

УДК 621.396

А.Н. Битченко¹, Л.Б. Макаров¹, А.А. Подорожняк²

¹Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

²Харківський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ И РАЗВИТИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПАРАМЕТРА «БАЗА» СИГНАЛОВ

Проведен анализ взаимосвязи характеристик помехозащищенности специальных радиоканалов управления с параметром «база» сигнала. Показана целесообразность приведения базы к более общему виду за счет введения «полевой» составляющей в аналитическое выражение для базы сигнала. Предложено в качестве данной составляющей использовать коэффициент усиления передающих антенн. Представлен расчет конкретных значений коэффициента усиления для линзовых и зеркальных телескопических оптических антенных систем лазерных передающих устройств.

Ключевые слова: помехозащищенность, скрытность, база сигнала, лазерная линия связи, коэффициент усиления передающей антенны.

Постановка проблемы и анализ литературы

В соответствии с прогнозом развития систем и средств управления и связи специального назначения на период до 2010 года в них найдет комплексное применение техника всех видов связи [1]. При этом для радиоканалов преимущественное развитие остается за спутниковыми системами и сетями телекоммуникаций, а также за земной автоматизированной адаптивной радиосвязью в коротковолновом – ультракоротковолновом диапазонах. Это обеспечит высокие вероятностно – временные характеристики доведения приказов управления войсками и оружием и повышенную живучесть инфраструктуры телекоммуникаций и управляющих подсистем. Степень защищенности систем и сетей связи от различных факторов воздействия сегодня является одним из главных критериев их применимости [2].

Важнейшей характеристикой защищенности средств связи от мощных естественных и преднамеренных помех на сигнальном уровне является помехозащищенность: способность системы связи обеспечивать функционирование, управление в условиях воздействия шумов и помех искусственного и есте-

ственного происхождения [3]. Однако приведенные в известных источниках [3-6] определения помехозащищенности (ПЗ) и «базы» сигнала не в полной мере учитывают специфику систем связи, использующих широкополосные сигналы и антенные системы с узкой диаграммой направленности (в частности – оптические лазерные системы с воздушно-космическими каналами связи).

Итак, **целью данной статьи** является анализ взаимосвязи характеристик помехозащищенности радиоканалов с параметром «база» сигнала, обобщение понятия «база» на оптические лазерные системы связи и формулировка аналитического выражения для базы сигнала учитывающего «полевую» составляющую.

Основная часть

Наиболее распространенными количественными мерами помехозащищенности являются вероятностная и энергетическая, менее распространена также энтропийная мера [4].

Вероятностный критерий для помехозащищенности имеет вид

$$P_{ПЗ} \geq P_{ПЗ \text{ здн}}, \quad (1)$$

$$\text{либо } P_{\text{ПЗ}} = P_{\text{ПЗ MAX}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ПЗ}}$ – вероятность функционирования системы связи и управления с заданным уровнем помехозащиты.

Величину вероятности $P_{\text{ПЗ}}$ естественно записать в виде равенства

$$P_{\text{ПЗ}} = 1 - P_{\text{Р}} P_{\text{Н}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{Р}}$ – вероятность разведки параметров радиоэлектронной станции (РЭС), необходимых для организации радиопротиводействия (РЭП); $P_{\text{Н}}$ – вероятность нарушения работы РЭС в результате радиопротиводействия.

В работе [5] предложена более детализированная форма выражения (3)

$$P_{\text{ПЗ}} = 1 - \left[P_{\text{ПП}} P_{\text{O(ПП)}} + (1 - P_{\text{ПП}}) P_{\text{O}} \right], \quad (4)$$

где $P_{\text{ПП}} = P_{\text{Р}} P_{\text{Г}}$ – вероятность действия преднамеренных помех; $P_{\text{O(ПП)}} = f(E_{\text{C}}/N_{\text{ПП}}) = P_{\text{Н}}$ – вероятность ошибки (нарушения работы) РЭС или в целом системы связи и управления (ССУ) при воздействии преднамеренных помех; $P_{\text{O}} = f(E_{\text{C}}/N_{\text{O}})$ – вероятность ошибки в РЭС (ССУ) при воздействии естественных помех; $P_{\text{Г}}$ – вероятность готовности к действию аппаратуры РЭП; $N_{\text{ПП}}$ – спектральная плотность мощности преднамеренной помехи.

