Література

1. Трубецков Д.И., Рожнев А.Г. Линейные колебания и волны. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
2. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. – М.: Наука, 1981.
3. Мичулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р. Основы теории колебаний. – М.: Наука, 1988.

Надійшла 3.2.2010 р.

УДК 621.317.73

Б.Б. ПОСПЕЛОВ
Государственный университет информационно-коммуникационных технологий, г. Харков

КОМПЛЕКСНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ БЕСПРОВОДНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Рассматривается развитие байесовского подхода к комплексной оптимизации обобщенного правила решения в виде взаимосвязанной оптимизации частных правил решений для передающей и приемной сторон в беспроводных каналах связи.

Development of the bayesovskogo going is examined near complex optimization of the generalized rule of decision as associate optimization of private rules of decisions for transmitter and receiving sides in the off-wire ductings of connection.

Кючевые слова: канал связи, оптимизация.

Введение. Оптимизация беспроводных каналов связи с учетом среды передачи была и остается одной из важных и сложных проблем теории и техники связи. Актуальность поиска эффективных и конструктивных ее решений на современном этапе обусловливается бурным развитием беспроводных телекоммуникаций. К настоящему времени теория и техника беспроводной связи пополнились сложными технологиями доступа, кодирования, в том числе пространственно-временного, модуляции, адаптации, MIMO и другими технологиями [1]. Однако, несмотря на это, эффективность беспроводных телекоммуникаций в реальных условиях оказывается существенно ниже ожидаемой [2]. Основными причинами этого являются несоответствие реальных условий в среде передачи и принятых при проектировании, а также доминирующее преобладание многоэтапного подхода к оптимизации процедур формирования и принятия решений, который оказывается неоптимальным в сложных условиях. Поэтому проблема оптимизации беспроводных каналов остается одной из актуальных в современной теории и технике связи [2-4]. Эффективные и конструктивные решения данной проблемы следует искать в рамках подхода комплексной оптимизации обработки на передающей и приемной сторонах (процессов кодирования, модуляции, демодуляции и декодирования) в виде единого процесса передачи данных [3]. В такой общей постановке эта проблема пока еще не решена.

Реализация рассматриваемого подхода предполагает обобщенное описание данных на входе и выходе канала в виде элементов соответствующих пространств, представление канала связи в целом в виде единой системы обработки входных данных, работающей по некоторому обобщенному правилу решения или в виде взаимосвязанных частных правил решений, уточнение количественной оценки качества для обобщенного правила решения и последующую оптимизацию канала связи в целом в соответствии с заданным критерием.

В данной статье рассматривается развитие байесовского подхода к комплексной оптимизации обобщенного правила решения в виде взаимосвязанной оптимизации частных правил решений для передающей и приемной сторон, т. е. совместной (комплексной) оптимизации процессов формирования сигналов на передающей стороне и их обработки на приемной стороне с учетом свойств среды передачи.

Основные понятия и соотношения. В статистической теории связи байесовский подход традиционно используется для оптимизации решающих правил приемных систем обработки. Однако при определенной трансформации известных понятий и представлений, присущих данному подходу, он может быть использован для оптимизации решающих правил передающей системы, а также совместной оптимизации решающих правил для передающей и приемной систем различных каналов связи. Для этого уточним основные понятия и соотношения, необходимые для дальнейшего рассмотрения.

Обычно задача статистического решения возникает на приемной стороне при наблюдении реализации y случайного процесса $\{y(t)\}$, протекающего в дискретном либо непрерывном времени. В классических задачах обнаружения, оценки и фильтрации случайный процесс $\{y(t)\}$ обычно определяется принятой моделью уравнения наблюдения для приемной системы обработки. В отличие от этого рассматриваемые беспроводные каналы связи представляют собой специфические системы обработки входных данных λ в виде случайного процесса $\{\lambda(t)\}$ в соответствующие выходные данные $\hat{\lambda}$ (оценки) в виде случайного процесса $\{\hat{\lambda}(t)\}$. В теории связи понятие канала связи обычно связывают с совокупностью физической среды передачи и соответствующих устройств преобразования и обработки на передающей и приемной сторонах, обеспечивающих передачу требуемого потока данных λ через физическую среду [5].

