алгоритмы их когерентной демодуляции и мягкого декодирования «в целом» с эффективным исправлением ошибок. При этом фактически реализуется оптимальная обработка широкополосного сигнала с малой базой (например, фазоманипулированного) [5] и за счет этого обеспечивается высокая помехоустойчивость передачи дискретных сообщений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. — М.: Сов. радио, 1970.

2. Бородин Л.Ф. Введение в теорию помехоустойчивого кодирования. — М.:Сов. радио, 1968.

3. Berrou C., Glavieux A. Near Optimum Error Correcting Coding and Decoding Turbo-Codes. IEEE Trans. On Comm. — Vol. 44. — No. 10. — October 1996.

4. Хармут Х.Ф. Передача информации ортогональными функциями. — М.: Связь, 1975.

5. Варакин Л.Е. Системы связи с широкополосными сигналами. — М.: Радио и связь, 1985.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ СТАТЬИ:

Ляшенко Сергей Николаевич. Заместитель начальника.
Департамент информационных технологий, связи и защиты информации МВД России.
E-mail: lsn1967@yandex.ru
Россия, 119049, г. Москва, ул. Житная, 16. Тел. (495) 667-67-76.

Оськин Николай Николаевич. Начальник отдела организации связи Управления связи.
Департамент информационных технологий, связи и защиты информации МВД России.
E-mail: osn007@mail.ru
Россия, 119049, г. Москва, ул. Житная, 16. Тел. (495) 667-00-37.

Liashenko Sergey Nikolaevich. Deputy Head of Department of Information Technology, Communications and Information Protection of the Ministry of the Interior of Russia.
Work address: Russia, 119049 Moscow, Zhitnaya Str., 16. Tel. (495) 667-67-76.

Oskin Nikolay Nikolaevich. Chief of division of the organization of the communication.
Department of Information Technology, Communication and Information Protection of the Ministry of the Interior of Russia.
Work address: Russia, 119049, Moscow, Zhitnaya Str., 16. Tel. (495) 667-00-37.

Ключевые слова к статье: цифровая система связи; помехозащищенность; информация; двоичные коды; кодирование; последовательности Уолша; блоковые коды; демодуляция.

Key words: digital communication system; noise protection; information; binary codes; coding sequence of Walsh; block codes; demodulation.

УДК 621.391