Соотношение (3) иллюстрирует положение о том, что помехозащищенность телекоммуникационной системы определяется ее скрытностью (через вероятность $P_{\text{ПП}}$) и помехоустойчивостью (через вероятности $P_{\text{O}}, P_{\text{O(ПП)}}$). Вероятность $P_{\text{Р}}$, как составляющая величины $P_{\text{ПП}}$, количественно отражает свойство РЭС, называемое скрытностью. Под скрытностью понимают способность РЭС противостоять мерам радиотехнической разведки, направленным на обнаружение факта работы РЭС и параметров ее сигналов для организации РЭП [4]. Вероятности $P_{\text{Р}}$ и $P_{\text{СКР}}$ связаны естественным соотношением

$$P_{\text{СКР}} = 1 - P_{\text{Р}}. \quad (5)$$

Существует несколько видов скрытности: энергетическая $P_{\text{СКРЭ}}$, временная $P_{\text{СКРВ}}$, частотная $P_{\text{СКРЧ}}$, пространственная $P_{\text{СКРПР}}$, маскировочная $P_{\text{СКРМ}}$, структурная $P_{\text{СКРС}}$, информационная $P_{\text{СКРИ}}$, др. Как правило они проявляются (реализуются) в сочетаниях.

Например, для спутниковых радиоканалов связи с применением широкополосных шумоподобных сигналов (ШШС) характерны энергетическая и структурная скрытности. Для КВ – УКВ земных радиоканалов с применением программно – перестраиваемой рабочей частоты (ППРЧ) характерны частотная и временная скрытности. Лазерным информационным системам (ЛИС) с открытыми оптическими

каналами присущи пространственная, временная, поляризационная скрытности, а также скрытность за счет смены физического принципа действия с радиотехнического на квантово – оптический. Для низкочастотных радиодиапазонов (ОНЧ, СДВ, ДВ, СВ), для которых недавно разработаны перспективные так называемые узкополосные шумоподобные сигналы (УШПС), характерны временная, структурная и маскировочные виды скрытности.

Из всех параметров сигнала наибольшее влияние на скрытность и помехозащищенность системы передачи оказывает база V сигнала, ее значение, определяемое из выражения

$$V = \Delta F_{\text{C}} \cdot T_{\text{C}}, \quad (6)$$

где ΔF_{C} – эффективная ширина спектра сигнала, Гц; T_{C} – длительность элементарного сигнала, с.

Как известно, для простых элементарных сигналов $V \approx 1$, а для сложных составных, к которым относятся ШШС, ППРЧ, УШПС, $V \gg 1$. При этом получение больших значений базы в ШШС и ППРЧ достигается за счет расширения ΔF_{C} , а при применении УШПС – за счет увеличения T_{C} .

Как известно, база участвует в энергетических соотношениях радиоприема через выражение

$$P_{\text{C}}/P_{\text{Ш}} \cdot V = E_{\text{C}}/N_{\text{O}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{C}}/P_{\text{Ш}}$ – отношение мощностей принимаемого сигнала и шума на антенном входе РПУ; $E_{\text{C}}/N_{\text{O}}$ – отношение энергии бита сигнала к спектральной плотности мощности помехи на выходе демодулятора (входе 1 – го решающего устройства).

Отношение $E_{\text{C}}/N_{\text{O}}$ определяет помехоустойчивость P_{O} системы и должно оставаться фиксированным. Так, для получения $P_{\text{O}} \approx 10^{-6}$ необходимо поддерживать отношение $E_{\text{C}}/N_{\text{O}} \approx 10$. Тогда величины $P_{\text{C}}/P_{\text{Ш}}$ и V в соотношении (7) находятся в обратно пропорциональной зависимости, изображенной на графике (рис. 1).