При этом конкретный тип канала определяется видом данных (обычно дискретных или непрерывных процессов), действующих на соответствующем входе и выходе рассматриваемого канала связи. В общем случае будем полагать, что на входе и выходе беспроводных каналов связи могут действовать всевозможные реализации дискретных или непрерывных входных и выходных данных (оценок), которые являются элементами соответствующих функциональных пространств Λ и $\hat{\Lambda}$, имеющих одинаковую структуру. Тогда произвольный канал связи можно представить в виде соответствующей системы обработки входных данных, работающей по некоторому правилу F, по которому каждому элементу из пространства входных данных Λ ставится в соответствие элемент из пространства их оценок $\hat{\Lambda}$. Указанное правило в общем виде удобно представить в виде соответствующего оператора $F:\Lambda \to \hat{\Lambda}$. Для дальнейшего анализа выделим в среде (эфире) некоторые пространственные области передачи Ω_T и приема Ω_R, в каждой из соответствующих точек $\bar{r}_T$ и $\bar{r}_R$ которых определены реализации соответствующих процессов $\{x(t,\bar{r}_T)\}$ и $\{y(t,\bar{r}_R)\}$, которые связаны с входными данными $\{\lambda(t)\}$. Пусть реализации x и y процессов $\{x(t,\bar{r}_T)\}$ и $\{y(t,\bar{r}_R)\}$ являются элементами соответствующих функциональных пространств Λ_T и Λ_R, имеющих сходную структуру, которая в общем случае отличается от структуры пространств Λ и $\hat{\Lambda}$. Обычно процесс $\{x(t,\bar{r}_T)\}$, рассматриваемый в произвольной точке $\bar{r}_T \in \Omega_T$, является результатом преобразования процесса $\{\lambda(t)\}$ на передающей стороне. Пусть такое преобразование определяется некоторым оператором $F_T:\Lambda \to \Lambda_T$. Учитывая это, процесс $\{y(t,\bar{r}_R)\}$, рассматриваемый в произвольной точке $\bar{r}_R \in \Omega_R$, представляет собой результат преобразования процесса $\{x(t,\bar{r}_T)\}$ средой передачи (эфиром), которое описывается оператором $F_M:\Lambda_T \to \Lambda_R$. Тогда для реализаций y наблюдаемого процесса $\{y(t,\bar{r}_R)\}$ в точке $\bar{r}_R \in \Omega_R$ справедливо операторное уравнение:

$$y = F_M(x,n), \tag{1}$$

где $x = F_T(\lambda)$, а n – реализация некоторого процесса $\{n(t,\bar{r}_R)\}$, сопутствующего наблюдению $\{y(t,\bar{r}_R)\}$ и рассматриваемого в той же точке $\bar{r}_R$ области Ω_R обычно в качестве мешающего (помехи) при вынесении решения об оценке передаваемых данных. Пусть обработка реализаций (1) на приемной стороне при формировании оценки передаваемых данных λ определяется оператором $F_R:\Lambda_R \to \hat{\Lambda}$ (решающей функцией, правилом решения). Тогда функциональная зависимость оценки $\hat{\lambda}$ от наблюдения y может быть определена соотношением:

$$\hat{\lambda} = F_R(y) = F_R(F_M(F_T(\lambda),n)), \qquad \hat{\lambda} \in \hat{\Lambda}, \qquad y \in \Lambda_R. \tag{2}$$

Соотношение (2) является обобщенной операторной моделью для различных типов беспроводных каналов связи, в которых помехи и шумы вносятся не только в среде передачи, но и при обработке, определяемой соответствующими операторами F_T и F_R на передающей и приемной сторонах. Следуя (2), решения (оценки) $\hat{\lambda}$ зависят от оператора F_M среды передачи (эфира), сопутствующих помех n, а также соответствующих операторов F_T, F_R. Поэтому даже в случае нерандомизированных и взаимно обратных операторов F_T, F_R из-за необратимых преобразований F_M и помех n в среде передачи оценки $\hat{\lambda}$ на выходе канала будут отличаться от истинных данных λ.

Основная задача канала связи в этом случае состоит в «достаточном» приближении в некотором определенном смысле процесса $\{\hat{\lambda}(t)\}$ к исходному процессу $\{\lambda(t)\}$. При этом главная задача оптимизации канала связи состоит в достижении наибольшего возможного «тождества» между принятой и переданной совокупностью данных. Следует отметить, что преобразования в среде оказывают существенное ограничение на достижение наибольшего возможного качества передачи данных с использованием канала связи. Оптимизация каналов связи в этих условиях может достигаться путем выбора соответствующих операторов обработки данных на передающей F_T или приемной F_R сторонах или обоих операторов совместно (комплексная их оптимизация).

Критерии оптимизации беспроводных каналов связи. Обработку данных в соответствии с операторами F_T и F_R можно интерпретировать в виде реализации частных правил принятия решений, являющихся овеществлением соответствующей передающей и приемной структур рассматриваемых беспроводных каналов связи. Тогда для канала связи в виде единой приемо-передающей структуры правомочным является введение некоторого обобщенного правила решения, определяемого композицией

$\Xi = F_R(F_M(F_T(\lambda), n))$ соответствующих частных правил. Важным свойством обобщенного решения Ξ, отличающего его от традиционного, является зависимость от принятых решений на передающей и приемной сторонах и преобразований в среде передачи. Данное свойство обобщенного решения Ξ позволяет использовать байесовский подход для оптимизации обработки не только на передающей стороне, но совместной оптимизации обработки на передающей и приемной сторонах (комплексной оптимизации каналов связи) с учетом свойств используемых сред передачи и воздействия помех и шумов.

Для количественной оценки качества беспроводных каналов связи (качества обобщенного решения Ξ) введем обобщенную функцию потерь

$$r(\hat{\lambda}, \lambda) = r(F_R(y), \lambda) = r(F_R(F_M(F_T(\lambda), n)), \lambda). \quad (3)$$

В силу случайного характера данных λ, преобразований в среде и помех n случайными оказываются наблюдения y и соответственно оценки, определяемые в соответствии с правилом (2). При этом случайной оказывается и обобщенная функция потерь (3). В этом случае качество обобщенного решения будем характеризовать математическим ожиданием (3), называемым средним обобщенным риском. В рамках представления (3) для рассматриваемых каналов связи в зависимости от наличия априорных сведений о статистике наблюдений и данных, а также структуре и свойствах операторов обработки на передающей и приемной сторонах возможны различные виды среднего обобщенного риска. Так, например, если известна статистика наблюдений и данных, а операторы в (2) являются известными, нерандомизированными и фиксированными, то средний обобщенный риск

$$\pi_1(F_R, F_M, F_T) = \int\limits_{\Lambda_R} \int\limits_{\Lambda} r(F_R(y \mid F_M, F_T), \lambda) p(\lambda, y \mid F_M, F_T) dy d\lambda, \quad (4)$$

где $p(\lambda, y \mid F_M, F_T)$ – совместная плотность вероятности данных λ и наблюдений y при заданных операторах среды F_M и обработки F_T данных λ на передающей стороне.

Если при этом оператор F_M неизвестный, ненаблюдаемый и рандомизированный, то его влияние может учитываться в неявной форме в статистике наблюдения y. В этом случае средний обобщенный риск (4) будет определяться в виде:

$$\pi_2(F_R, F_T) = \int\limits_{\Lambda_R} \int\limits_{\Lambda} r(F_R(y \mid F_T, \lambda), \lambda) p(y \mid F_T; \lambda) dy d\lambda, \quad (5)$$

где $p(y \mid F_T; \lambda)$ – совместная плотность вероятности наблюдений y с учетом оператора F_M среды передачи и данных λ при условии заданного оператора обработки F_T на передающей стороне.