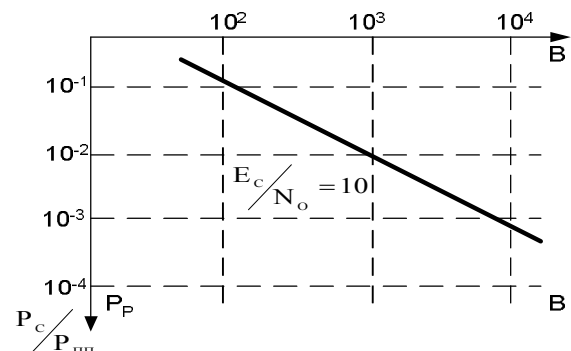


Рис. 1. Зависимость $P_{\text{C}}/P_{\text{Ш}}$ от V при $E_{\text{C}}/N_{\text{O}} \approx 10$ (const)

Как следует из графика, увеличением базы сигнала можно поддерживать значение $E_{\text{C}}/N_{\text{O}}$ постоянным, например, равным 10, при уменьшении отношения $P_{\text{C}}/P_{\text{Ш}}$ на входе РПУ на несколько по-

рядков. Это обеспечивает необходимое значение P_0 . Уменьшение же отношения $P_C/P_{ПП}$ с точностью до постоянного множителя k пропорционально уменьшению вероятности разведки $P_p = k \cdot P_C/P_{ПП}$. А уменьшение P_p при поддержании постоянного значения P_H , как следует из (2), ведет к увеличению помехозащищенности системы (радиоканала). Таким образом, прослеживается логическая цепочка зависимостей

$$\begin{aligned} (\cdot) \text{const} &\rightarrow P_H = \\ &= \text{const} \rightarrow \uparrow B \rightarrow \downarrow \frac{P_C}{P_{ПП}} \rightarrow \downarrow P_p \rightarrow \uparrow P_{ПЗ}. \end{aligned} \quad (7)$$

Как следует из выражения (7), повышение помехозащищенности (величины $P_{ПЗ}$) радиоканала тесно связано с пропорциональным увеличением значения базы B сигнала. Это справедливо и для ШШС, ППРЧ, и для УШПС. Подчеркнем, что во всех указанных случаях анализ ведется на сигнальном уровне.

Однако случай с протяженной лазерной воздушно – космической линией связи, помехозащищенность которой основывается прежде всего на высочайшей пространственной скрытности, не подчиняется общей отмеченной закономерности $P_{ПЗ} \sim B$. В самом деле, при действии импульсного лазера с очень узкой шириной излучения (порядка нескольких угловых сек) и короткими импульсами длительностью τ_c , справедливо классическое выражение $\tau_c \approx 1/\Delta f_c$, что приводит к значению базы таких элементарных сигналов порядка единицы. Тем не менее лазерная воздушно-космическая линия связи с узкополосным квантово-оптическим передатчиком является суперпомехозащищенной.

Анализ показывает, что целесообразно учитывать универсальную пропорциональную зависимость между значениями $P_{ПЗ}$ и B , если расчеты проводить не на узком сигнальном уровне, а на более общем сигнально - полевым. Само понятие «пространственной» скрытности связано с рассмотрением наряду с сигналами еще и пространства, оптического поля.

Современная статистическая теория оптимального приема одина для РПУ любых информационных радиосистем передачи информации: радиолокационных, радионавигационных, радиосвязи и др. Она основана на математической статистике и теории статистических решений.

При временном приеме (сигнальный уровень) объектом наблюдения, на основе которого выносятся нужные решения D , является процесс

$$x(t) = u_{\Sigma}(t) = u_C(t, \lambda) + u_T(t), t \in T, \quad (8)$$

представляющий собой напряжение смеси сигнала и шума на выходе АФУ заданной конфигурации, где λ – информационный параметр. Далее процесс (8) чаще всего дискретизируется, заменяется векторной выборкой $X = [x_1, \dots, x_i = x(t_i = i\Delta t), \dots, x_T]$, которая обрабатывается на оптимальной РПУ с помощью решающего правила $\phi_0(D/x(t))$. РПУ на основе

обработки выборки X выносит нужное решение D , как показано на рис. 2 [5].

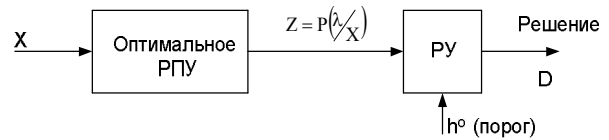


Рис. 2. Оптимальный статистический приемник дискретных сигналов

При пространственно – временном приеме объектом наблюдения является поле смеси сигнала и шума

$$E_{\Sigma} = (t, r) = E_C(t, r, \lambda) + E_T(t, r), \quad (9)$$

принимаемое антенным устройством в некотором ограниченном объеме пространства $r \in V$ и времени $t \in T$. На основе обработки этого поля РПУ выносит некоторое решение $D = D(\lambda)$, как – то связанное с полезной информацией λ .