Если известна статистика данных и помех n и известными являются операторы F_T, F_M и F_R, то средний обобщенный риск будет определяться

$$\pi_3(F_R, F_M, F_T) = \int\limits_{\Lambda_N} \int\limits_{\Lambda} r(F_R(F_M(F_T(\lambda), n)), \lambda) p(n, \lambda) dn d\lambda, \quad (6)$$

где $p(n, \lambda)$ – совместная плотность вероятности помех n и данных λ в канале связи.

Средние обобщенные риски (4) – (6) основываются на различных сведениях об операторах обработки данных на передающей и приемной сторонах и преобразованиях в среде передачи. При этом для каждого из них требуется различный объем априорных статистических данных. В частности риски (4) и (5) требуют сведения о совместной статистике наблюдений и данных, а риск (6) требует данные о совместной статистике помех и данных. В отличие от рисков оптимального приема риски (4) – (6) являются более общими и позволяют формулировать задачи не только раздельной, но и совместной оптимизации обработки на передающей и приемной сторонах при различных преобразованиях в среде передачи.

Для непрерывных каналов связи характерным является средний обобщенный риск (5), при котором входные данные, подлежащие передаче, представлены в виде случайной функции времени с плотностью $p(\lambda)$. Реализация (5) предполагает известной совместную плотность $p(\lambda, y \mid F_T)$. Так как

$$p(\lambda, y \mid F_T) = p(\lambda) p(y \mid \lambda, F_T) = p(y \mid F_T) p(\lambda \mid y, F_T), \quad (7)$$

то (5) можно преобразовать к виду

$$\pi_2(F_R, F_T) = \int\limits_{\Lambda_R} p(y \mid F_T) dy \int\limits_{\Lambda} r(F_R(y \mid F_T), \lambda) p(\lambda \mid y, F_T) d\lambda, \quad (8)$$

где внутренний интеграл в (8)

$$\pi_4(F_R, F_T \mid y) = \int\limits_{\Lambda} r(F_R(y \mid F_T), \lambda) p(\lambda \mid y, F_T) d\lambda, \quad (9)$$

представляет условный средний обобщенный риск, который по аналогии [5] будем называть апостериорным. При этом качество рассматриваемого канала связи оказывается тем выше, чем меньше апостериорный обобщенный риск (9). Непрерывный канал связи будем считать оптимальным байесовским, если для него найдутся такие операторы обработки F_T и F_R на передающей и приемной сторонах, для которых риск $\pi_2(F_R, F_T)$ минимален. Поскольку $p(y \mid F_T)$ – положительная функция, средний риск $\pi_2(F_R, F_T)$, следуя (8), минимален, если для каждой реализации y решение $\hat{\lambda}$, минимизирует апостериорный обобщенный риск (9).

Частные обобщенные функции потерь и средние обобщенные риски для непрерывных каналов связи. Функция потерь (3) общего вида позволяет рассматривать множество частных обобщенных функций, учитывающих различные особенности беспроводной передачи данных в каналах связи. Так, например, для наиболее распространенной в задачах приема квадратической функции потерь

$$r(\hat{\lambda}, \lambda) = (\lambda - \hat{\lambda})^2 \tag{10}$$

качество рассматриваемого канала связи, следуя (6), оценивается средним обобщенным риском

$$\varepsilon^2(F_R, F_T) = \int\limits_{\Lambda_R} \int\limits_{\Lambda} (F_R(y \mid F_T) - \lambda)^2 p(y \mid F_T; \lambda) dy d\lambda . \tag{11}$$