Очевидно, канал передачи, обладающий пространственной скрытностью, естественно рассматривать, как канал с пространственно – временным приемом, на поле – сигнальном уровнях, обобщая и расширяя для него понятие базы за счет введения в формулу определения базы третьей, «полевой» компоненты. В качестве таковой предлагается выбрать коэффициент усиления передающей антенны – $G_{ПРД}$, входящий часто в выражение для эквивалентной изотропно – излучаемой мощности (ЭИИМ) передающего устройства

$$\text{ЭИИМ}_{ПРД} = P_{ПРД} G_{ПРД}, \text{ дБ} \cdot \text{Вт}. \quad (10)$$

Тогда обобщенное аналитическое определение базы сигнала, переносимого физическим полем, будет иметь вид

$$B = G_{ПРД} \cdot \Delta F_C \cdot T_C. \quad (11)$$

Для передатчиков высоконаправленного излучения, таких как лазерный или радиопередатчиков сантиметрового, миллиметрового диапазонов, значение B в основном будет определяться величиной $G_{ПРД}$.

Рассмотрим, каких конкретных значений может достигать $G_{ПРД}$ для наиболее экстремального случая – для оптических антенных систем (ОАС) лазерных передающих устройств.

Случай А. Использование линзовых ОАС.

Известно, что для круговой линзовой антенны лазерного передатчика диаметра d , длины волны электромагнитного излучения λ , коэффициент усиления $G_{ОАС}$ определяется формулой [7]

$$G_{ОАС} = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2, \quad (12)$$

и достигает величин 110...120 дБ.

Так, линзовая антенна диаметром $d = 15,2$ см, на оптической частоте $\nu = 6 \cdot 10^{14}$ Гц дает эффективное усиление $G_{ОАС} = 122$ дБ при угловой ширине луча примерно $3 \cdot 10^{-6}$ рад.

Случай Б. Использование зеркальных телескопических ОАС системы Кассегрейна.

В этом случае ДН ОАС и усиление в дальней

зоне определяется с помощью теории и интеграла дифракции, на основании результатов которых для зеркальной антенны Кассегрейна справедливо соотношение [7]

$$G_{\text{дБ}} = 10 \lg(0) = 10 \lg \left[2 \cdot \left(\frac{2\pi r_0}{\lambda} \right)^2 \left(e^{-b^2/r_0^2} - e^{-a^2/r_0^2} \right)^2 \right], \quad (13)$$

где r_0 – радиус луча на уровне $1/C^2$ в апертуре телескопической ОАС; a – радиус затенения; b – радиус усечения.

На рис. 3 представлена зависимость $G_{\text{ОАС}}$ от размера луча при различных отношениях диаметров антенны и центральной затененной зоны (a/b) для телескопической ОАС диаметром 191 мм и $\lambda = 1,06$ мкм.

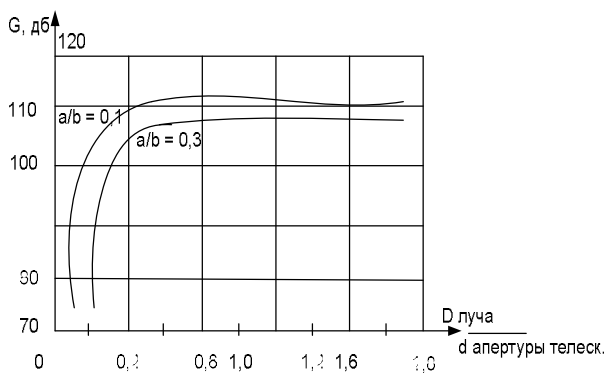


Рис. 3. Зависимость $G_{\text{ОАС}}$ зеркальной антенны Кассегрейна от отношения диаметров луча и апертуры телескопа

Как следует из графиков, зеркальные телескопические антенны оптического диапазона также могут обеспечить значение $G_{\text{ОАС}} \approx 105...115$ дБ.

Таким образом, расширение понятия базы (В) сигнала за счет введения в выражение для нее «полевой» компоненты ($G_{\text{ПРД}}$) привело к общему универсальному соответствию: большая база – высокая помехозащищенность и для каналов с высокой пространственной скрытностью типа ОЛС. Интересны в связи с этим результаты оценочного анализа помехозащищенности космических ОЛС и спутниковых радиолиний эквивалентной длины, представленные в табл. 1. В таблице представлены результаты анализа помехозащищенности спутниковых радиолиний и ОЛС ($q_{\text{Э}}$, $q_{\text{П}}$, $q_{\text{С}}$ – это энергетический, пространственный и сигнальный коэффициенты помехозащищенности соответственно).