В этом случае риск (11) определяет обобщенную среднеквадратическую ошибку передачи данных через канал. Ошибка передачи, следуя (11) зависит от используемых операторов обработки данных на передающей и приемной сторонах канала. Обобщенная функция потерь в виде (10) и средний обобщенный риск (11) позволяют определить лишь точность передачи и не позволяют характеризовать количество информации, теряемой в канале или передаваемой через канал, в этом случае. Для учета информационных возможностей канала воспользуемся дифференциальной энтропией и взаимной информацией

$$I(\hat{\lambda}, \lambda) = h(\lambda) - h(\lambda / \hat{\lambda}) = h(\hat{\lambda}) - h(\hat{\lambda} / \lambda), \tag{12}$$

где $h(\lambda) = -\int\limits_{-\infty}^{\infty} p(\lambda) \log p(\lambda) d\lambda$ – дифференциальная энтропия источника данных;

$h(\lambda / \hat{\lambda}) = -\int\limits_{-\infty}^{\infty} d\lambda \int\limits_{-\infty}^{\infty} p(\lambda / \hat{\lambda}) \log p(\lambda / \hat{\lambda}) d\hat{\lambda}$ – условная дифференциальная энтропия.

Если выбрать в качестве функции потерь (3) функцию $r(\hat{\lambda}, \lambda) = -\log p(\lambda / \hat{\lambda})$, то средний обобщенный риск с учетом (5) будет определяться

$$b(F_R, F_T) = -\int\limits_{\Lambda_R} d\lambda \int\limits_{\Lambda} \log p(\lambda / F_R(y \mid F_T) p(y \mid F_T; \lambda) dy = h(\lambda / \hat{\lambda}) . \tag{13}$$

Обобщенный риск (13) в отличие от (11) характеризует условное количество информации, теряемой в канале связи при заданных операторах обработки данных F_T и F_R. Заметим, что взаимная информация (12) определяет количество информации содержащейся в принятых данных $\hat{\lambda}$ относительно переданных данных $\hat{\lambda}$. Поэтому максимум (12) эквивалентен минимуму (13). При этом максимум (12) для заданной дифференциальной энтропии источника $h(\lambda)$ оказывается эквивалентным минимуму условной дифференциальной энтропии $h(\lambda / \hat{\lambda})$, которая характеризует потери информации в канале. Это означает, что комплексная оптимизация каналов связи на основе потерь информации (количества передаваемой информации) в канале и квадратической ошибки передачи оказываются эквивалентными.

Оптимизация, экстремумы и сравнение беспроводных каналов связи. Рассмотрим теперь задачу комплексной оптимизации каналов связи в общем виде. Так как среда передачи и соответственно оператор F_M не являются управляемыми, комплексная оптимизация канала связи может достигаться за счет выбора согласованных правил решений (операторов обработки данных) на передающей и приемной сторонах. В общем случае оптимальное байесовское обобщенное правило решения $\hat{\lambda}_o = F_{Ro}(F_M(F_{To}(\lambda), n))$ для произвольного канала связи будет определяться решением оптимизационной задачи следующего вида:

$$\pi_4(F_{Ro}, F_{To} \mid y) = \frac{\min}{F_R \in \Re_R, F_T \in \Re_T} \pi_4(F_R, F_T \mid y), \tag{14}$$

где $\Re_T(\Lambda, \Lambda_T)$, $\Re_R(\Lambda_R, \hat{\Lambda})$ – соответствующие множества допустимых операторов (правил решений) F_T и F_R, заданных на $\Lambda \times \Lambda_T$ и $\Lambda_R \times \hat{\Lambda}$.

Это означает, что комплексная оптимизация каналов связи с математической точки зрения сводится к нахождению таких операторов $F_T \in \Re_T$ и $F_R \in \Re_R$, при которых достигается экстремум (минимум) функционала (14). В указанной постановке рассматриваемая задача комплексной оптимизации канала связи является вариационной.

Рассмотрим свойства вариаций и необходимые условия экстремума для функционала (14). Пусть $\pi_4(F_R, F_T \mid y)$ – функционал, определяемый на множестве $\Re \to \Re_T \times \Re_R$. Функционал $\pi_4(F_R, F_T \mid y)$, рассматриваемый в точке $F_o = (F_{To}, F_{Ro}) \in \Re$, достигает минимума, если для всех F, достаточно близких к точке F_o выполняется неравенство $\pi_4(F \mid y) - \pi_4(F_o \mid y) \geq 0$. В этой точке функционал (14) имеет экстремум.

Рассматривая функционал как абстрактную функцию, для которой справедливо определение слабого дифференциала [6], сформулируем необходимые условия его экстремума.

Теорема. Для того чтобы функционал π_4, определяемый (14), достигал в точке F_o экстремума, необходимо, чтобы его дифференциал в этой точке равнялся нулю при всех $h \in \Re$

$$\pi_4'(F_o \mid y)h = 0. \tag{15}$$

Иначе говоря, необходимо чтобы $\pi_4'(F_o \mid y) = 0$.

Доказательство. По определению дифференцируемости функционала имеем

$$\pi_4(F_o + h \mid y) - \pi_4(F_o \mid y) = \pi_4'(F_o \mid y)h + o(h). \tag{16}$$

Пусть $\pi_4'(F_o \mid y)h \neq 0$ для некоторого h. Тогда при достаточно малых действительных ε знак всего выражения $\pi_4'(F_o \mid y)(\varepsilon h) + o(\varepsilon h)$ совпадает со знаком его главного члена $\pi_4'(F_o \mid y)(\varepsilon h)$. Но $\pi_4'(F_o \mid y)$ – линейный функционал, поэтому $\pi_4'(F_o \mid y)(\varepsilon h) = \varepsilon \pi_4'(F_o \mid y)h$. Следовательно, если $\pi_4'(F_o \mid y)h \neq 0$, то выражение (16) может принимать при сколь угодно малых h как положительные, так и отрицательные значения, т.е. экстремума в точке F_o быть не может.

Уравнение (15) определяет необходимые условия существования экстремума функционала (14) и оптимального байесовского правила решения для канала связи при наблюдении реализации y.

Если определена точка F_o, то к задаче оптимизации (14) тесно примыкает другая задача – оценка показателей качества оптимальных (байесовских) каналов связи для заданных условий передачи, которые принято называть теоретически предельными или потенциальными. Показателями качества оптимальных для заданных условий каналов связи являются условный средний риск

$$\pi_5(F_{Ro}, F_{To} \mid \lambda) = \int_{\Lambda_R} r(F_{Ro}(y \mid F_{To}), \lambda) p(y \mid \lambda, F_{To}) dy,$$

определяемый при фиксированных данных λ на входе, а также средний риск

$$\pi_6(F_{Ro}, F_{To}) = \int_{\Lambda} \pi_4(F_{Ro}, F_{To} \mid \lambda) p(\lambda) d\lambda$$

для всей совокупности передаваемых данных.

Для практических приложений представляет интерес также задача анализа конкретных типов каналов связи, которая сводится к расчету условного $\pi_5(F_R, F_T \mid \lambda)$ или среднего риска $\pi_6(F_R, F_T)$ при заданном правиле решения $\hat{\lambda} = F_R(F_M(F_T(\lambda), n))$ в условиях, определяемых оператором F_M среды передачи и помехами n, и последующему сравнению их с потенциальными для заданных условий. Это позволяет судить о степени совершенства конкретных типов каналов в заданных условиях.

Общее решение задачи байесовской оптимизации каналов связи. В общем случае передача данных λ в канале осуществляется на основе их соответствующей обработки на передающей стороне, последующему преобразованию в среде передачи (эфире) с учетом влияния шумов и помех и соответствующей обработке на приемной стороне. Общее решение задачи определяется в соответствии с (15) на основе решения системы уравнений в вариациях следующего вида:

$$\int_{\Lambda} \frac{\delta r(F_R(y \mid F_T), \lambda)}{\delta F_R} p(\lambda \mid y, F_T) d\lambda = 0, \tag{17}$$

$$\int_{\Lambda} \frac{\delta r(F_R(y \mid F_T), \lambda)}{\delta F_R} \frac{\delta F_R}{\delta y} \frac{\delta y}{\delta F_T} p(\lambda \mid y, F_T) d\lambda + \int_{\Lambda} r(F_R(y \mid F_T), \lambda) \frac{\delta p(\lambda \mid y, F_T)}{\delta y} \frac{\delta y}{\delta F_T} d\lambda = 0. \tag{18}$$