ЗАВАДОЗАХИЩЕНІСТЬ І РОЗВИТОК ЗМІСТУ ПАРАМЕТРА «БАЗА» СИГНАЛІВ

А.М. Битченко, Л.Б. Макаров, А.О. Подорожняк

Проведений аналіз взаємозв'язку характеристик завадозахищеності спеціальних радіоканалів управління з параметром «база» сигналу. Показана доцільність приведення бази до більш загального вигляду за рахунок введення «полевої» складової в аналітичний вираз для бази сигналу. Запропоновано як дану складову використовувати коефіцієнт посилення передавальних антен. Представлений розрахунок конкретних значень коефіцієнта посилення для лінійних і дзеркальних телескопічних оптичних антенних систем лазерних передавальних пристроїв.

Ключові слова: завадозахищеність, скритність, база сигналу, лазерна лінія зв'язку, коефіцієнт посилення передавальної антени.

Таблица 1
Коэффициенты помехозащищенности линий связи

Вид линий связи	Коэффициенты уравнения помехозащиты				
	ЭИИМ рэп (оэп) дБ·Вт	$q_{\text{Э}}$, дБ·Вт	$-q_{\text{П}}$ дБ	$q_{\text{С}}$ дБ	Запас помехозащищенности дБ·Вт
Радиолиния с ШПС	110...120	30...40 (70...80)	20...40	20...50	10
ОЛС	115...125	90...95	90	-10	50...60

Выводы

1. Целесообразно расширение понятия базы сигнала за счет введения в ее аналитическое выражение «полевой» компоненты, учитывающей пространственное распространение поля излучения. Такой компонентной предлагается выбрать коэффициент усиления антенной системы $G_{\text{ПРД}}$. Это приводит к универсальному соответствию: большая база – высокая помехозащищенность для каналов передачи с различными видами скрытности.

2. Энергетическая составляющая уравнения помехозащищенности $q_{\text{Э}}$ ($\text{ЭИИМ}_{\text{ПРД}}$) для оптических линий связи значительно (до 50...60 дБ) превышает этот параметр радиолинии относительно известных широкополосных радиосигналов, что объясняется огромным коэффициентом усиления $G_{\text{ПРД}}$ ОАС лазерного передатчика, достигающего 110 дБ.

Список литературы

1. Федяев В.Е. Концепция создания интегральной сети сбора и обработки данных о радиоэлектронной обстановке в АСУ ВС Украины // Анализ эффективности и моделирования процессов управления при обмене информацией в сетях военной связи. – К.: КВИУС, 1994. – Вып. 1. – С. 9-13.
2. ГОСТ В 23609 – 86 (СТ 8 СЭВ 0217 – 86).
3. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / Под ред. Г.И. Тузова. – М.: Радио и связь, 1985. – 164 с.
4. Горбенко И.Д., Стасев Ю.В., Замула А.А. Теория дискретных сигналов. – Х.: МО СССР, 1988. – 119 с.
5. Варакин Я.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.
6. Лазерная космическая связь / Под ред. М. Кацмана / – М.: Радио и связь, 1993. – 240 с.
7. Королев А.В., Макаров Л.Б. Оценка помехозащищенности лазерных космических систем. // Ракетно-космична техніка. – Х.: ХВУ, 1999. – Вып. 1. – С. 165-175.

Поступила в редколлегию 7.07.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

HINDRANCEPROTECTING AND DEVELOPMENT OF MAINTENANCE OF PARAMETER IS A «BASE» OF SIGNAL

A.N. Bitchenko, L.B. Makarov, A.A. Podorozhnyak

The analysis of intercommunication of descriptions of hindranceprotecting of the special radio channels of management is conducted with a parameter «base» of signal. Expedience of bringing a base over is rotined to more general view due to introduction of the «field» constituent to analytical expression for the base of signal. It is offered how to utilize this constituent amplification of transmission aerials factor. The calculation of concrete values of amplification factor for the lens and mirror telescopic optical aerial systems of laser transmission devices is presented.

Keywords: *hindranceprotecting, secrecy, base of signal, laser flow line, amplification of transmission aerial factor.*