Решение (17) определяет оптимальный оператор обработки для приемной стороны при условии заданных преобразований в среде и обработке на передающей стороне. Это решение совпадает с классическим байесовским для приемной стороны и при квадратичной функции потерь сводится к оператору обработки в виде условного апостериорного среднего для передаваемых данных. Решение (18), в отличие от решения (17), определяет оптимальный оператор обработки для передающей стороны. При этом данный оператор учитывает оптимальность обработки на приемной стороне (первое слагаемое), а также ее чувствительность к вариациям наблюдений, обусловленных вариациями обработки на передающей стороне. Кроме этого данное решение учитывает также и чувствительность статистики наблюдений к вариациям оператора обработки на передающей стороне (второе слагаемое).

Дальнейшая конкретизация общих решений должна рассматриваться в рамках представлений соответствующих общих операторов в виде конкретных интегральных, дифференциальных или смешанного типа в том числе и с континуально непрерывными ядрами операторов. При этом могут рассматриваться как линейные, так и нелинейные операторы, например, операторы Гаммерштейна или Урысона. Учет многоканальности обработки в каналах связи производится путем перехода от скалярных к соответствующим векторно-матричным представлениям конкретных операторов обработки. В общем случае полагается, что помехи и шумы могут вноситься не только средой передачи, но и при соответствующей обработке на обеих сторонах канала.

Заключение. Таким образом, развиваемый байесовский подход к комплексной оптимизации обработки в виде единого процесса передачи данных и полученных на его основе общих решений позволяет определять оптимальную комплексную обработку входных данных для различных типов каналов связи с учетом свойств используемых сред передачи. В условиях априорной определенности относительно статистики данных и преобразований в среде передачи, а также заданных с точностью до параметров структуры операторов обработки на передающей и приемной сторонах предлагаемый подход позволяет определять оптимальные байесовские каналы связи и оценивать близость к ним предлагаемых для реализации близких к оптимальным каналов связи. На основе использования предложенного подхода и общих соотношений при заданных структурах операторов возможно также осуществлять раздельную оптимизацию обработки в отдельных элементах передающих и приемных трактов передачи не только в различных беспроводных, но и проводных и кабельных каналах связи.

При этом следует отметить, что некоторую неудовлетворенность может вызывать отсутствие в статье результатов решения конкретных прикладных задач комплексной оптимизации обработки в каналах связи. Однако целью статьи являлось изложение одного из возможных подходов к общему решению проблемы комплексной оптимизации беспроводных каналов связи, которая до настоящего времени не имеет решения. Отсутствие в статье иллюстрации конструктивности излагаемого подхода к решению конкретных прикладных задач объясняется не отсутствием таковых, а скорее ограниченностью объема статьи. Так, например, в [4] рассматривается одна из иллюстраций развиваемого здесь общего подхода к решению проблемы комплексной оптимизации обработки, осуществляемой в пространственно-временных трактах авиационных каналов связи, свидетельствующая о его конструктивности.

Литература

1. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.

2. Крылов Ю. Стандарт IEEE 802.11n: решение от компании metalink // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2006. – № 7.

3. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А.Г. Зюко, А.И. Фалько, И.П. Панфилов, В.Л. Банкет, П.В. Иващенко; Под ред. А.Г. Зюко. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.

4. Поспелов Б.Б. Реализация концепции адаптируемого канала связи в авиационных радиолиниях // Радиотехника. – 2002. – Вып.128. – С. 197-205.

5. Теория передачи сигналов: Учебник для вузов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М. Финк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.

6. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального. – М.: Наука, 1972. – 496 с.

Надійшла 3.2.2010 р.